

УДК 669.162.283

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ АНАЛИЗА ПРОЦЕССОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ОКСИДОВ ЖЕЛЕЗА

Филатов С.В.¹, управляющий директор

Загайнов С.А.², д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Металлургия железа и сплавов» (zagainovsky@mail.ru)

Гилева Л.Ю.², к.т.н., доцент кафедры «Металлургия железа и сплавов»

Пыхтеева К.Б.², к.т.н., доцент кафедры «Металлургические технологии»

¹ ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат»

(398040, Россия, Липецк, пл. Металлургов, 2)

² Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

(620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

Аннотация. Рассмотрены термодинамика и кинетика восстановления оксидов железа и разработана методика оценки изменения степени использования монооксида углерода в зависимости от интенсивности доменной плавки. Адекватность модели подтверждается сопоставлением результатов моделирования и производственных данных о работе доменных печей объемом 2200 и 3200 м³. Показано, что при высокой степени развития процессов косвенного восстановления изменение интенсивности плавки будет сопровождаться существенными колебаниями теплового состояния.

Ключевые слова: интенсивность доменной плавки, степень косвенного восстановления, термодинамика и кинетика восстановления оксидов железа, время пребывания материалов в печи.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-9-658-661

Влияние интенсивности доменной плавки на процесс косвенного восстановления оксидов железа общепризнано. В частности, в работе [1] дается качественный анализ влияния условий плавки на степень развития реакции косвенного восстановления.

Целью данного исследования является разработка математической модели для оценки влияния интенсивности плавки на степень использования восстановительного потенциала монооксида углерода, которая во многом определяет развитие реакций прямого восстановления.

Известно, что большинство восстановительных реакций в доменной печи не достигает равновесия. Влияние времени восстановления на отклонение концентрации продуктов реакции от равновесной выражается через скорость реакции [2]

$$v = \frac{dx}{d\tau} = k(x - x_p) = e^{k\tau}, \quad (1)$$

где v – скорость химической реакции, моль/л·с; x – концентрация вещества, моль/л; x_p – равновесная концентрация, моль/л; τ – время, с; k – константа скорости реакции, с⁻¹.

Интегрирование данного выражения позволяет получить зависимость отклонения концентрации вещества относительно равновесной от времени протекания реакции

$$\int_{x_p}^x \frac{dx}{x - x_p} = k \int_0^{\tau} d\tau \quad (2)$$

или

$$x - x_p = e^{k\tau}. \quad (3)$$

При переходе к контролируемому технологическому показателю, характеризующему развитие реакции косвенного восстановления – степени использования монооксида углерода, уравнение (3) примет вид:

$$\eta_{CO} = \eta_{CO}^p (1 - e^{-k\tau}), \quad (4)$$

где η_{CO}^p – равновесная степень использования монооксида углерода, доли единиц, τ – время пребывания материала в зоне восстановления, с.

Расчет степени использования монооксида углерода производится с использованием метода натурно-математического моделирования [3]. После линеаризации уравнения (4) получим:

$$\frac{\Delta\eta_{CO}}{\eta_{CO}} = \frac{\Delta\eta_{CO}^p}{\eta_{CO}^p} - \frac{e^{-k\tau}}{1 - e^{-k\tau}} (k\Delta\tau + \Delta k\tau). \quad (5)$$

Для расчета входящей в уравнение (5) константы скорости реакции привлекаются практические данные о работе печи

$$k = \frac{\ln(\eta_{CO} - \eta_{CO}^p)}{\tau} \quad (6)$$

При допущении постоянства константы скорости реакции в области рабочих режимов, уравнение (6) принимает вид

$$\Delta\eta_{CO} = \frac{\eta_{CO}}{\eta_{CO}^p} \Delta\eta_{CO}^p - \eta_{CO} \frac{ke^{k\tau}}{1 - e^{k\tau}} \Delta\tau \quad (7)$$

Первое слагаемое позволяет учесть влияние на степень развития реакции косвенного восстановления термодинамических факторов, второе слагаемое – кинетических факторов. Влияние как термодинамического, так и кинетического фактора в большей степени проявляется при высокой фактической степени использования монооксида углерода, т. е. при использовании в шихте агломерата высокого качества и оптимального распределения рудной нагрузки по радиусу печи.

Данное уравнение позволяет оценить влияние технологических факторов – давления и интенсивности плавки при конкретных условиях работы печи на ход восстановительных процессов.

Анализ термодинамического равновесия реакций $FeO + CO = Fe + CO_2$ и $CO_2 + C = 2CO$, выполненный по известным зависимостям констант равновесия реакций от давления и температуры [4, 5], позволяет оценить влияние технологических факторов на равновесную степень использования монооксида углерода (рис. 1).

При построении диаграммы рассматривались константы равновесия реакций газификации углерода, находящегося в аморфном состоянии и в виде графита.

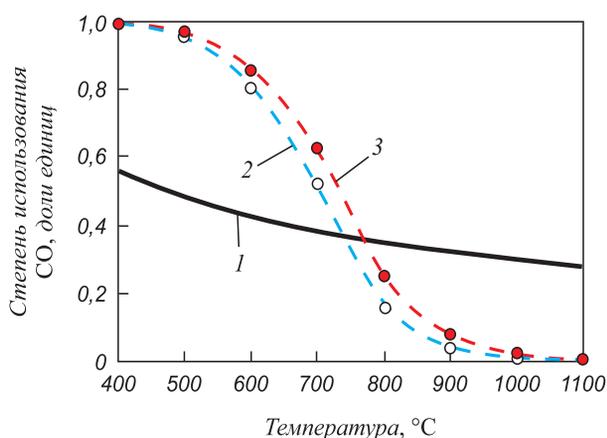


Рис. 1. Зависимость равновесной степени использования углерода от температуры и давления:

1 – реакция $FeO + CO = Fe + CO_2$; 2 – реакция $CO_2 + C = 2CO$ при $P = 0,2$ МПа; 3 – реакция $CO_2 + C = 2CO$ при $P = 0,4$ МПа

Fig. 1. Dependence of equilibrium degree of the use of carbon from temperature and pressure:

1 – reaction $FeO + CO = Fe + CO_2$; 2 – reaction $CO_2 + C = 2CO$ at $P = 0,2$ МПа; 3 – reaction $CO_2 + C = 2CO$ at $P = 0,4$ МПа

та. При температурах 800 – 1100 °С относительное отклонение численных значений констант равновесия не превышает 2 % (отн.).

Учитывая, что бесконусный загрузочный аппарат позволяет работать с избыточным давлением газа под колошником до 0,25 МПа, при этом давление в зоне начала интенсивного развития реакции прямого восстановления монооксида железа достигает 0,4 МПа, рассматривали равновесие реакций восстановления в диапазоне 0,2 – 0,4 МПа.

Обработка приведенной на рис. 1 зависимости показала, что в интервале температур 800 – 900 °С повышение давления на 0,01 МПа приводит к увеличению равновесной степени использования монооксида углерода на 0,002 доли единиц.

Повышение давления, кроме того, приводит к смещению границы начала развития реакций прямого восстановления в область более высоких температур, что в свою очередь приводит к увеличению зоны косвенного восстановления и увеличению времени пребывания материала в этой зоне:

$$\tau_{KB} = \frac{h_{KB}}{v_{KB}} \quad (8)$$

где τ_{KB} – время пребывания материала в зоне косвенного восстановления, с; h_{KB} – высота зоны косвенного восстановления, м; v_{KB} – скорость движения материалов в зоне косвенного восстановления, м/с.

Принимая допущение о пропорциональности изменения скорости движения материалов в зоне косвенного восстановления общей скорости движения материалов и, следовательно, времени пребывания материалов в печи, после линеаризации уравнения (8) получим:

$$\frac{\Delta\tau_{KB}}{\tau_{KB}} = \frac{\Delta h_{KB}}{h_{KB}} + \frac{\Delta\tau}{\tau} \quad (9)$$

где τ – время пребывания материала в печи, с.

Изменение высоты зоны косвенного восстановления рассчитывается по известной методике [3, 6]. Оценочные расчеты относительного изменения высоты зоны косвенного восстановления при увеличении давления 0,01 МПа на 0,0025 показали, что определяющим фактором является изменение времени пребывания материалов в печи, зависящее от ее суточной производительности:

$$\tau = \frac{V_0}{P\gamma_{ш}} \quad (10)$$

где V_0 – объем зоны косвенного восстановления, м³; P – суточная производительность печи, т/с; $\gamma_{ш}$ – удельный объем шихты, м³/т чугуна.

Снижение производительности доменной печи приводит к увеличению времени пребывания шихты в печи и, следовательно, к увеличению времени пребывания

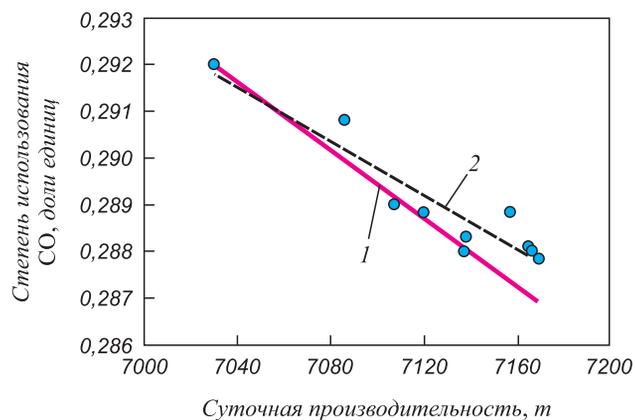


Рис. 2. Сопоставление расчетных и фактических зависимостей между интенсивностью плавки и степенью использования монооксида углерода для доменной печи объемом 2200 м³:

1 – результаты расчета; ● – фактические данные; 2 – линейная регрессия (фактические данные)

Fig. 2. Comparison of calculated and industrial data dependences with production intensity and the degree of the use of carbon monoxide for blast furnace of volume 2200 m³:

1 – calculated results; ● – industrial data; 2 – linear regression (Industrial data)

железорудных материалов в зоне косвенного восстановления. Поэтому возможно увеличение степени косвенного восстановления, и, следовательно, снижение степени прямого восстановления за счет кинетики восстановления.

Приведенная выше методика может быть использована для прогнозной оценки эффективности технологических мероприятий, направленных на изменение интенсивности доменной плавки.

Приведенные на рис. 2 и 3 результаты сопоставления расчетных и фактических зависимостей между интенсивностью плавки и степенью использования монооксида углерода для доменных печей объемом 2200 и 3200 м³ подтверждают адекватность методики.

Суммарный эффект изменения степени использования монооксида углерода, который определяется влиянием времени пребывания шихты в зоне косвенного восстановления и изменением равновесия реакции $CO_2 + C = 2CO$ при снижении производительности на 10 % составляет 0,020 – 0,025. Такое изменение степени использования монооксида углерода приведет к увеличению удельного расхода кокса на 9 – 12 кг/т чугуна.

Результаты теоретических исследований и анализ производственных данных показали существенное влияние давления на развитие реакции косвенного восстановления монооксида железа, а, следовательно, и на удельный расход кокса. При высокой степени развития процессов косвенного восстановления изменение ин-

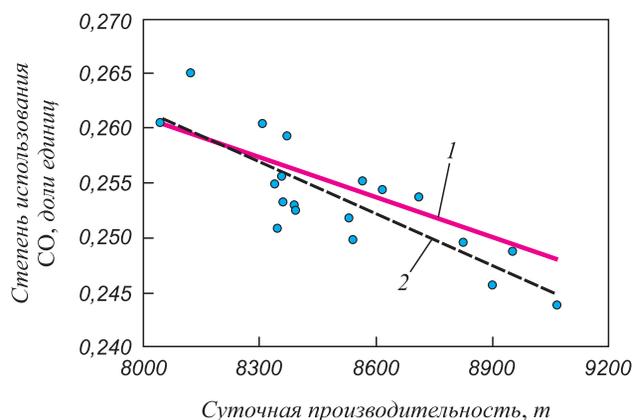


Рис. 3. Сопоставление расчетных и фактических зависимостей между интенсивностью плавки и степенью использования монооксида углерода для доменной печи объемом 3200 м³:

1 – результаты расчета; ● – фактические данные; 2 – линейная регрессия (фактические данные)

Fig. 3. Comparison of calculated and industrial data dependence from production intensity and the degree of carbon monoxide use of for blast furnace of volume 3200 m³:

1 – calculated results; ● – industrial data; 2 – linear regression (Industrial data)

тенсивности плавки будет сопровождаться существенными колебаниями теплового состояния.

Выводы. Разработан подход к анализу восстановления оксидов железа при изменении интенсивности плавки. Анализ результатов моделирования и фактических данных о работе доменных печей показал значимость данного фактора и необходимость его учета при выборе технологического режима при заданном изменении производства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Товаровский И.Г. Доменная плавка. Эволюция, ход процессов, проблемы и перспективы. – Днепропетровск: Пороги, 2003. – 596 с.
2. Тепло- и массообмен в плотном слое / Б.И. Китаев, В.Н. Тимофеев, Б.А. Боковиков и др. – М.: Металлургия, 1972. – 432 с.
3. Информационные системы в металлургии / Н.А. Спирин, Ю.В. Ипатов, В.И. Лобанов и др. – Екатеринбург: УГТУ, 2001. – 617 с.
4. Доменное производство: Справочное издание / Под ред. Е.Ф. Вегмана. Т. 1. – М.: Металлургия, 1989. – 486 с.
5. Shen W., Wu S.L., Zhang L.H. Real-time estimate of blast furnace theoretical combustion temperature based on the variation of gas utilization rate and coke ratio // 6th Int. Congress of the Science and technology of Ironmaking. 2012. С. 366 – 372.
6. Шаврин С.В., Ченцов А.В. К расчету высоты ступеней теплообмена в доменных печах // Изв. вуз. Черная металлургия. 1960. № 11. С. 27 – 31.

Поступила 4 апреля 2015 г.

DEVELOPMENT OF THE ANALYSIS OF IRON OXIDE REDUCTION PROCESSES

*Filatov S.V.*¹, *Managing Director*

*Zagainov S.A.*², *Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair*
 “*Metallurgy of Iron and Alloys*” (zagainovsky@mail.ru)

*Gileva L.Yu.*², *Cand. Sci. (Eng.) Assist. Professor, Head of*
 the Chair “*Metallurgy of Iron and Alloys*”

*Pykhiteeva K.B.*², *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the*
 Chair “*Metallurgical Technology*”

¹ JSC “*Novolipetsk Metallurgical Plant*” (2, Metallurgov sqr., Lipetsk, 398040, Russia)

² *Ural Federal University named after the first President of Russia*
B.N. Yeltsin (19, Mira str., Ekaterinburg, 620002, Russia)

Abstract. The article presents the study of connection between thermodynamics and kinetics of iron oxide reduction and production intensity. Model equations were developed for assessing the changes in degree of carbon monoxide use at the change in production intensity. Industrial data of blast furnace production with the useful volume of 2000 and 3200 confirmed the adequacy of the developed model. It was found that, the change in production intensity is accompanied by unsteady thermal state at high degree of developmental reproduction processes.

Keywords: production intensity, degree of indirect reduction, thermodynamics and kinetics of iron oxide reduction, production time.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-9-658-661

REFERENCES

1. Tovarovskii I.G. *Domennaya plavka. Evolyutsiya, khod protsessov, problemy i perspektivy* [Blast furnace. Evolution, course of the processes, problems and prospects]. Dnepropetrovsk: Porogi, 2003. 596 p. (In Russ.).
2. Kitaev B.I., Timofeev V.N., Bokovikov B.A. etc. *Teplo- i massoobmen v plotnom sloe* [Heat and mass transfer in a dense layer]. Moskva: Metallurgiya, 1972. 432 p. (In Russ.).
3. Spirin N.A., Ipatov Yu.V., Lobanov V.I., Krasnobaev V.A., Lavrov V.V., Rybolovlev V.Yu., Shvydkii V.S., Zagainov S.A., Onorin O.P. *Informatsionnye sistemy v metallurgii* [Information systems in industry]. Ekaterinburg: Ural'skii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2001. 617 p. (In Russ.).
4. *Domennoe proizvodstvo: Spravochnoe izdanie* [Blast Furnaces: Reference book]. Vegman E.F. ed. Vol. 1. Moscow: Metallurgiya, 1989. 486 p. (In Russ.).
5. Shen W., Wu S.L., Zhang L.H., Wu J., Xu J., and Kou M.Y. Real-time estimate of blast furnace theoretical combustion temperature based on the variation of gas utilization rate and coke ratio. *6th Int. Congress of the Science and technology of Ironmaking*. 2012, pp. 366–372.
6. Shavrin S.V., Chentsov A.V. To the calculations of height of heat transfer steps in blast furnaces. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1960, no. 11, pp. 27–31. (In Russ.).

Received April 4, 2015