

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ОКИСЛЕНИЯ МЕТАЛЛА

Исследована параметрическая чувствительность системы диагностики окалинообразования металла при его тепловой обработке, базирующейся на обратном методе расчета. Проанализировано влияние концентрации кислорода в продуктах сгорания в районе пламенного окна и в районе рекуператора, расхода топлива, расхода воздуха, повышения температуры воздуха в рекуператоре на искомые величины. Полученные результаты позволяют осознанно выбирать классы точности приборов для измерения входных величин, при которых будут получены приемлемые погрешности определения искомых величин.

Ключевые слова: *нагрев металла, окалинообразование, потери металла, система диагностики, погрешность измерения.*

Постановка проблемы

Тепловая обработка металла в пламенных печах сопровождается процессом образования окалины на поверхности металла, в результате чего имеют место потери металла и изменяются условия теплопередачи в печной камере [1,2]. Процессы окалинообразования в условиях высоких температур активно изучаются более ста лет, что позволило достаточно глубоко уяснить физико-химическую сущность и количественные закономерности протекания этих процессов [3,4].

При проектировании новой печи и составлении технологической карты, соответствующей номинальным условиям ее эксплуатации, как правило, расчетным способом оцениваются потери металла с окалиной.

Однако зачастую реальные технологические параметры эксплуатации печи отличаются от номинальных, а использование обычных расчетных методик затруднительно, поскольку в общем случае нет информации о текущих значениях всех факторов, влияющих на окалинообразование [5,6,7].

Анализ последних исследований и публикаций

В этом случае потери металла могут быть оценены при помощи систем диагностики. Такая система диагностики может быть реализована на базе прямых, обратных или комплексных методов [8]. Прямые методы базируются на использовании прогнозной математической модели [9], рассчитывающей в режиме реального времени температурное поле металла и образование окалины в зависимости от текущих значений температур по зонам печи, ее производительности

и т.д. Действительно, такой подход справедлив, но он требует мощных вычислительных ресурсов. Помимо этого, итоговые величины напрямую зависят от точности заданных констант скорости реакций окисления для определенной марки стали.

Обратные методы основаны на рассмотрении баланса кислорода в камере и газоходах печи и определении текущих значений расхода кислорода. В рамках предложенной в работе [10] системы диагностики рассматриваются следующие источники поступления кислорода в печную систему: вентиляторный воздух, подаваемый на горелки; подсосываемый в камеру печи атмосферный воздух; подсосываемый в газоходы атмосферный воздух. При создании системы диагностики принято допущение о том, что кислород расходуется только по реакциям горения, а также на окисление и обезуглероживание металла.

В рамках данной системы диагностики определяются следующие величины: текущие значения подсоса воздуха в топку, в газоходы, текущие значения подсоса воздуха на участке газохода от пламенного окна до рекуператора и текущий расход кислорода на окисление металла. Искомые величины определяются в результате решения соответствующей системы уравнений. Величины, входящие в уравнения как аргументы, определяются на основании текущей информации от чувствительных элементов.

Одним из серьезных преимуществ данной системы диагностики является сравнительная простота математического аппарата. Однако для перехода к ее практическому использованию необходимо пройти процедуру оценки параметрической чувствительности.

Цель (задачи) исследования

Целью данной работы является оценка параметрической чувствительности системы диагностики процессов окисления металла при тепловой обработке металла в печах, базирующейся на обратном методе.

Основной материал исследования

Схема расстановки чувствительных элементов для реализации создаваемого компонента диагностики процессов окисления металла на примере печи периодического действия приведена на рис. 1.

Рассматриваемая система диагностики процессов окисления металла базируется на основании решений следующей системы уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned} & V_m \cdot V_{nc} + V_{nod}^m + V_{nod}^z - V_{ок}^{O_2} = \\ & \frac{V_g \cdot c_g \left(\frac{t_g^{ex} + t_g^{вх}}{2} \right) \cdot (t_g^{вх} - t_g^{ex})}{(t_{nc}^{ex} - t_{nc}^{вх}) \cdot \sum_{i=1}^n C_i^{ком} \cdot c_i^{ком} \left(\frac{t_{nc}^{ex} + t_{nc}^{вх}}{2} \right)}, \\ & C_{O_2}^o = \frac{V_m \cdot V_{nc} \cdot C_{O_2}^{nc} + V_{nod}^m \cdot C_{O_2}^{ва} - V_{ок}^{O_2}}{V_m \cdot V_{nc} + V_{nod}^m - V_{ок}^{O_2}}, \\ & C_{O_2}^p = \frac{V_m \cdot V_{nc} \cdot C_{O_2}^{nc} + V_{nod}^m \cdot C_{O_2}^{ва} + V_{nod}^z \cdot C_{O_2}^{ва} - V_{ок}^{O_2}}{V_m \cdot V_{nc} + V_{nod}^m + V_{nod}^z - V_{ок}^{O_2}}, \end{aligned} \right. \quad (1)$$

где V_m – текущий расход топлива, м³/с; V_g – текущий расход воздуха, м³/с; t_g^{ex} , $t_g^{вх}$ – температура

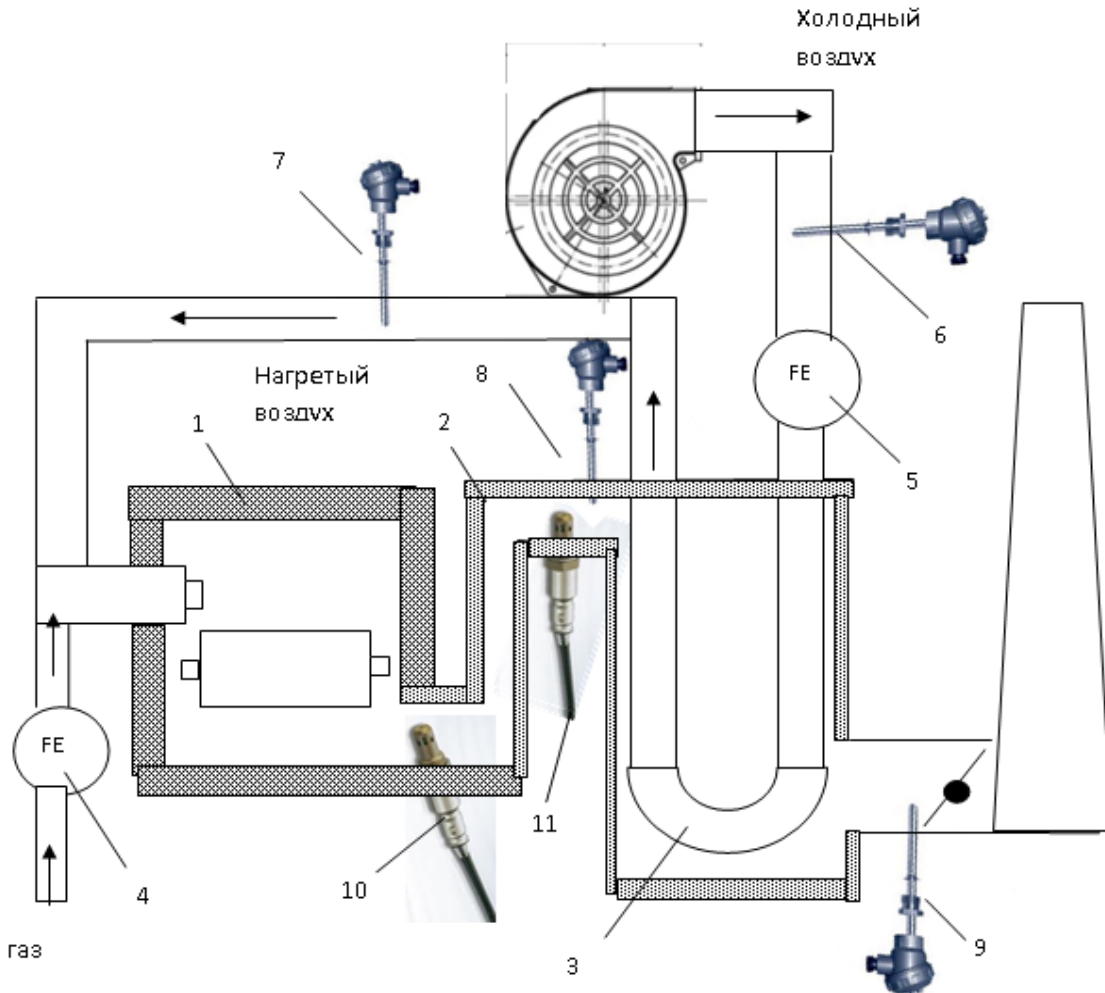


Рис. 1. Схема сбора информации от первичных датчиков для системы диагностики процессов окисления в печи периодического действия:
 1 – камера печи; 2 – участок газохода от камеры печи до рекуператора; 3 – рекуператор;
 4, 5 – расходомеры по топливу и воздуху соответственно; 6, 7 – термопары для измерения температуры холодного и нагретого воздуха соответственно; 8, 9 – термопары для измерения температуры продуктов сгорания до и после рекуператора соответственно;
 10, 11 – датчики концентрации кислорода в районе пламенного окна и перед рекуператором соответственно

воздуха на входе и выходе из рекуператора, °С; t_{nc}^{ex} , $t_{nc}^{ввх}$ – температуры продуктов сгорания на входе и выходе из рекуператора, °С; $C_{O_2}^o$, $C_{O_2}^p$ – концентрации кислорода в продуктах сгорания в районе пламенного окна и перед рекуператором, %; $V_{под}^m$, $V_{под}^e$ – расход воздуха, подсосываемого в топку и газоход, м³/с; $V_{ок}^{O_2}$ – расход кислорода, идущего на окисление металла, м³/с; c_e – теплоемкость воздуха, идущего на горение, Дж/(м³·К); $C_i^{ком}$ – объемная концентрация i -го компонента газовой среды перед рекуператором; $c_i^{ком}$ – теплоемкость i -го компонента газовой среды при средней температуре его пребывания в рекуператоре, Дж/(м³·К); $C_{O_2}^{nc}$ – объемная концентрация кислорода в продуктах сгорания, определяемая на основании стандартных подходов теории горения топлива; $C_{O_2}^{ea}$ – объемная концентрация кислорода в атмосферном воздухе; V_{nc} – удельный выход продуктов сгорания, м³/м³.

Значения концентраций компонентов продуктов сгорания перед рекуператором для уравнения (1) определяются при помощи следующих выражений:

$$C_{CO_2}^{ком} = \frac{V_m \cdot V_{nc} \cdot C_{CO_2}^{nc}}{V_m \cdot V_{nc} + V_{под}^m + V_{под}^e - V_{ок}^{O_2}},$$

$$C_{H_2O}^{ком} = \frac{V_m \cdot V_{nc} \cdot C_{H_2O}^{nc} + 0,00124 \cdot (V_{под}^m + V_{под}^e) \cdot d_v}{V_m \cdot V_{nc} + V_{под}^m + V_{под}^e - V_{ок}^{O_2}},$$

$$C_{O_2}^{ком} = \frac{V_m \cdot V_{nc} \cdot C_{O_2}^{nc} + V_{под}^m \cdot C_{O_2}^{ea} + V_{под}^e \cdot C_{O_2}^{ea} - V_{ок}^{O_2}}{V_m \cdot V_{nc} + V_{под}^m + V_{под}^e - V_{ок}^{O_2}},$$

$$C_{N_2}^{ком} = \frac{V_m \cdot V_{nc} \cdot C_{N_2}^{nc} + V_{под}^m \cdot C_{N_2}^{ea} + V_{под}^e \cdot C_{N_2}^{ea}}{V_m \cdot V_{nc} + V_{под}^m + V_{под}^e - V_{ок}^{O_2}},$$

где d_v – абсолютное влагосодержание воздуха, г/м³; $C_{O_2}^{nc}$, $C_{H_2O}^{nc}$, $C_{CO_2}^{nc}$, $C_{N_2}^{nc}$ – объемные концентрации углекислоты, водяных паров, кислорода и азота в продуктах сгорания, определяемые на основании стандартных подходов теории горения топлива.

В рамках рассматриваемой системы диагностики входными величинами являются: V_m , V_e , t_e^{ex} , $t_e^{ввх}$, t_{nc}^{ex} , $t_{nc}^{ввх}$, $C_{O_2}^o$, $C_{O_2}^p$. Результаты представлены следующими величинами: $V_{под}^m$, $V_{под}^e$, $V_{ок}^{O_2}$.

Оценка параметрической чувствительности проводилась следующим образом. Для каждого из аргументов поочередно проводятся численные эксперименты с искусственно внесенными типовыми погрешностями (значения остальных аргументов остаются на базовом уровне).

Полученные результаты искомым величинам сравниваются со своими базовыми значениями, на основании чего выносятся суждения о влиянии погрешности того или иного аргумента на результаты работы системы диагностики.

Для исследования был принят следующий базовый набор исходных данных: $V_{nc}=12,197$ м³/м³; $V_d=11,197$ м³/м³; $CH_4=100$ %; $ko_2=0,21$; $\alpha=1,15$; $d_{v1}=18$ г/м³; $V_m=0,8$ м³/с; $V_e=11,197$ м³/м³; $t_e^{ex}=20$; $t_e^{ввх}=320$; $t_{nc}^{ex}=750$ °С; $t_{nc}^{ввх}=490$ °С; $C_{O_2}^o=1,8\%$; $C_{O_2}^p=4$ %; $V_{под}^m=0,66$ м³/м³; $V_{под}^e=1,36$ м³/м³; $V_{ок}^{O_2}=0,191$ м³/м³; ko_2 – коэффициент содержания кислорода; α – коэффициент расхода воздуха; CH_4 – состав газа, %; V_{nc} – удельный расход продуктов сгорания, м³/м³.

Базовому набору исходных данных соответствует следующий вектор результатов: $V_{под}^m=0,66$ м³/м³; $V_{под}^e=1,36$ м³/м³; $V_{ок}^{O_2}=0,191$ м³/м³.

Анализ уравнения (1) системы показал, что погрешности определения расхода воздуха и подъема его температуры в рекуператоре оказывают одинаковое влияние на результаты решения системы, поскольку присутствуют только в числителе правой части уравнения как равноправные множители. Что касается температур продуктов сгорания в рекуператоре, то они влияют только лишь на значения теплоемкости продуктов сгорания. Поскольку данные зависимости не являются ярко выраженными, обычные для практики погрешности измерения температур не оказывают ощутимого влияния на результаты работы системы диагностики. По этой причине влияние погрешности определения t_{nc}^{ex} и $t_{nc}^{ввх}$ не рассматривалось.

С учетом классов точности приборов, которые могут быть использованы для измерения соответствующих величин аргументов, для концентраций кислорода рассматриваются погрешности до 5 %, а для расходов топлива и воздуха до 1 %.

Результаты исследования приведены в табл. 1...4.

Погрешность определения $C_{O_2}^o$ совершенно не влияет на расход кислорода на окисление металла, но оказывает умеренное влияние на текущее значение подсоса воздуха в топку и на участок газохода от пламенного окна до рекуператора. При этом для $V_{под}^m$ знак отклонения совпа-

дает со знаком погрешности $C_{O_2}^o$, а для $V_{под}^e$ они противоположны.

Погрешность определения $C_{O_2}^p$ оказывает сравнительно небольшое влияние на величину подсоса кислорода на участке от пламенного окна до рекуператора, влияет на расход кислорода на окисление и оказывает особо значительное влияние на величину подсоса воздуха в топку. При этом знак погрешности $C_{O_2}^p$ совпадает со

знаком отклонения $V_{под}^e$ и противоположен знакам отклонения $V_{под}^m$ и $V_{ок}^{O_2}$.

Погрешность определения V_m оказывает незначительное влияние на участок газохода от пламенного окна до рекуператора, но при этом очень существенно влияет на расход кислорода на окисление металла и, в особенности, на подсос воздуха в топку. При этом знаки погрешности V_m и отклонений $V_{под}^m$ и $V_{ок}^{O_2}$ противоположны.

Табл. 1. Влияние погрешности определения концентрации кислорода в продуктах сгорания в районе пламенного окна на результаты диагностики

Расход		Погрешность измерения концентрации кислорода				
		(+1 %)	(+2 %)	(+3 %)	(+4 %)	(+5 %)
$V_{под}^m$	абс. значение	0,669	0,679	0,689	0,699	0,709
	отн. погрешность	1	2	4	5	6
$V_{под}^e$	абс. значение	1,35	1,34	1,331	1,321	1,311
	отн. погрешность	-0,7	-1	-2	-2	-3
$V_{ок}^{O_2}$	абс. значение	0,191	0,191	0,191	0,191	0,191
	отн. погрешность	0	0	0	0	0

Табл. 2. Влияние погрешности определения концентрации кислорода в продуктах сгорания в районе рекуператора на результаты диагностики

Расход		Погрешности измерения концентрации кислорода				
		(+1 %)	(+2 %)	(+3 %)	(+4 %)	(+5 %)
$V_{под}^m$	абс. значение	0,629	0,598	0,567	0,536	0,506
	отн. погрешность	-4	-10	-16	-18	-30
$V_{под}^e$	абс. значение	1,385	1,409	1,434	1,459	1,484
	отн. погрешность	1	3	5	7	8
$V_{ок}^{O_2}$	абс. значение	0,186	0,18	0,174	0,168	0,162
	отн. погрешность	-2	-6	-9	-12	-17

Табл. 3. Влияние погрешности определения расхода топлива на результаты диагностики

Расход		Погрешности измерения расхода топлива				
		(+0,2 %)	(+0,4 %)	(+0,6 %)	(+0,8 %)	(+1,0 %)
$V_{под}^m$	абс. значение	0,634	0,608	0,583	0,557	0,532
	отн. погрешность	-4	-8	-13	-18	-24
$V_{под}^e$	абс. значение	1,36	1,36	1,36	1,359	1,359
	отн. погрешность	0	0	0	0,07	0,07
$V_{ок}^{O_2}$	абс. значение	0,187	0,182	0,177	0,172	0,168
	отн. погрешность	-2	-5	-7	-11	-13

Табл. 4. Влияние погрешности определения расхода воздуха и повышения температуры воздуха в рекуператоре на результаты диагностики

Расход		Погрешности измерения исходных величин				
		(+0,2 %)	(+0,4 %)	(+0,6 %)	(+0,8 %)	(+1,0 %)
$V_{под}^m$	абс. значение	0,686	0,713	0,74	0,767	0,794
	отн. погрешность	3	7	10	13	16
$V_{под}^e$	абс. значение	1,363	1,366	1,369	1,372	1,375
	отн. погрешность	0,2	0,4	0,7	0,9	1
$V_{ок}^{O_2}$	абс. значение	0,197	0,202	0,207	0,212	0,217
	отн. погрешность	3	5	7	9	11

Погрешность определения V_6 или $(t_6^{6yx} - t_6^{6x})$ оказывает особо значительное влияние на текущее значение подсоса воздуха в топку и текущий расход кислорода на окисление металла, а на участке газохода от пламенного окна до рекуператора наблюдаются незначительные изменения. При этом знаки погрешности определения величин-аргументов и всех искомых величин совпадают.

Выводы

Исследована параметрическая чувствительность системы диагностики окалинообразования металла в печи, базирующейся на обратном методе решения. Установлены закономерности влияния погрешности определения таких величин-аргументов как концентрации кислорода в районе пламенного окна и рекуператора, расход топлива, расход воздуха, повышение температуры воздуха на следующие искомые величины: расход воздуха, подсасываемого в топку; расход воздуха, подсасываемого на участке газохода от пламенного окна до рекуператора; расход кислорода на окисление металла. Полученные результаты важны для выбора классов точности приборов, измеряющих значения входных величин, при которых будут получены приемлемые погрешности определения искомых величин. Для измерений концентрации кислорода приемлемыми можно считать погрешности до 5 %. При измерении расходов топлива и воздуха целесообразно работать с погрешностями не более 0,5 %.

Список литературы

1. Raudenský, M. Impact of oxide scale on heat treatment of steels / M. Raudenský, M. Chabičovský, J. Hrabovský // May 21st-23rd International conference on metallurgy and materials 2014, Brno, Czech Republic, EU: materials conf. – Brno, 2014. – P. 240-247.

2. Cao, G.M. Morphology of oxide scale and oxidation kinetics of low carbon steel / G.M. Cao [et al.] // ISU International. – 2014. – Vol.21. – P. 335-341.

3. Takeda, M. Oxidation behavior and scale properties on the Si containing steels / M. Takeda, T. Onishi // Mater. Sci. Forum. August 15, 2006, Zurich, Switzerland. – 2006. – Vol.522. – P. 477-488.

4. Garnaud, G. Thickness of the oxide layers formed during the oxidation of iron / G. Garnaud, R.A. Rapp // Oxid. Met. – 1977. – Vol.11. – P.193-198.

5. Диагностика процесса окисления металла в пламенных печах / А.Б. Бирюков, Е.В. Новикова, Т.Г. Олешкевич и др. // Metallургические печи. – 2014. – Вып.6(21). – С. 3-11.

6. Suarez, L. High-temperature oxidation of Fe-Si alloys in the temperature range 900-1250 °C / L.Suarez, J.Schneider, Y.Houbaert // July 4th-7th, 2007 Defect. Diffus. Forum. Algarve, Portugal. – 2008. – Vol.273-276. – P.661-666.

7. Матрюков, Б.С. Теплофизика металлургических процессов / Б.С. Матрюков, Г.С. Сборщиков. – М.: Металлургия, 1996. – 268 с.

8. Современные подходы к диагностике процессов тепловой обработки металла в печах / А.Б. Бирюков, С.М. Сафьянц, А.А. Иванова и др. // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2015. – №1. – С. 50-55.

9. Математическое моделирование процессов тепловой обработки металла в печах с учетом окалинообразования / А.Б. Бирюков, С.И. Гинкул, П.А. Гнигитиев и др. // Сталь. – 2016. – №8. – С. 85-90.

10. Диагностика процесса образования окалины при высокотемпературном нагреве стальной заготовки / А.Б. Бирюков, Ю.Л. Курбатов, Е.В. Новикова и др. // Черная металлургия. – 2017. – №11(1415). – С. 65-72.

A.B. Biryukov /Dr. Sci. (Eng.), I.K. Kolba
 Donetsk National Technical University (Donetsk)

EVALUATION OF PARAMETRIC SENSITIVITY OF THE METAL OXIDATION DIAGNOSTICS SYSTEM

Background. Various diagnostics systems can be used to quickly predict the loss of metal with scale during its heat treatment in the furnace. A diagnostics system is known based on the inverse method, the advantages of which are simplicity and rather low requirements for the power of computing resources. The objective of this paper is to study the parametric sensitivity of this diagnostic system.
Materials and/or methods. The research method consists in the fact that for each of the input values of the diagnostics system, numerical experiments carried out alternately with artificially introduced standard errors (the values of the other arguments remain at the basic level). The results of the ob-

tained values compared with their basic values, and on this basis, a judgment made about the influence of the error of an argument on the results of the diagnostics system.

Results. Investigated the influence on the metal oxidation of such arguments as the oxygen concentration in the combustion products in the area of the frame window and in the area of the recuperator, fuel consumption, air consumption, the rise of the air temperature in the recuperator to the desired values: consumption of the air sucked into the furnace, consumption of the air sucked into the gas flue in the area from the flame window to the recuperator, the oxygen consumption.

Conclusion. The results obtained are important for the selection of accuracy classes of devices that measure input values, at which acceptable errors in determining the desired values obtained. Errors of up to 5 % can be considered acceptable for oxygen concentration measurements. When measuring fuel and air consumption, it is advisable to work with errors of not more than 0.5 %.

Keywords: metal heating, scaling, metal loss, diagnostics system, measurement error.

Сведения об авторах

А.Б. Бирюков

SPIN-код: 3186-0680
 Author ID: 7006918782
 ORCID iD: 0000-0002-8146-2017
 Телефон: +380 (50) 260-97-75
 Эл. почта: birukov.ttf@gmail.com

И.К. Кольба

Телефон: +380 (71) 349-42-91
 Эл. почта: irishka_kolba@mail.ru

Статья поступила 28.09.2018 г.

© А.Б. Бирюков, И.К. Кольба, 2018

Рецензент д.т.н., проф. С.П. Ерньоко

