

## ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

*А.Л. Чайка, к.т.н., ст. научный сотрудник*  
*А.А. Сохацкий, к.т.н., ст. научный сотрудник*  
*А.А. Москалина, инженер*

Институт черной металлургии НАН Украины (Днепропетровск, Украина)

**Аннотация.** На основании опытно-расчетных данных, проведенных эксергетическим методом анализа, установлено, что способ улучшения показателей плавки доменной печи (повышения расхода пылеугольного топлива) имеет резервы повышения эффективности. Перспективно проводить разработки по совершенствованию этого режима плавки с учетом эксергетических показателей.

**Ключевые слова:** эксергетический анализ, доменная плавка, пылеугольное топливо.

*E-MAIL:* chaykadp@gmail.com

В связи с освоением пылеугольного топлива в доменном производстве актуальным является оценка эффективности этой технологии не только с точки зрения технико-экономических показателей, но и термодинамического совершенства доменного процесса и загрязнения окружающей среды.

Эксергетический баланс доменной печи базируется на материальном и тепловом балансах, он дополняет их и позволяет определить меру термодинамического совершенства производства чугуна в доменной печи и в сравнении с альтернативными способами получения чугуна разрабатывать пути уменьшения энергоемкости металлопродукции и загрязнения окружающей среды [1, 2].

Основополагающая идея эксергетического метода анализа заключается во введении наряду с фундаментальным понятием энергии дополнительного показателя – эксергии, учитывающего тот факт, что энергия, в зависимости от внешних условий, может иметь разную ценность («качество» энергии) для практического использования. Среди разнообразных видов эксергии в инженерных теплотехнологических расчетах чаще других используют физическую и химическую эксергии вещества [1]. Физическая эксергия состоит из двух составляющих: изотермической, учитывающей давление, и изобарной, являющейся следствием отличия температуры вещества от состояния окружающей среды [1]. Химическая эксергия также включает в себя две составляющие: реакцию, связанную с химическими реакциями, и концентрационную, определяемую концентрацией этого вещества в смеси (растворе) [3].

В общем виде эксергетический баланс доменной печи имеет следующий вид [1]:

$$Ex_{\text{прих}} = Ex_{\text{расх}} + \Delta Ex_{\text{пот}},$$

где  $Ex_{\text{прих}}$  и  $Ex_{\text{расх}}$  – общее количество подведенной и расходуемой эксергии, МДж/т чугуна;  $\Delta Ex_{\text{пот}}$  – потери эксергии, МДж/т чугуна.

Общее количество подведенной эксергии определяется по формуле

$$Ex_{\text{прих}} = Ex_{\text{дуть.ф}} + Ex_{\text{п.г.ф}} + Ex_{\text{к.х}} + Ex_{\text{р.х}} + Ex_{\text{п.г.х}} + Ex_{\text{пут.х}},$$

где  $Ex_{\text{дуть.ф}}$  и  $Ex_{\text{п.г.ф}}$  – физическая эксергия дутья и природного газа;  $Ex_{\text{к.х}}$ ,  $Ex_{\text{р.х}}$ ,  $Ex_{\text{п.г.х}}$  и  $Ex_{\text{пут.х}}$  – химические эксергии кокса, железорудных материалов, природного газа и пылеугольного топлива.

Общее количество расходуемой эксергии можно представить следующим образом:

$$Ex_{\text{расх}} = Ex_{\text{чуг.ф}} + Ex_{\text{чуг.х}} + Ex_{\text{шл.ф}} + Ex_{\text{шл.х}} + Ex_{\text{к.г.ф}} + Ex_{\text{к.г.х}},$$

где  $Ex_{\text{чуг.ф}}$ ,  $Ex_{\text{шл.ф}}$  и  $Ex_{\text{к.г.ф}}$  – физические эксергии чугуна, шлака и колошниковога газа;  $Ex_{\text{чуг.х}}$ ,  $Ex_{\text{шл.х}}$  и  $Ex_{\text{к.г.х}}$  – химические эксергии чугуна, шлака и колошниковога газа.

Отношение расходуемой эксергии в доменной печи к общему количеству подведенной эксергии позволяет оценить термодинамическое совершенство доменного процесса [1].

В таблице приведены результаты расчета, выполненные эксергетическим методом [1], для ДП № 1 ПАО «АМК» объемом 3000 м<sup>3</sup> по данным ее работы в 2011 году [4].

Расчеты показали, что замена природного газа пылеугольным топливом (ПУТ) в доменной печи наряду с экономией кокса привела к увеличению разности

## Эксергетический анализ ДП № 1 ПАО «АМК»

Показатель	Значение показателя по периодам					
	I	II			III	
		Фактическое			Прогнозное	
Производительность, т/ч	224	222	250	253	269	271
Тепловая мощность домы, МВт	620	631	688	706	706	753
Тепловые потери, МВт	19	20,3	19,7	26	26	26
Температура дутья, °С	1111	1119	1162	1101	1300	1150
Содержание кислорода в дутье, %	25,0	26,4	27,5	27,2	27,2	29,0
Расходы энергетических ресурсов на 1 т чугуна:						
сухого кокса, кг	459	437	416	396	345	358
природного газа, м <sup>3</sup>	84	69	37	3	0	0
пылеугольного топлива, кг	0	50	105	154	200	200
условного топлива, кг	559	576	577	572	570	584
дутья, м <sup>3</sup>	1121	1093	1013	1040	970	966
кислорода, м <sup>3</sup>	55	72	81	80	77	98
Выход шлака, кг/т чугуна	394	428	434	396	396	396
Степень использования CO, %	45,4	44,4	44,1	44,7	44,7	44,7
Степень прямого восстановления железа <i>rd</i> по Павлову, %	32,0	35,2	41,8	46,4	50,1	47,4
Выход колошникового газа, кг у.т./т чугуна	206	210	199	190	182	188
Эксергия прихода, МДж/т чугуна	18 234	18 699	18 669	18 412	18 729	18 712
Физическая эксергия, МДж/т чугуна:						
дутья	1127	1110	1083	1032	1200	1013
Химическая эксергия, МДж/т чугуна:						
кокса	13 132	12 505	11 900	11 330	9867	10 245
железорудного материала	877	900	894	862	862	862
природного газа	3072	2524	1341	125	0	0
пылеугольного топлива	0	1659	3451	5063	6578	6577
Эксергия расхода, МДж/т чугуна	16 642	16 793	16 365	15 964	15 714	15 852
Эксергия чугуна, МДж/т чугуна	<u>787</u>	<u>787</u>	<u>787</u>	<u>787</u>	<u>787</u>	<u>787</u>
	7992	7992	7980	7988	7988	7988
Эксергия шлака, МДж/т чугуна	<u>917</u>	<u>996</u>	<u>1010</u>	<u>921</u>	<u>921</u>	<u>921</u>
	245	266	269	246	246	246
Эксергия колошникового газа, МДж/т чугуна	<u>1104</u>	<u>1064</u>	<u>954</u>	<u>953</u>	<u>893</u>	<u>890</u>
	5598	5698	5366	5070	4879	5021
Потери эксергии, МДж/т чугуна	1592	1906	2304	2448	3015	2860
Термодинамическое совершенство доменного процесса, %	91,3	89,8	87,7	86,7	83,9	84,7

Примечание. Числитель и знаменатель – физическая и химическая эксергии.

прихода эксергии к ее расходу, т.е. увеличению потерь эксергии. Уменьшить эту разницу позволяет эффективная организация работы доменной печи с использованием ПУТ, например совместное применение последнего с природным газом при использовании железорудных материалов и кокса нестабильного состава и качества, увеличение содержания углерода в пылеугольном топливе, уменьшение внешних потерь теплоты, сокращение внутренних потерь эксергии в процессах тепло-

массообмена в рабочем пространстве печи и оптимизации технологического процесса работы доменной печи.

Таким образом, эксергетический метод анализа на базе построения полных энергетических балансов позволяет оценить потенциал и резервы экономии энергии металлургического предприятия в целом, что актуально в условиях энергосбережения.

Авторы благодарят д.т.н. А.В. Бородулина за постановку задачи.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Бородулин А.В., Варивода О.И., Ковтун А.Ф., Хенкин Б.М. Эксергетический анализ работы доменной печи на комбинированном дутье. – М., 1990. 46 с. Деп. в Черметинформ 30.11.89, № 5296 – 4 М 89.
2. Степанов В.С., Степанова Т.Б. Эффективность использования энергии. – Новосибирск: ВО «Наука». Сибирская издательская фирма, 1994. – 257 с.

3. Бродянский В.М., Фратшер В., Михалек К. Эксергетический метод и его приложения. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 288 с.
4. Большаков В.И., Чайка А.Л., Лебедь В.В. и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2012. № 4. С. 36 – 40.

© 2014 г. А.Л. Чайка, А.А. Сохацкий, А.А. Москалина  
Поступила 4 июня 2013 г.

**EXERGIC ANALYSIS OF BLAST FURNACE SMELTING WITH THE USE OF PULVERIZED COAL**

*A.L. Chayka, Cand. Eng., Senior researcher*  
*A.A. Sokhatsky, Cand. Eng., Research Associate*  
*A.A. Moskalina, Engineer*

Steel Institute NAS of Ukraine (Dnepropetrovsk, Ukraine)

E-MAIL: chaykadp@gmail.com

**Abstract.** On the basis of experienced-calculation data, conducted by the exergic method of analysis, it is set up that the improvement method of blast furnace melting indexes – increased flow rate of pulverized coal – has an efficiency up-grading reserve. Furthermore, it makes it possible to conduct prospectively the development of the melting mode, taking into account the exergic indexes.

**Keywords:** exergic analysis, blast furnace smelting, pulverized coal.

**REFERENCES**

1. Borodulin A.V., Varivoda O.I., Kovtun A.F., Khenkin B.M. *Eksergeticheskiy analiz raboti domennoy pechi na kombinirovannom dute* (Exergic analysis of blast furnace on the combined blast). Moscow, 1990. 46 p. Dep. v Chermetinform 30.11.89, № 5296 – 4 M 89.
2. Stepanov V.S., Stepanova T.B. *Effektivnost' ispol'zovaniya energii*. (The energy efficiency). Novosibirsk: VO «Nauka». Sibirskaya izdatelskaya firma, 1994. 257 p.
3. Brodyanskiy V.M., Fratsher V., Mikhalek K. *Eksergeticheskiy metod i ego prilozheniya* (Exergic method and its application). Moscow: Energoatomizdat, 1988. 288 p.
4. Bol'shakov V.I., Chayka A.L., Lebed' V.V. etc. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promishlennost'*. 2012. № 4. Pp. 36 – 40.

Received June 4, 2013