

В.И.Большаков, А.Л.Чайка, А.А.Сохацкий, А.А.Москалина

ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ТОПЛИВА

Целью работы является оценка термодинамического совершенства доменного процесса при применении пылеугольного топлива. Исследования эксергетическим методом показано, что эффективность и термодинамическое совершенство доменной плавки при замене природного газа пылеугольным топливом определяется не только уменьшением расхода кокса и ростом производительности печи. Следует также учитывать параметры и состав колошникового газа и продуктов плавки, экологические аспекты производства и влияние пылеугольного топлива на энергетический баланс металлургического предприятия.

доменный процесс, пылеугольное топливо, эксэргия, производительность, расход кокса

Введение. В связи с освоением пылеугольного топлива (ПУТ) в доменном производстве на постсоветском пространстве актуальным является оценка эффективности этой технологии не только с точки зрения себестоимости чугуна, но и термодинамического совершенства процесса и загрязнения окружающей среды. Оценка термодинамического совершенства технологических (химических, физических или физико-химических) процессов в энерготехнологических агрегатах имеет важнейшее значение, т. к. чем термодинамически совершеннее процесс, тем меньше энергии (топлива) вводят в агрегат для его осуществления и тем меньше выбросы в окружающую среду.

Методика исследования. Эксергетический баланс доменной печи базируется на материальном и тепловом балансах, он дополняет их и позволяет определить меру термодинамического совершенства производства чугуна в домне 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 для практического использования (качество энергии).

Для оценки термодинамической эффективности работы доменной печи используется понятие эксергии [1,2]. Эксэргия – максимальная работа, которую может совершить термодинамическая система при переходе из данного состояния в состояние равновесия с окружающей средой. Среди разнообразных видов эксергии, в инженерных теплотехнологических расчетах, чаще других используют химическую и физическую эксэргию вещества.

Отношение расходуемой эксергии в доменной печи (эксергия расхода) к общему количеству подведенной эксергии (эксергия прихода) позволяет оценить термодинамическое совершенство доменного процесса (КПД1) [2]:

$$\text{КПД1} = \frac{E_{\text{расх}}}{E_{\text{прих}}} \quad (1)$$

где $E_{\text{прих}}$ – общее количество подведенной эксергии, МДж/т чугу;

$E_{\text{расх}}$ – общее количество расходуемой эксергии, МДж/т чугу.

Технологический КПД (КПД2) – показывает отношение суммы химической и физической эксергий чугуна к количеству подведенной эксергии:

$$\text{КПД2} = \frac{E_{\text{чуг ф}} + E_{\text{чуг х}}}{E_{\text{прих}}} \quad (2)$$

где $E_{\text{чуг ф}}$ – физическая эксергия чугуна, МДж/т чугу;

$E_{\text{чуг х}}$ – химическая эксергия чугуна, МДж/т чугу.

Обобщенный КПД производства чугуна (КПД3) – показывает отношение суммы химической, физической эксергий чугуна с химической эксергией использованного колошникового газа к количеству подведенной эксергии:

$$\text{КПД3} = \frac{E_{\text{чуг ф}} + E_{\text{чуг х}} + \left(\frac{E_{\text{к.г. х}} \cdot E_{\text{Р}}}{\text{KYSL}} \right)}{E_{\text{прих}}} \quad (3)$$

где $E_{\text{к.г. х}}$ – химическая эксергия колошникового газа, МДж/т чугу;

$E_{\text{Р}}$ – выход вторичных энергетических ресурсов (ВЭР) потребителям, кг у.т./т чугу;

KYSL – выход колошникового газа, кг у.т./т чугу.

Изложение основных результатов исследований. Эксергетический анализ фактических периодов работы ДП №1 ПАО «АМК» объемом 3000 м³ по данным ее работы в 2011 году [3,4] показал, что термодинамическое совершенство доменного процесса уменьшается при замене природного газа пылеугольным топливом (таблица).

В таблице отмечены три периода, два фактических и один прогнозный. Первый период (I) – фактический с дутьем, содержащим 25,0 % кислорода и расходом природного газа 84 м³/т чугуна, пылеугольное топливо – не применяется. Второй период (II) – фактический с последовательным уменьшением природного газа с 69 до 3 м³/т чугуна и увеличением пылеугольного топлива с 50 до 154 кг/т чугуна. Третий период (III) – прогнозный с максимальным расходом ПУТ без природного газа.

Результаты расчета показали, что с увеличением расхода ПУТ и одновременным уменьшением вдувания природного газа потери эксергии увеличиваются (рисунок).

Таблица. Эксергетический баланс ДП №1 ПАО «АМК»

Показатели	фактические периоды				прогноз		
	I		II		III		
	1	2	3	4	5	6	7
Производительность, т/час	224	222	250	253	269	271	262
Тепловая мощность домы, МВт	620	631	688	706	706	753	698
Усвоенная мощность в нижней ступени теплообмена (Н.С.Т.), МВт	169	173	203	210	225	224	213
Тепловые потери, МВт	19	20,3	19,7	26	26	26	23,5
Температура дутья, °С	1111	1119	1162	1101	1300	1150	1200
Содержание кислорода в дутье, %	25,0	26,4	27,5	27,2	27,2	29,0	27,0
Расходы энергетических ресурсов на 1 т чугуна:							
сухого кокса, кг	459	437	416	396	345	358	324
природного газа, м ³	84	69	37	3	0	0	0
пылеугольного топлива, кг	0	50	105	154	200	200	200
условного топлива, кг	559	576	577	572	570	584	557
дутья, м ³	1121	1093	1013	1040	970	966	995
кислорода, м ³	55	72	81	80	77	98	76
Содержание углерода в ПУТ, %	-	80,1	76,4	75,6	75,6	75,6	80,6
Выход шлака, кг/т чугуна	394	428	434	396	396	396	408
Коэффициент использования теплоты топлива (КИТ) углерода кокса Н.С.Т.	0,357	0,356	0,362	0,352	0,385	0,358	0,369
КИТ углерода пылеугольного топлива Н.С.Т.	0,286	0,286	0,291	0,282	0,314	0,287	0,298
КИТ углерода природного газа Н.С.Т.	-0,057	-0,057	-0,051	-0,061	-0,030	-0,055	-0,045
Средний КИТ Н.С.Т.	0,294	0,297	0,316	0,323	0,347	0,322	0,329

Показатели	фактические периоды				прогноз			
	Периоды	I		II		III		
	Варианты	1	2	3	4	5	6	7
Выход сухого колошникового газа, м ³ /т чугу. / м ³ /час	1660/ 37184 0	1635/ 36297 0	1534/ 38350 0	1544/ 39063 2	1463/ 39354 7	1465/ 39701 5	1493/ 39124 4	
Теплота сгорания сухого колошникового газа, кДж/м ³	3658	3790	3826	3610	3654	3759	3467	
Выход колошникового газа, кг у.т./т чугу	206,5	210,4	199,4	189,5	182,5	187,8	176,6	
Выход ВЭР потребителям, кг у.т./т чугу	80,3	81,5	74,8	68,0	65,3	69,9	59,9	
Степень использования СО, %	45,4	44,4	44,1	44,7	44,7	44,7	47,7	
Степень прямого восстановления железа <i>rd</i> по Павлову, %	32,0	35,2	41,8	46,4	50,1	47,4	41,0	
Эксергия прихода, МДж/т чугу.:	18234	18699	18669	18412	18729	18712	18026	
Физические эксергии, МДж/т чугу. дутья	1127	1110	1083	1032	1202	1013	1103	
Химические эксергии, МДж/т чугу.:								
кокса	13132	12505	11900	11330	9867	10245	9474	
железоруд. материала	877	900	894	862	862	862	844	
природного газа	3072	2524	1341	125	0	0	0	
пылеугольного топлива	0	1659	3451	5063	6578	6577	6584	
Эксергия расхода, МДж/т чугу.:	16642	16793	16365	15964	15714	15852	15670	
Эксергия чугуна*, МДж/т чугу.	787/ 7992	787/ 7992	787/ 7980	787/ 7988	787/ 7988	787/ 7988	787/ 7988	
Эксергия шлака*, МДж/т чугу.	917/ 245	996/ 266	1010/ 269	921/ 246	921/ 246	921/ 246	949/ 253	
Эксергия колошникового газа*, МДж/т чугу.	1104/ 5598	1064/ 5689	954/ 5366	953/ 5070	893/ 4879	890/ 5020	962/ 4731	
Потери эксергии, МДж/т чугу.	1592	1906	2304	2448	3015	2860	2356	

Продолжение таблицы

Показатели	фактические периоды				прогноз		
	I		II		III		
	1	2	3	4	5	6	7
Термодинамическое совершенство доменного процесса, %	91,3	89,8	87,7	86,7	83,9	84,7	86,9
Технологический КПД, %	48,2	46,9	47,0	47,6	46,8	46,9	48,7
Обобщенный КПД производства чугуна, %	60,1	58,7	57,7	57,5	56,2	56,9	57,6

* - в числителе – физическая эксергия, в знаменателе – химическая.

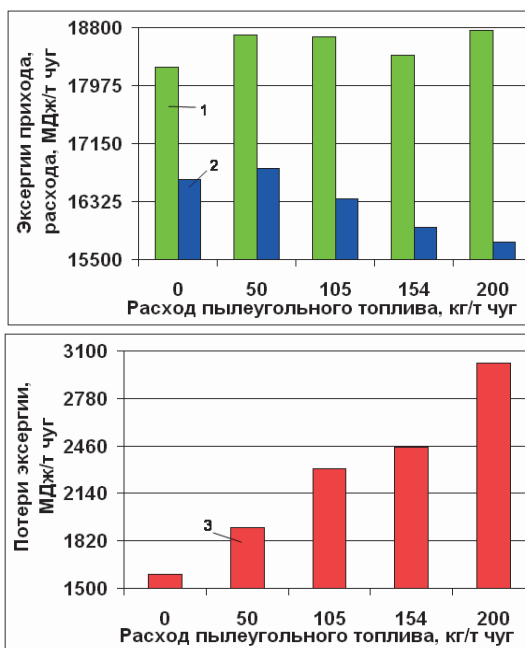


Рисунок. Приход, расход и потери эксергии для ДП №1 ПАО “АМК”. 1 – общее количество подведенной эксергии, МДж/т чугуна; 2 – общее количество расходуемой эксергии, МДж/т чугуна; 3 – потери эксергии, МДж/т чугуна.

Технология применения пылеугольного топлива в сравнении с работой на природном газе требует увеличения удельного расхода кислорода, это увеличивает тепловую мощность печи, а увеличение расхода ПУТ приводит к увеличению замены кокса в сравнении с природным газом, вследствие этого увеличивается приход эксергии. В тоже время расход

эксергии на технологический процесс уменьшается вследствие увеличения интенсивности доменной плавки, увеличения содержания кислорода в дутье, повышения температуры дутья, расхода топливных добавок вдуваемых в горн.

Средняя динамика роста прихода эксергии при замене природного газа ПУТ (+0,34%) не соответствует среднему росту расхода эксергии (–1,36%). Это приводит к увеличению разности прихода эксергии к ее расходу. Уменьшить эту разницу позволяет более эффективная организация работы доменной печи с использованием ПУТ, например, путем его совместного вдувания с природным газом, увеличения содержания углерода в ПУТ, уменьшения внешних тепловых потерь, рациональной организации технологического процесса плавки.

При замене природного газа пылеугольным топливом (фактические периоды) термодинамическое совершенство доменного процесса уменьшилось (с 91,3 до 86,7%) т. к. уменьшилось отношение расходуемой эксергии к подведенной (рис. 1), при этом технико–экономические показатели увеличились (производительность возросла на 13%, удельный расход кокса уменьшился на 14%).

Заключение. Эксергетический анализ эффективности доменной плавки с точки зрения термодинамического совершенства показал неоднозначность увеличения эффективности доменного процесса при замене природного газа пылеугольным топливом только по уменьшению расхода кокса и росту производительности печи без учета параметров и состава колошникового газа, продуктов плавки, экологических аспектов производства и его влияния на энергетический баланс металлургического предприятия. Эксергетические показатели доменной плавки необходимо учитывать при разработке направлений совершенствования работы доменных печей с применением ПУТ.

1. *Степанов В.С., Степанова Т.Б.* Эффективность использования энергии – Новосибирск: Наука СО, 1994. – 256 с.
2. *Эксергетический анализ работы доменной печи на комбинированном дутье.* /А.В.Бородулин, О.И.Варивода, А.Ф.Ковтун, Б.М.Хенкин// - Деп. в Черметинформ. 30.11.89. № 5296–4 М 89. 46 с. РЖМеталлургия. 1990. ЗВ178 Деп.
3. *Освоение работы доменной печи, полезным объемом 3000 м³, с применением пылеугольного топлива* / В.И.Большаков, А.Л.Чайка, В.В.Лебедь, Т.Г.Шевченко, Р.В.Авдеев // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2012. – №4. – С. 36-40.
4. *Проблемы и политика энергосбережения на Западно – Сибирском металлургическом комбинате* / Р.С.Айзатулов, А.В.Бородулин, В.С.Степанов и др. // Сталь. – 1997. – №8. – С. 70-77.

*Статья рекомендована к печати
докт. техн. наук И.Г.Муравьевой*

В.І.Большаков, А.Л.Чайка, А.А.Сохацький, А.А.Москаліна

Ексергетичний аналіз доменної плавки при застосуванні різноманітних видів палива

Метою роботи є оцінка термодинамічної досконалості доменного процесу при застосуванні пиловугільного палива. Дослідженням ексергетичним методом показано, що ефективність і термодинамічна досконалість доменної плавки при заміні природного газу пиловугільним паливом визначається не тільки зменшенням витрат коксу і зростанням продуктивності печі. Слід також враховувати параметри та склад колошникового газу і продуктів плавки, екологічні аспекти виробництва та вплив пиловугільного палива на енергетичний баланс металургійного підприємства.