

В.Г. Аносов, доцент, к.т.н.

Д.Ю. Дядя, магистрант

Д.А. Лаптев, магистрант

О.А. Позднякова, ст. преподаватель

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ ПРИ ЗАМЕНЕ ПРИРОДНОГО ГАЗА ПЫЛЕУГОЛЬНЫМ ТОПЛИВОМ

Запорожская государственная инженерная академия

Виконано розрахунковий аналіз змінювання технології доменної плавки під час заміни природного газу на пиловугільне паливо (ПУТ) на доменних печах ВАТ «Металургійний комбінат «Запоріжсталь» з метою визначення теплового стану доменних печей та його оптимізації.

Выполнен расчетный анализ изменения технологии доменной плавки при замене природного газа пылеугольным топливом (ПУТ) на доменных печах ОАО «Металлургический комбинат «Запорожсталь» с целью определения теплового состояния доменных печей и его оптимизации.

Введение. Применение природного газа в доменной технологии становится проблематичным в связи с приближением его стоимости к цене кокса, поэтому в мире быстрыми темпами возрастает использование более дешевого пылеугольного топлива (ПУТ).

Главным преимуществом ПУТ является использование некоксуемых углей при коэффициенте замены дефицитного кокса, близком к единице. Кроме того, вследствие незначительной теплоты разложения летучих составляющих углей (менее 1,5 МДж/кг) и небольшого объема горновых газов (1,5 м³/кг угля) можно сжигать углей больше, чем природного газа или мазута при одинаковой теоретической (адиабатической) температуре горения [1].

Еще в 70-х годах прошлого столетия эта технология была опробована на ряде заводов СССР. Уже тогда был достигнут расход ПУТ до 120 кг/т чугуна и получены коэффициенты замены кокса до 0,7 кг/кг ПУТ, а в настоящее время на зарубежных доменных печах достигнуты расходы ПУТ до 230 кг/т чугуна и коэффициенты замены кокса (КЗ) до 1,1 кг кокса на кг ПУТ.

В 2012-2013 г.г. [2] реализация ПУТ-технологии с расходом 120 кг ПУТ/т чугуна возможна уже на восьми металлургических предприятиях Украины. Результат – экономия природного газа по сравнению с 2004 г. на 80 % (на 2,2 млрд. м³ в год), а кокса – на 2,5 млн. тонн в год. Расходы же на производство чугуна (в ценах 2007 г.) в среднем по отрасли сократятся на 1,8 млрд. гривен.

Анализ достижений. В доменной технологии все активнее применяются различные топливные добавки, являющиеся заменителями самого дорогого топлива – кокса. А в последнее десятилетие активнее других разрабатывается технология использования пылеугольного топлива (ПУТ) ввиду его большей доступности и минимальной стоимости при сравнительно высокой калорийности. В табл. 1 приведена сравнительная характеристика различных видов доменного топлива зарубежных заводов.

Таблица 1 – Сравнительная характеристика различных видов топлив доменной плавки

	Кокс	Ма- зут	Природ- ный газ	Пылеугольное топливо:			
				антра- цит	жир- ный	газо- вый	пламен- ный
Теплота, выделяемая в горне, МДж/кг (м ³)	35,00	25,30	2,80	31,50	28,50	27,50	22,30
Коэффициент замены кокса, кг/кг (м ³)	-	1,20	0,80	1,00	0,90	0,85	0,81
C/H, кг/кг	17,00	8,00	3,10	32,30	20,30	17,00	16,00
Объем продуктов горения, м ³ /кг (м ³)	1,68	2,87	4,20	1,92	2,01	2,06	1,97

Из табл. 1 следует, что максимальный коэффициент замены кокса имеет антрацит, который содержит 90 % углерода. По мере увеличения содержания в угле летучих содержание углерода снижается и пропорционально ему уменьшается количество теплоты, вносимое в горн, что сопровождается уменьшением величины коэффициента замены кокса. Таким образом, применение тех или иных углей в составе ПУТ будет оказывать различное влияние на тепловое состояние доменной печи, которое потребует разных компенсирующих воздействий для сохранения теплового состояния горна.

Тепловое состояние доменной печи – это совокупность распределенных параметров состояния процесса, характеризующих тепловые явления в печи и управляющих воздействий, определяющих эти явления.

Цель сохранения теплового состояния сводится к достижению устойчивого теплового режима печи поддержанием параметров на уровне, обеспечивающем получение чугуна с минимальными отклонениями от заданного состава при использовании резервов процесса.

Тепловое состояние доменной печи в целом определяет нижняя зона и, в первую очередь, горн печи, куда поступает первичная теплота в виде горячего дутья, которая обеспечивает сгорание углерода нагретого кокса и холодных его заменителей – природного газа, ПУТ и др.

В настоящее время главным контрольным показателем нагрева горна, служащим основным ориентиром для обслуживающего персонала, является теоретическая (адиабатическая) температура горения (T_z , °C), которую постоянно рассчитывают на каждой доменной печи. Ее величину определяют с использованием формулы:

$$T_z = \frac{W_c + C_k \cdot \tau_k + V'_d \cdot [(C_d + \varphi \cdot C_{H_2O}) \cdot \tau_d - W_{H_2O} \cdot \varphi] + S \cdot (W_s + C_s \cdot \tau_s + \bar{V}_d \cdot C_o \cdot \tau_d)}{C_o \cdot V_z}, \quad (1)$$

где W_c – теплота горения углерода кокса до его оксида, кДж/кг C_ϕ ; W_{H_2O} – теплота разложения влаги дутья, кДж/м³ H_2O ; W_s – теплота горения дополнительного топлива у фурм, кДж/м³(кг); C_k – теплоемкость углерода кокса, поступающего в зону горения, кДж/(кг·°C); C_s – теплоемкость вдуваемого топлива в горн, кДж/(кг·°C); C_d – теплоемкость дутья, кДж/(кг·°C); C_o – теплоемкость горнового (двухатомного) газа, кДж/(кг·°C); V'_d – расход дутья для сжигания углерода кокса, м³/кг C_ϕ ; $\bar{V}_d$ – расход дутья для сжигания дополнительного топлива, м³/кг доп. топлива; V_z – объем горнового газа, м³/кг C_ϕ ; φ – содержание влаги в дутье, м³/м³; S – расход дополнительного топлива, кг (м³)/кг C_ϕ ; t_k – температура кокса перед фурмами, °C; t_d – температура дутья, °C; t_s – температура дополнительного топлива, °C.

На величину T_z , в первую очередь, влияет теплотворная способность заменителя

кокса, его расход и физическая теплота, с которой заменитель кокса поступает в горн. Существенное значение имеют параметры дутья: температура, содержание кислорода и влаги, которые, в свою очередь, определяют его расход и выход горнового газа.

Опыт использования ПУТ показал [3], что угли обладают разным полиморфизмом, поэтому имеют место разные схемы горения. Более полно сгорают угли, содержащие больше летучих составляющих (марок Г и ДП), которые выделяются и воспламеняются уже в полости фурмы, а в образовавшиеся поры проникает кислород и окисляет (сжигает) твердый углерод. Плотные же угли (марок А) имеют более высокую температуру воспламенения, то есть они позже загораются и более крупные частицы не успевают сгорать в окислительной зоне фурменного очага. Для зажигания и интенсивного горения частиц антрацита их необходимо сжигать в потоке технического кислорода, что также увеличит его теплоотдачу.

В природном газе содержание углерода меньше, чем в остальных видах доменного топлива (табл. 1), поэтому он выделяет в 2...3 раза меньше теплоты, чем другие виды топлива. Кроме того, он характеризуется минимальным коэффициентом замены (КЗ). Однако за счет развития непрямого восстановления (за счет водорода) значение КЗ очень близко к газовым и пламенным углям. Угли обладают большей тепловой способностью и меньшим объемом горнового газа, что позволяет сжигать их больше и повышать интенсивность плавки [4]. Большая теплотворная способность ПУТ повышает и приход теплоты в горн, что требует корректировки параметров комбинированного дутья.

Из вышесказанного следует, что для сохранения газодинамического режима печи соотношение расходов сжигаемого угля и замененного им объема природного газа будет больше единицы. Это повлечет большее снижение расхода кокса за счет большего коэффициента замены кокса углем, а также увеличения интенсивности плавки по суммарному углероду. Однако в шихте уменьшится доля кокса, что приведет к ухудшению газопроницаемости и повышению перепадов давления. При этом кокс должен иметь максимальные значения горячей прочности – *CSR* (более 62 %), минимальные значения реакционной способности – *CRI* (менее 28 %) и фракционный состав +(40...80) мм.

Главной задачей новой технологии является разработка технологии замены природного газа пылеугольным топливом, сопровождающаяся сохранением газодинамической устойчивости работы печи и нагрева горна, что позволит получить максимальный коэффициент замены кокса пылеугольным топливом, повысить интенсивность плавки и производительность доменной печи.

Таблица 2 – Базовые показатели работы доменной печи № 3 за август 2010 г.

Наименование показателей	Единицы измерения	Значение
Суточная производительность	т/сутки	2484
Расход кокса сухого	т/т чугуна	499
Интенсивность горения кокса	кг/м ³ сут	820
Содержание в чугуне:		
- серы	%	0,027
- кремния	%	0,82
Основность шлака (CaO/SiO_2)	кг/кг	1,25
Выход шлака	кг/т чугуна	461
Расход влажного дутья	м ³ /мин	2673
Температура дутья	°С	1146
Влажность дутья	г/м ³	12
Температура колошникового газа	°С	353

Расход природного газа	м ³ /т чугуна	92
Содержание кислорода в дутье	%	22,4
Расход агломерата	кг/т чугуна	1775
Расход окатышей	кг/т чугуна	60
Расход железной руды	кг/т чугуна	100
Содержание железа в агломерате	%	54,4
Содержание в агломерате фракции менее 5 мм	%	17,86
Состав колошникового газа:		
- CO ₂	%	
- CO	%	23,30
- H ₂	%	6,08
Степень использования газа	%	39,81

Постановка задачи. Задачей исследования является оптимизация теплового состояния доменной печи при замене 100 м³ природного газа на 150 кг ПУТ в расчете на одну тонну чугуна.

Методика исследования. Работа выполнена расчетным методом с использованием компьютерной программы «Шихта» для условий работы доменной печи № 3 ОАО «Металлургический комбинат «Запорожсталь».

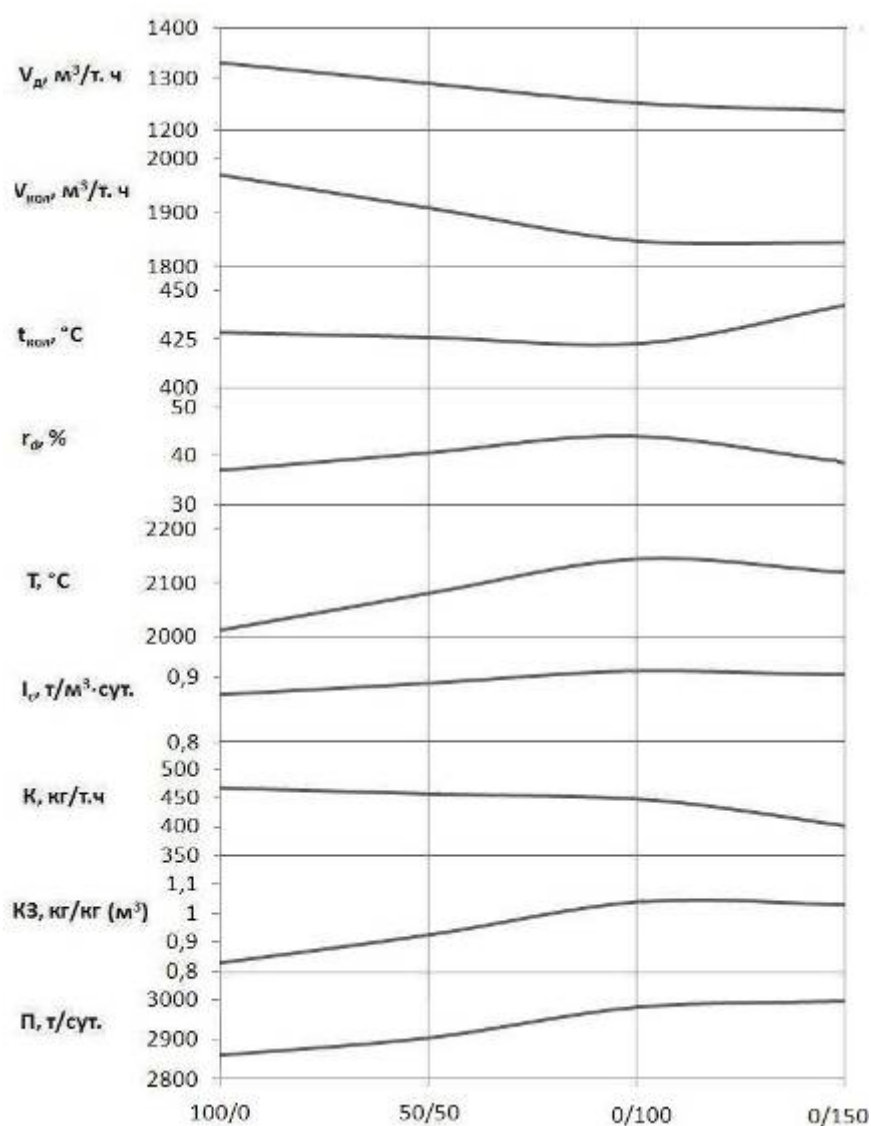


Рисунок 1 – Влияние соотношений расходов природного газа и пылеугольного топлива на

показатели доменной плавки; дутье содержит 23 % O_2 и 1 % H_2O

В качестве базовых показателей взяты данные за август 2010 г., предшествующие вводу в эксплуатацию системы пылеугольного топлива (табл. 2).

Для сравнения выполнили пять вариантов расчета:

- без использования заменителей кокса;
- с расходом природного газа 100 м³/т чугуна;
- с расходом 50 м³ природного газа и 50 кг ПУТ на тонну чугуна;
- с расходом 100 кг ПУТ на тонну чугуна;
- с расходом 150 кг ПУТ на тонну чугуна.

Состав природного газа, %: 92,58 CH_4 ; 4,21 C_2H_6 ; 0,90 C_3H_8 ; 0,33 C_3H_{10} ; 0,46 C_4H_{12} ; 0,14 CO_2 ; 1,38 N_2 .

Пылеугольное топливо взято из смеси антрацитового и газового углей в соотношении 1 : 1 со следующим усредненным составом, %: 75,71 C; 11,48 H_2 ; 0,74 S; 1,0 % H_2O ; 1,08 N_2 ; 1,95 O_2 ; 8,55 золы.

Основная часть. На основании выполненных расчетов построили график изменения технологических показателей доменной плавки при поэтапной замене 100 м³ природного газа на 50, 100 и 150 кг ПУТ на тонну чугуна при содержаниях 23 % кислорода и 1 % влаги в дутье (рис. 1).

Последовательная замена природного газа на ПУТ в соотношении 1 : 1 сопровождается равномерным уменьшением расхода дутья, объемов горнового и колошниковых газов при почти неизменной температуре колошниковых газов. Теоретическая температура возрастает от 2023 до 2146 °С (на 123 °С), что способствует возрастанию степени прямого восстановления от 37 до 44 %. Интенсивность плавки увеличивается с 874 до 910 кг/м³·сутки при понижении расхода кокса от 466 до 445 кг/т чугуна (на 4,7 %), а коэффициент замены кокса пылеугольным топливом возрастает от 0,83 до 1,04 кг/кг.

Суммарное изменение интенсивности и расхода кокса повышают производительность доменной печи с 2860 до 2980 т/сутки или на 4,03 %.

Дальнейшее увеличение расхода ПУТ до 150 кг/т чугуна замедляет темпы снижения расхода дутья и выход горнового и колошниковых газов. Температура колошниковых газов повышается на 20 °С, а степень прямого восстановления снижается на 5 %. Благодаря этому и уменьшению теплового уровня нижней зоны доменной печи теоретическая температура понижается от 2146 до 2120 °С, то есть на 26 °С.

При практически неизменном коэффициенте замены кокса расход последнего уменьшился с 445 до 394 кг/т чугуна (на 11,5 %), что существенно повышает газодинамическую напряженность печи, интенсивность горения углерода несколько уменьшается. В связи с этим производительность печи повышается лишь на 0,53 %.

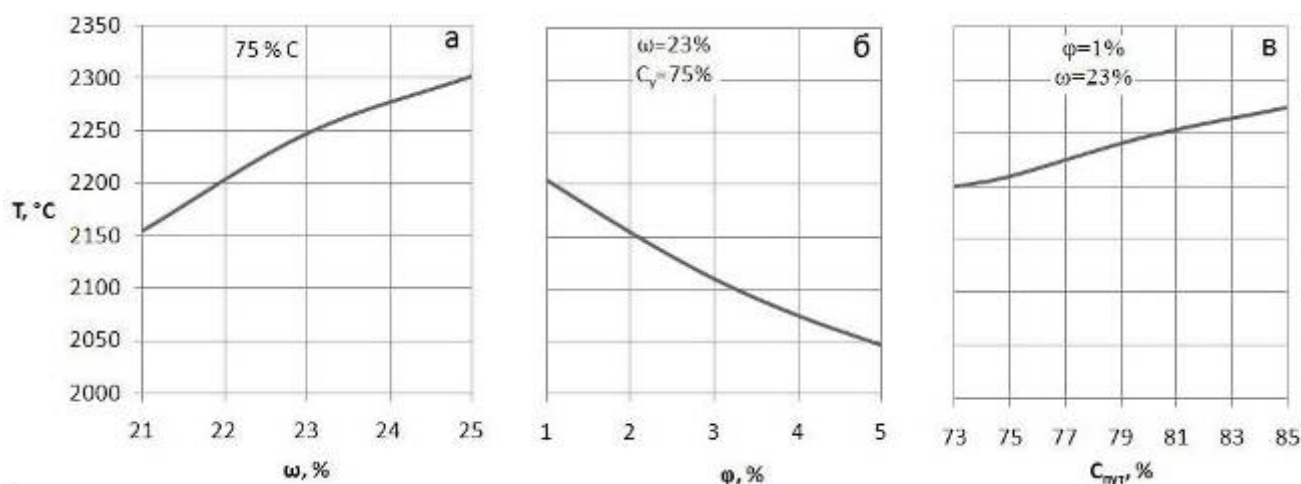


Рисунок 2 – Зависимость теоретической температуры горения от содержания кислорода (а), влажности дутья (б) и содержания углерода в ПУТ (в)

При выплавке передельного чугуна в доменном цехе ОАО «Металлургический комбинат «Запорожсталь» наиболее стабильно и эффективно печи работают при значении теоретической температуры горения около 2050 °С. При изменении режимов работы печей часто рабочие температуры не соответствуют оптимальным значениям. Поэтому следует пользоваться параметрами комбинированного дутья с учетом качества доменной шихты. При вдувании ПУТ такими параметрами являются содержания кислорода и влаги в дутье, содержание углерода в смеси углей и расход ПУТ.

С использованием специальной компьютерной программы рассчитаны теоретические температуры горения для различных составов комбинированного дутья и содержания углерода в ПУТ. Из зависимостей на рис. 2 следует, что наличие дополнительного 1 % кислорода в дутье повышает теоретическую температуру в среднем на 36 °С, наличие 1 % влаги – снижает ее на 40 °С, а наличие 1 % углерода в пылеугольном топливе повышает температуру только на 6 °С. Путем регулирования соотношения газовых углей (~ 73 % углерода) и антрацита (~ 88 % углерода) в смесях для приготовления ПУТ можно управлять нагревом горна печи.

Корректировку текущего значения теоретической температуры ($T_{тек}$, °С) относительно оптимальной величины ($T_{онт}$, °С) рекомендуется производить путем решения уравнения:

$$T_{тек} - T_{онт} = 40\phi - 36\omega - 6C_{пут} , \quad (2)$$

где ϕ – влажность дутья, %; ω – содержание кислорода в дутье, %; $C_{пут}$ – содержание углерода в смеси углей ПУТ, %.

В уравнении (2) величину параметров ϕ , ω и $C_{пут}$ задают и используют в качестве управляющего воздействия на тепловое состояние печи.

Выводы.

1. Наиболее эффективным параметром оценки теплового состояния доменной печи является теоретическая температура горения. При замене 100 м³ природного газа /тонну чугуна на 100 кг ПУТ/тонну чугуна теоретическая температура повышается на 100 °С.

2. Изменение параметров комбинированного дутья – температуры дутья, содержания влаги и кислорода, расхода дополнительного топлива, а также изменение содержания углерода во вдуваемом топливе – является эффективным методом регулирования теплового состояния доменной печи.

3. Исследованиями установлено, что наличие дополнительного 1 % кислорода в дутье повышает теоретическую температуру горения в среднем на 36 °С, наличие дополнительного 1 % влаги – снижает данную температуру на 40 °С, а наличие дополнительного 1 % углерода во вдуваемом ПУТ повышает ее, в среднем, на 6 °С. Путем регулирования соотношения газовых углей (~ 73 % углерода) и антрацита (~ 88 % углерода) в смесях для приготовления ПУТ можно управлять нагревом горна печи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дунаев Н. Е. Заменители кокса / Н. Е. Дунаев, З. М. Кудрявцева // Информация института «Черметинформация». – 1968. – Сер. 4. – № 8. – С. 6-11.
2. Путь Ильича [Электронный ресурс] / С. Куваев // Электронный журнал энергосервисной компании «Экологические системы» – 2009. – № 5. – Режим доступа до журн.: http://escosys.narod.ru/2009_5/art163.htm.
3. Труды международной научно-технической конференции «Пылеугольное топливо – альтернатива природному газу при выплавке чугуна». – Донецк: УНИТЕХ, 2006. – 398 с.
4. О технологии доменной плавки при использовании пылеугольного топлива / В. Г. Аносов, А. П. Фоменко, Н. В. Крутас, Т. С. Цаплина // Металургія: наукові праці ЗДІА. – Запоріжжя: ЗДІА. – 2008. – Вип. 20. – С. 37-43.

Стаття надійшла до редакції 22.03.2011 р.
Рецензент, проф. С.А. Воденніков