

С.А. Воденников<sup>(1)</sup>, зав. кафедрой, д.т.н., профессор

В.Г. Аносов<sup>(1)</sup>, доцент, к.т.н.

А.П. Фоменко<sup>(2)</sup>, гл. специалист

Н.В. Крутас<sup>(2)</sup>, начальник цеха

В.И. Стурза<sup>(2)</sup>, зам. начальника цеха

Г.А. Громак<sup>(1)</sup>, ассистент

Д.А. Лаптев<sup>(1)</sup>, студент

## ТЕХНОЛОГИЯ ВЫПЛАВКИ ЧУГУНА НА ПЫЛЕУГОЛЬНОМ ТОПЛИВЕ

<sup>(1)</sup> Запорожская государственная инженерная академия,

<sup>(2)</sup> ОАО «Металлургический комбинат «Запорожсталь»

Виконано розрахунковий аналіз змінювання технологічних параметрів доменної плавки під час заміни природного газу на пиловугільне паливо (ПВП) на доменних печах ВАТ «Металургійний комбінат «Запоріжсталь».

Выполнен расчетный анализ изменения технологических параметров доменной плавки при замене природного газа пылеугольным топливом (ПУТ) на доменных печах ОАО «Металлургический комбинат «Запорожсталь».

*Введение.* С 60-х годов прошлого столетия в Украине освоена технология доменной плавки на комбинированном дутье из смеси природного газа и кислорода. Однако до настоящего времени качество шихтовых материалов остается низким:

- содержание железа в рудной части шихтовых материалов не превышает 55 %;
- содержание фракции менее 5 мм в агломерате составляет более 12 %;
- применяемые окатыши имеют низкую основность и горячую прочность, из-за чего их содержание в шихте ограничивают 30 %;
- фракционный состав, показатели горячей прочности и реакционная способность кокса ниже требуемого на 15...30 %.

В связи с вышеизложенным, даже при расходе природного газа порядка 100 м<sup>3</sup>/т чугуна расход кокса составляет не ниже 480 кг/т чугуна, а удельная производительность печей не превышает 1,9 т/(м<sup>3</sup>·сут). В то же время на лучших зарубежных доменных печах указанные показатели составляют соответственно менее 400 кг/т чугуна и более 2,5 т/(м<sup>3</sup>·сут) [1].

*Анализ достижений.* Отечественный и зарубежный опыт работы доменных печей в последние годы показывает, что в условиях повышения цен на природный газ целесообразна повсеместная его замена в доменных печах пылеугольным топливом при существенном улучшении качества кокса и железорудного сырья. Это гарантирует сокращение расхода кокса и природного газа до 30 %, что позволит снизить себестоимость чугуна и повысить его конкурентоспособность.

Так, например, в 2006 г. на доменной печи № 2 ОАО «Донецкий металлургический завод» при отключении природного газа и вдувании пылеугольного топлива (ПУТ) в количестве 167,5 кг/т чугуна средний расход кокса составил 403,5 кг/чугуна.

На зарубежных доменных печах в настоящее время достигнут высокий уровень эффективности – доля замеры кокса пылеугольным топливом составляет 35...40 %. Это получено за счет снижения объема колошникового газа до 1500 м<sup>3</sup>/т чугуна и выхода шлака до 260 кг/т чугуна, уменьшения содержания мелкой фракции в шихте

до 5 %, повышения показателя горячей прочности кокса на 60...70 % и использования ПУТ высокого качества, содержащего около 8 % золы и 0,5 % серы.

Результаты расчетов эффективности первого этапа внедрения ПУТ-технологии на доменных печах восьми металлургических предприятий Украины до конца 2012 г. показывают, что до конца 2012 г. данная технология позволит выплавить до 30 млн. т чугуна с использованием 4 млн. т ПУТ, сэкономить 2,5 млн. т кокса, 1,9 млрд. м<sup>3</sup> природного газа и 1,8 млрд. грн в год за счет снижения себестоимости чугуна [4].

*Постановка задачи.* Задачей исследований является изучение расчетным путем изменения технологических параметров доменной плавки при замене природного газа пылеугольным топливом.

*Основная часть.* В настоящее время на ОАО «Металлургический комбинат «Запорожсталь» завершается строительство системы подготовки и вдувания пылеугольного топлива в доменные печи. В качестве пылеугольного топлива планируют использовать кузнецкие угли Бачатского разреза марки СС и донецкие угли марок АО и Т. Составы и свойства указанных углей представлены в табл. 1.

**Таблица 1** – Состав и свойства углей для ПУТ

| Марка угля | <i>C</i> | <i>H<sub>2</sub></i> | <i>O<sub>2</sub></i> | <i>N<sub>2</sub></i> | <i>S</i> | <i>A</i> | <i>W</i> | HGI | Теплота горения, кДж/кг |
|------------|----------|----------------------|----------------------|----------------------|----------|----------|----------|-----|-------------------------|
| АО         | 91,60    | 1,80                 | 0,80                 | 0,71                 | 1,00     | 4,10     | 9,50     | 44  | 25,22                   |
| Т          | 81,92    | 3,87                 | 0,31                 | 2,11                 | 1,90     | 10,0     | 4,50     | 86  | 26,49                   |
| СС         | 80,30    | 4,30                 | 4,90                 | 2,30                 | 0,30     | 8,0      | 7,70     | 67  | 28,28                   |

Бачатские угли марки СС отличаются от донецких углей минимальным содержанием серы, в связи с чем их использование для ПУТ-технологии более предпочтительно.

Применительно к условиям работы доменной печи № 2 ОАО «Металлургический комбинат «Запорожсталь» с использованием специально разработанной программы «Шихта-N» [3] осуществляли расчетный анализ изменения технологических параметров процесса плавки чугуна при ступенчатой замене природного газа пылеугольным топливом и повышении его расхода до 160 кг/т чугуна.

Программа реализована на алгоритмическом языке RASKAL и состоит из последовательного ряда подпрограмм, которые выполняют:

- расчет шихты (определение точного расхода агломерата, флюса, количества и состава шлака, а также его суммарной основности *B*, коэффициента распределения серы между шлаком и чугуном);
- расчет количества обогащенного кислородом влажного и сухого дутья;
- расчет количества и состава колошникового газа (определение баланса водорода, средней степени использования водорода и оксида углерода, количества оксида и диоксида углерода, водорода и азота, перешедших в колошниковый газ);
- расчет материального баланса процесса доменной плавки (определение суммарного прихода материалов в доменную печь и выход продуктов плавки);
- расчет температуры колошниковых газов (определение теплоемкости шихтовых материалов и газов при их температурах, средней температуры шихты, водяных эквивалентов газов и шихты; температуры колошникового газа);
- расчет всех статей теплового баланса, кроме статьи «потери в окружающую среду»;

**Таблица 2** – Технологические показатели работы доменной печи № 2 ОАО «Металлургический комбинат «Запорожсталь»

| Показатели работы<br>печи                                                | Варианты |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|--------------------------------------------------------------------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                                                          | 1        | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    |
| Расход:                                                                  |          |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| природного газа, м <sup>3</sup> /т                                       | -        | 100   | 50    | 30    | -     | -     | 50    | 30    | -     | 50    | 30    | -     |
| ПУТ из: «СС», кг/т                                                       | -        | -     | 70    | 90    | 140   | 160   | 35    | 45    | 80    | 35    | 45    | 80    |
| «АО», кг/т                                                               | -        | -     | -     | -     | -     | -     | 35    | 45    | 80    | -     | -     | -     |
| «Т», кг/т                                                                | -        | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | 35    | 45    | 80    |
| Дутье:                                                                   |          |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| расход, м <sup>3</sup> /т                                                | 1453     | 1351  | 1364  | 1377  | 1417  | 1385  | 1328  | 1368  | 1439  | 1336  | 1374  | 1387  |
| температура, °С                                                          | 1150     | 1150  | 1100  | 1100  | 1100  | 1100  | 1100  | 1100  | 1100  | 1100  | 1100  | 1100  |
| кислород, %                                                              | 22,0     | 23,0  | 23,0  | 22,5  | 22,5  | 22,5  | 23,0  | 22,5  | 22,0  | 23,0  | 22,5  | 22,0  |
| влага, %                                                                 | 1,5      | 1,0   | 1,5   | 2,0   | 2,1   | 2,5   | 1,5   | 2,3   | 2,5   | 1,5   | 2,0   | 2,5   |
| Теоретическая температура<br>горения, °С                                 | 2173     | 2008  | 2092  | 2095  | 2096  | 2095  | 2097  | 2093  | 2098  | 2097  | 2095  | 2097  |
| Степень использования газа, %                                            | 34,8     | 38,9  | 37,5  | 36,6  | 36,0  | 35,8  | 38,0  | 36,3  | 35,3  | 37,4  | 36,8  | 35,3  |
| Степень прямого восстан., %                                              | 48,3     | 37,1  | 41,3  | 44,5  | 47,2  | 46,5  | 41,5  | 44,3  | 48,8  | 42,2  | 45,1  | 47,2  |
| Расход:                                                                  |          |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| углерода кокса, кг/т                                                     | 475,2    | 394,7 | 394,6 | 399,0 | 384,5 | 372,0 | 392,0 | 394,0 | 367,2 | 394,0 | 398,6 | 370,6 |
| добавок углерода, кг/т                                                   | -        | 57,6  | 85,0  | 89,0  | 112,1 | 128,1 | 88,6  | 96,4  | 137,3 | 85,4  | 90,1  | 129,4 |
| углерода на фурмах, кг/т                                                 | 352,1    | 333,7 | 342,2 | 347,1 | 353,6 | 359,5 | 335,6 | 351,4 | 358,2 | 329,6 | 346,6 | 352,0 |
| всего углерода, кг/т                                                     | 475,2    | 452,3 | 479,6 | 488,0 | 496,6 | 500,1 | 480,6 | 490,4 | 504,5 | 479,4 | 488,7 | 500,0 |
| кокса, кг/т                                                              | 546,2    | 453,7 | 453,6 | 458,6 | 442,6 | 427,6 | 450,5 | 452,9 | 422,1 | 452,9 | 458,2 | 425,8 |
| Выход шлака, кг/т                                                        | 462,6    | 442,5 | 446,2 | 450,4 | 446,3 | 444,4 | 447,3 | 450,0 | 444,3 | 446,4 | 449,2 | 444,1 |
| Основность шлака <i>B</i>                                                | 1,395    | 1,368 | 1,374 | 1,374 | 1,376 | 1,365 | 1,368 | 1,372 | 1,370 | 1,368 | 1,372 | 1,366 |
| Перепад давления газа, кПа                                               | 125,7    | 132,1 | 128,6 | 128,2 | 128,0 | 128,3 | 128,4 | 128,0 | 128,1 | 128,6 | 128,3 | 128,9 |
| Интенсивность хода по сум-<br>марному углероду, кг/(м <sup>3</sup> ·сут) | 870,3    | 828,2 | 891,0 | 898,5 | 909,3 | 926,4 | 894,0 | 908,1 | 926,9 | 898,0 | 910,0 | 931,1 |
| Производительность, %                                                    | 100,0    | 100,0 | 101,6 | 100,6 | 100,0 | 101,1 | 101,7 | 101,1 | 100,4 | 102,2 | 101,7 | 101,7 |
| Коэф-т замены кокса, кг/кг(м <sup>3</sup> )                              | -        | 0,93  | 0,77  | 0,73  | 0,74  | 0,74  | 0,8   | 0,78  | 0,78  | 0,74  | 0,73  | 0,75  |

- расчет теоретической температуры горения, температуры горнового газа, чугуна и шлака;
- расчет величины потерь теплоты в окружающую среду;
- расчет степени прямого восстановления железа;
- расчет коэффициента использования полезного объема доменной печи и интенсивности горения углерода.

При проведении расчетных исследований использовали следующие исходные данные:

- качественные показатели компонентов загружаемой шихты, природного газа, кокса, пылеугольного топлива, а также чугуна;
- исходные параметры дутья;
- заданный температурный режим доменной печи;
- величину уноса основных шихтовых материалов;
- характер распределения и использования газа в печи.

Выполнены расчеты технологических параметров доменной плавки при замене  $100 \text{ м}^3$  природного газа различным пылеугольным топливом:

- углем марки СС, содержащим 80,3 % углерода;
- смесью углей марок СС и АО с соотношением расходов 1 : 1 и средним содержанием углерода 85,95 %;
- углей марок СС и Т с соотношением 1 : 1 и средним содержанием углерода 81,22 %.

Вариант 1 является базовым, то есть при работе доменной печи без добавок топлива, вариант 2 соответствует работе печи при расходе природного газа  $100 \text{ м}^3/\text{т}$  чугуна, варианты 3-12 предусматривают последовательную замену природного газа пылеугольным топливом и доведение его расхода до  $160 \text{ кг}/\text{т}$  чугуна.

В опытные периоды плавки обеспечивали стабильность следующих технологических параметров:

- соотношение расходов «агломерат – окатыши - железная руда» составляло 1,0 : 0,05 : 0,08 при среднем содержании железа равном 55,2 %;
- теоретическую температуру горения поддерживали на уровне  $2095^\circ\text{C}$  за счет варьирования параметров комбинированного дутья;
- при относительно постоянной величине основности и выхода шлака содержание серы в чугуне не превышает 0,033 %, а кремния – 0,62 %.

Результаты проведенных расчетов представлены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, суммарный расход углерода возрастает пропорционально увеличению расхода ПУТ и содержанию его в углях. При этом возрастает количество углерода, сжигаемого на фурмах.

Снижение расхода природного газа приводит к уменьшению содержания водорода в горновом газе – более активном восстановителе, чем оксид углерода, поэтому степень использования газа снижается на 2,5...3,5 %, а степень прямого восстановления возрастает на 10,0...11,5 %, что сопровождается повышенным приходом углерода. Он мог быть еще большим, если бы температуру горна не поддерживали на оптимальном уровне компенсационными мерами.

В процессе замены природного газа пылеугольным топливом расход кокса сохранялся на базовом уровне. При этом степень компенсации расхода природного газа пылеугольным топливом составляет примерно 1,25...1,40 кг ПУТ на  $1 \text{ м}^3$  газа. Очевидно, что на это оказывает влияние развитие процесса прямого

восстановления и компенсационные меры по перегреву горна с увеличением расхода ПУТ: уменьшение температуры дутья и увеличение его влажности.

Особое внимание следует уделить изменению расхода кокса. Если при вдувании 100 м<sup>3</sup> природного газа на тонну чугуна (вариант 2) удельный расход сухого кокса уменьшается с 546,2 до 453,7 кг/т чугуна, а коэффициент замены кокса составляет 0,93 кг/кг ПУТ, то после полной замены природного газа на ПУТ и увеличения расхода последнего до 160 кг/т чугуна при использовании углей марки СС (вариант 6) расход кокса снижается до 427,0 кг/т чугуна, при использовании смеси марок СС и Т (вариант 12) – до 425,8 кг/т чугуна, марок СС и АО (вариант 9) – до 422,1 кг/т чугуна. Коэффициенты замены кокса составляют соответственно 0,74, 0,75 и 0,77 кг/кг ПУТ, то есть на 17...20 % ниже, чем для природного газа.

ПУТ из смеси углей марок СС и Т, несмотря на большее суммарное содержание углерода, оказывает влияние на технологические показатели процесса плавки аналогично углю марки СС. Это объясняется повышенным содержанием серы и золы в угле марки Т, а также существенным отличием показателя дробимости смеси этих углей при подготовке ПУТ.

Следует отметить, что при проведении расчетов доменного процесса не учитывали неполное сгорание углерода, величина которого может достигать 20 % при высоких расходах ПУТ [3]. По этой причине, а также из-за недостаточно высоких параметров отечественного сырья следует ориентироваться на величину коэффициента замены кокса на уровне около 0,6 кг/кг ПУТ.

Несмотря на уменьшение расхода кокса и увеличение доли углерода, сгорающего на фурмах, при замене природного газа ПУТ газодинамика столба шихты не ухудшается – перепад давления газа по высоте печи даже снижается на 3...5 %. Это позволяет во всех случаях замены природного газа пылеугольным топливом при расходе ПУТ 160 кг/т чугуна получить существенное увеличение интенсивности плавки по сожженному углероду от 80 до 103 кг/(м<sup>3</sup>·сут) при увеличении производительности доменной печи от 0,4 до 1,7 %.

Полученные выводы достаточно хорошо коррелируются с практическими результатами отечественных и зарубежных доменных печей, работающих использующих пылеугольное топливо [4-6].

#### *Выводы.*

1. На ОАО «Металлургический комбинат Запорожсталь» в качестве пылеугольного топлива в доменные печи рекомендуется использование кузнечского низкосернистого угля марки СС Бачатского разреза и донецких углей марок АО и Т, содержащих больше углерода, серы и золы.

3. Разработанная технология замены природного газа пылеугольным топливом с расходом до 160 кг/т чугуна позволит снизить расход сухого кокса до 422...427 кг/т чугуна при значениях коэффициента его замены 0,74...0,78 кг/кг ПУТ, увеличить интенсивность плавки по суммарному углероду на 80...103 кг/(м<sup>3</sup>·сут) и повысить производительность печи на 0,4...1,7 %.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Захарченко В. Н. Состояние и перспективы доменного производства Украины / В. Н. Захарченко // Труды международной научно-технической конференции «Пылеугольное топливо – альтернатива природному газу при выплавке чугуна». – Донецк: УНИТЕХ, 2006. – С. 27-35.

2. Перспективы применения пылеугольного топлива в доменных цехах Украины и России / *А. А. Минаев, А. М. Рыженков, С. Л. Ярошевский* [и др.] // *Сталь*. – 2008. – № 2. – С. 5-11.
3. *Аносов В. Г.* Теория и технология доменного процесса. Оценка эффективности доменной плавки / *В. Г. Аносов, Т. С. Цаплина* // Методические указания к выполнению технологических расчетов для курсовых и дипломных проектов и работ. – Запорожье: РИО ЗГИА, 2003. – 78 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: РВВ ЗДІА, 2009. – Вип. 20. – С. 37-43.
5. Использование вдувания пылеугольного топлива для оптимизации работы доменных печей / *Б. Парамантан, Д. Плоой, М. Гердес, К. Майер* // *Сталь*. – 2005. – № 10. – С. 38-44.

Стаття надійшла до редакції 11.06.2010

р.  
Рецензент, проф. М.Ф.  
Колесник