

С.А. Воденников, зав. кафедрой, д.т.н., профессор

В.Г. Аносов, доцент, к.т.н.

Д.А. Лаптев, аспирант

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ С ЗАМЕНОЙ КОКСА ПЫЛЕУГОЛЬНЫМ ТОПЛИВОМ

Запорожская государственная инженерная академия

Наведено результати аналізу ефективності технології заміни коксу пиловугільним паливом при поступовому припиненні використання природного газу на доменній печі № 2 ВАТ «Металургійний комбінат «Запоріжсталь».

Приведены результаты анализа эффективности технологии замены кокса пылеугольным топливом при постепенном прекращении расхода природного газа на доменной печи № 2 ОАО «Металлургический комбинат «Запорожсталь».

Введение. В доменной технологии XXI века все активнее применяются различные топливные добавки, являющиеся заменителями дефицитного топлива – кокса. Массовому применению заменителей кокса способствует сокращение мировых запасов коксующихся углей, что приводит к ухудшению качества и повышению цен на металлургический кокс.

До недавнего времени основным заменителем кокса на металлургических предприятиях Украины являлся природный газ. Еще пять-семь лет назад масштабное использование природного газа вполне приветствовалось металлургами Украины. При стоимости 50 долларов США за 1 тыс. м³ и меньше привязка к газу представлялась конкурентным преимуществом [1]. Но сейчас предприятия вынуждены платить за природный газ 485...490 долларов за 1 тыс. м³: к стандартной импортной цене 426 долларов на границе добавляют еще около 60 долларов за логистику. Цена природного газа давно превышает цену кокса (400...470 долларов за 1 т), а в IV квартале 2012 г. стоимость газа может увеличиться еще на 10...15 долларов. Дальнейшее использование природного газа в качестве заменителя кокса стало нецелесообразным.

Анализ достижений. В последнее десятилетие активнее других разрабатывается технология использования в качестве заменителя кокса пылеугольного топлива (ПУТ) взамен природного газа (ПГ) ввиду его большей доступности и минимальной стоимости при сравнительно высокой калорийности.

Еще в 70-х годах прошлого столетия данная технология была успешно опробована на Карагандинском, Запорожском и Донецком металлургических заводах. Уже тогда был достигнут расход ПУТ до 120 кг/т чугуна и получены коэффициенты замены кокса до 0,7 кг/кг угля, 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/кг.

Главным преимуществом ПУТ является использование некоксующихся углей при коэффициенте замены дефицитного кокса, близким к единице. Вследствие незначительной теплоты разложения летучих составляющих углей (менее 1,5 МДж/кг) и небольшого объема горновых газов (1,5 м³/ кг угля) можно такого угля сжигать больше, чем природного газа при одинаковой теоретической (адиабатической) температуре горения [2].

Основные требования к составу углей или концентратов, применяемых для по-

лучения ПУТ, следующее: содержание золы – 8...12 %; серы – не более 1 %; летучих – не более 35 %.

Главными технологическими требованиями к ПУТ являются: крупность помола угля (содержание фракции -80 мкм – не менее 80 %, фракции -100 мкм – 95 %); влажность – менее 1 % (непродолжительно допускается до 1,3 %); стабильный химический состав.

С ноября 2010 г. на ОАО «Металлургический комбинат «Запорожсталь» начали применять опытно-промышленные плавки по вдуванию пылеугольного топлива.

Постановка задачи. Задачей исследования является изучение технологического процесса доменной плавки при замене кокса пылеугольным топливом с постепенным прекращением расхода природного газа.

Основная часть. На протяжении 2011 г. выполнены промышленные исследования и анализ эффективности применения на доменной печи № 2 ОАО «Металлургический комбинат «Запорожсталь» ПУТ из кузнецкого угля марки СС и донецких марок КС, Т и Г (табл. 1).

Таблица 1 – Технический анализ углей для ПУТ

Вид сырья	Влага, %	Сера, %	Зола, %	Летучие, %
Концентрат угольный марки СС	8,8	0,33	10,3	31,3
Уголь каменный марки СС	14,5	0,28	10,0	31,0
Концентрат угольный марки Г	8,7	0,47	12,1	39,0
Концентрат угольный марки Т	11,0	0,47	15,8	12,9
Уголь каменный марки ССМСШ	7,8	0,28	9,5	27,5
Концентрат угольный марки КС	10,9	0,43	10,5	23,4

Из этих углей на протяжении 2011 г. получали пылеугольное топливо со средним содержанием фракции -90 мкм, %: 82...88; серы < 0,6, золы – 8,5...13,0, летучих – 24...30, влаги < 1,3.

Использование ПУТ ведет к снижению доли кокса и порозности шихты, а также теоретической температуры горения в фурменной зоне печи. Теоретические исследования, анализ результатов опытных и промышленных плавков, проведенных в Украине и за рубежом, показывают, что при величине коэффициента замены равном единице и сохранении на базовом уровне или увеличении теоретической температуры горения повышение расхода ПУТ не вызывает ухудшения базовых значений основных технико-экономических показателей доменной плавки.

Применительно к доменной печи № 2 рассматриваемого предприятия программу замены ПГ на ПУТ реализовывали расчетными и технологическими методами с расходом последнего до 150 кг/т чугуна. После проведения расчетов по нескольким вариантам, используя различные марки ПУТ с применением специально разработанной программы «Шихта-N», анализировали изменения технологических параметров доменного процесса при ступенчатой замене ПГ на ПУТ [3].

Основным компенсирующим фактором было снижение расхода ПГ. Исследованием установлено, что оптимальная величина коэффициента компенсации ПУТ-ПГ для данных технологических условий составляет 1,0...1,5 кг ПУТ/м³ ПГ. Обогащение дутья кислородом определило значительное снижение выхода горновых газов на 1 т чугуна и повышение уровня оптимальной теоретической температуры горения до 2100...2150 °С.

Вдувание в горн печи 100 кг ПУТ /т чугуна в сочетании с описанными выше компенсирующими мероприятиями обеспечивает снижение расхода кокса с 540 до 382 кг/т чугуна. Как показывает возрастание теоретической температуры горения ($T_{m.z}$) с 2050 до 2150 °С, освоение ПУТ-технологии осуществляется в наиболее благоприятном режиме сверхкомпенсации. Об этом также свидетельствуют уровень производительности печи, превышающий приведенный к равным условиям расчетный, значительное повышение степени использования восстановительной и тепловой работы горновых газов.

В ходе проведения технологии с вдуванием ПУТ в качестве основных факторов, способствующих поддержанию оптимального режима полной и комплексной компенсации, использовали: корректировку $T_{m.z}$ изменением содержаний кислорода и влажности дутья, постоянство температуры дутья, снижение расхода, а также сернистости и тонины помола ПУТ, а также уменьшение диаметра воздушных фурм для полного сжигания ПУТ.

Уменьшение расхода ПГ приводит к снижению содержания водорода в горновом газе – более активного восстановителя, чем монооксид углерода (CO), поэтому степень использования газа уменьшается на 2,5...3,0 %, а степень прямого восстановления возрастает на 10...12 %, что сопровождается значительным перерасходом углерода. Он мог быть еще большим, если бы температуру горна не поддерживали на оптимальном уровне компенсационными мерами.

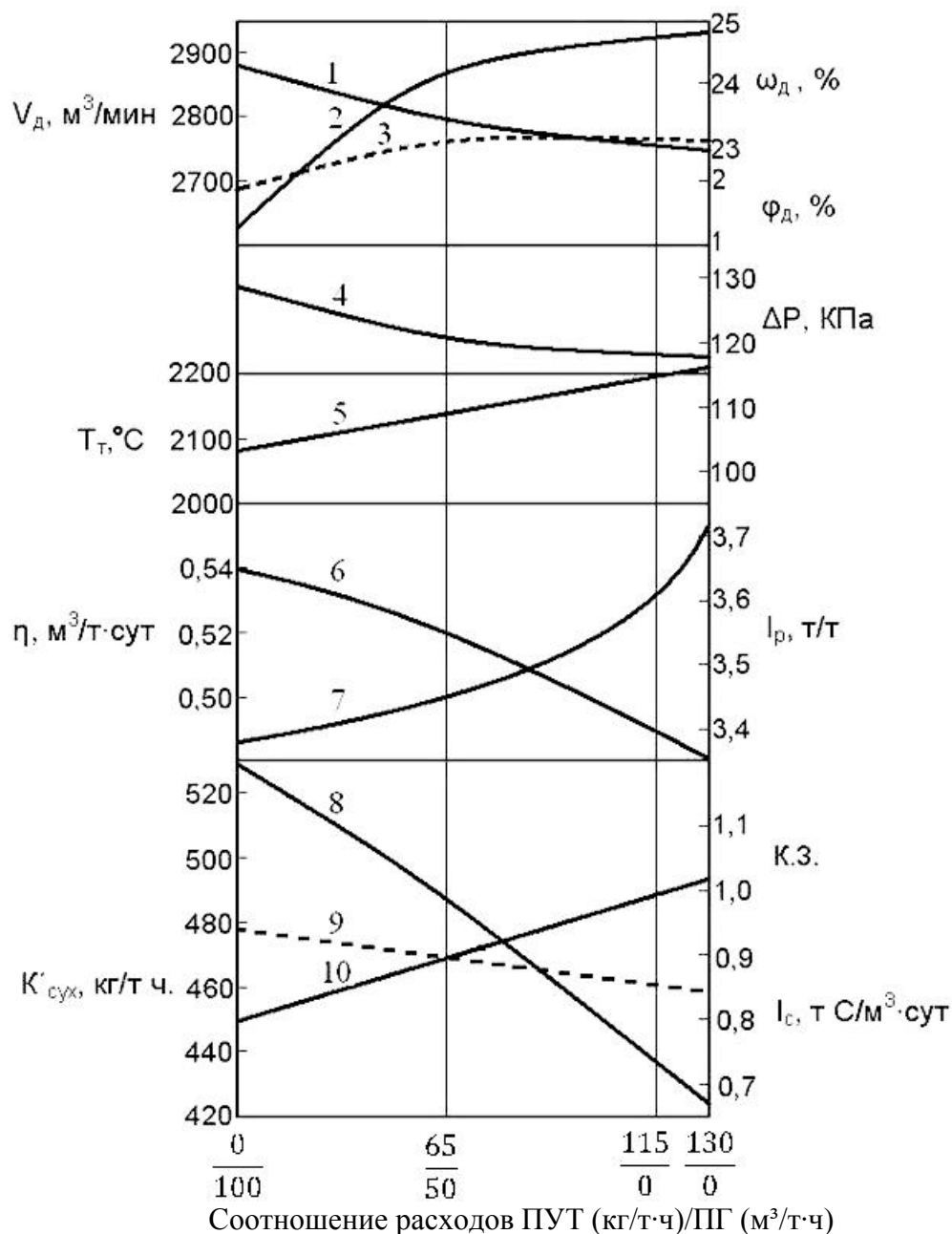
В процессе замены ПГ на ПУТ стремились сохранить расход кокса на базовом уровне. При этом степень компенсации расхода ПГ пылеугольным топливом составила примерно 1,25...1,30 кг ПУТ на 1 м³ газа, то есть соответствует коэффициенту замены кокса на уровне 0,75...1,04 кг кокса на 1 кг ПУТ, что несколько меньше, чем достигнуто на зарубежных доменных печах. На это оказали влияние компенсационные меры по перегреву горна с увеличением расхода ПУТ: уменьшение температуры дутья и увеличение его влажности, а также сравнительно низкое качество ПУТ.

Замена ПГ пылеугольным топливом способствует повышению нагрева горна за счет большей калорийности ПУТ и уменьшению объема горнового газа за счет меньшего содержания водорода в нем [4]. Увеличение же расхода ПУТ вызывает снижение $T_{m.z}$ в фурменной зоне печи. Согласно расчетам, удельное снижение $T_{m.z}$ составляет: для ПУТ из углей марки Т – 1,0...1,3 °С, для ПУТ из углей марки Г – 1,35...1,65 °С на кг ПУТ/т чугуна.

Освоение на доменной печи № 2 ОАО «Металлургический комбинат «Запорожсталь» технологии с вдуванием 0...130 кг ПУТ на 1 т чугуна сопровождалось снижением расхода кокса с 538 до 424 кг/т чугуна при одновременном снижении расхода ПГ от 100 до 0 м³/т чугуна. Суммарная экономия кокса достигает 114 кг/т чугуна, что более чем в два раза превышает эффективность технологического режима с вдуванием в горн смеси ПГ+O₂. Коэффициент замены кокса при этом возрастает с 0,8 кг/м³ ПГ до 1,03 кг/кг ПУТ (рис. 1).

Снижение расхода кокса сопровождалось ростом $T_{m.z}$ с 2083 °С при максимальном расходе ПГ и отсутствии ПУТ до 2213 °С при отсутствии ПГ и максимальном расходе ПУТ – 130 кг/т чугуна. При замене ПГ на ПУТ в горновом газе снижается содержание водорода, который является активным интенсификатором косвенного восстановления железа. Его заменяет CO , образующийся при горении углерода ПУТ.

При горении ПУТ выделяется избыточная теплота, которая способствует развитию степени прямого восстановления. Поэтому оптимальное значение $T_{m.z}$ при использовании ПУТ будет большим, чем при использовании ПГ.



- Соотношение расходов ПГУТ (кг/т·ч)/ПГ (м³/т·ч)
- 1 (V_d) - расход дутья м³/мин.; 2 (ω_d) - содержание кислорода в дутье, %;
 3 (ϕ_d) - содержание влаги в дутье, %; 4 (ΔP) - общий перепад давления газов в печи, кПа;
 5 ($T_{m.z}$) - теоретическая температура горения, °С; 6 (η) - КИПО м³·сут/т чугу.;
 7 (I_p) - интенсивность плавки по руде, т/т.; 8 ($K_{сух}$) - расход сухого кокса, кг/т чугу.;
 9 (I_c) - интенсивность плавки по суммарному углероду т/(м³·сут);
 10 (К.З.) - коэффициент замены кокса кг/кг ПГУТ (м³ ПГ)

Рисунок 1 – Изменение технологических параметров плавки в доменной печи № 2 при замене природного газа пылеугольным топливом (2010-2011 гг.):

Повышение $T_{m.z}$ имеет место несмотря на компенсирующие изменения параметров дутья: с повышением расхода ПГУТ до максимального значения содержание кислорода в дутье снижается с 24,3 до 22,9 %, а содержание влаги возрастает с 1,8 до 2,7 %. Эти изменения привели к росту расхода дутья с 2620 до 2920 м³/т чугуна, из-за чего не получили заметного улучшения газопроницаемости шихты при уменьшении объема горнового газа за счет вывода природного газа из печи. По этой же причине интенсивность горения по суммарному углероду (I_c) несколько снизилась. Тем не менее, общий перепад давления газов в печи уменьшился с 127 до 117 кПа, что указыва-

ет на некоторое улучшение газодинамики за счет повышения качества шихты, и особенно за счет использования кокса улучшенного качества.

Следует заметить, что если в теоретических расчетах получили прирост производительности от данной технологии не более 2 %, то в практических условиях при замене 100 м³ природного газа на 130 кг ПУТ на 1 т чугуна величина роста производительности составляет 11,1 %: КИПО снижается с 0,54 до 0,48 м³/(т·сут.), а удельная производительность возрастает с 1850 до 2080 кг/(м³·сут.). При дальнейшей оптимизации теплового и газодинамического режимов плавки, а также параметров комбинированного дутья, показатели работы печи должны улучшиться.

В заключение следует отметить, что доменным производством металлургических предприятий Украины расходуется 3,5 млрд. м³ ПГ в год. Перевод семи основных доменных цехов Украины на вдувание ПУТ позволит сократить объем ПГ более чем на 60 %. Масштабное внедрение данной технологии приведет к уменьшению себестоимости 1 т украинского чугуна на 10...15 %. Вместе с сопутствующим снижением расхода кокса (на 20...25 %) это позволит уменьшить себестоимость 1 т украинского чугуна на 35...40 долларов.

Объем выпуска чугуна в 2011 г. составил 28,8 млн. т. В 2012 г. совокупная экономия предприятий черной металлургии Украины от внедрения в доменных цехах технологии вдувания пылеугольного топлива может составить более 550 млн. долларов.

Выводы. В сформировавшихся технологических условиях работы ОАО «Металлургический комбинат «Запорожсталь» использование ПУТ обеспечивает выведение из состава дутья ПГ, снижение расхода кокса и повышение технико-экономических параметров доменной плавки. Разработка комплекса оборудования для приготовления и вдувания ПУТ в горн доменной печи № 2, а также освоение технологии доменной плавки с вдуванием в горн до 130 кг ПУТ на 1 т чугуна обеспечивает снижение расхода кокса с 538 до 424 кг/т чугуна; снижение расхода кокса, которое сопровождалось ростом $T_{m.g}$ с 2083 °С при максимальном расходе ПГ и отсутствии ПУТ до 2213 °С – при отсутствии ПГ и вдувании 130 кг ПУТ/т чугуна; рост удельной производительности с 1850 до 2080 кг/(м³·сут.) и прирост производства чугуна на 11,1 %.

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. Реальный срок перевода основных доменных цехов на технологию вдувания пылеугольного топлива – не менее пяти лет [Электронный ресурс] // Фінансові новини – 2012. – Режим доступа до журн.: <http://bin.ua/news/economics/economic/133410-realnyj-srok-perevod-osnovnyx-domennyx-cexov-na.html>.
3. Технология выплавки чугуна на пылеугольном топливе / С. А. Воденников, В. Г. Аносов, А. П. Фоменко и др. / Металургія : наукові праці Запорізької державної інженерної академії. – Запоріжжя : РВВ ЗДІА, 2010. – Вип. 22. – С. 16-23.
4. О технологии доменной плавки при использовании пылеугольного топлива / В. Г. Аносов, А. П. Фоменко, Н. В. Крутас, Т. С. Цаплина / Металургія : наукові праці Запорізької державної інженерної академії. – Запоріжжя : РВВ ЗДІА, 2009. – Вип. 20. – С. 37-43.

Стаття надійшла до редакції 10.08.2012 р.

Рецензент, проф. Н.Ф. Колесник