

АНАЛИЗ ОПЫТА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОМБИНИРОВАННОГО ДУТЬЯ

Целью работы является поиск оптимального состава обогащенного кислородом дутья и изучение возможности повышения эффективности применения природного газа в доменных печах. Показано, что эффективность использования природного газа определяется уровнем теоретической температуры газа у фурм, коэффициентом замены природным газом, высоким качеством смешивания с дутьем, исключающим образование сажи и полимеризацию углеводородов. Необходима дальнейшая оптимизация состава комбинированного дутья, расхода природного газа и условий его применения.

доменная печь, обогащенное кислородом дутье, природный газ, анализ, эффективность

Современное состояние вопроса. Впервые природный газ был применен на доменных печах завода им.Петровского (1957 г.), проплавливающих агломерат на атмосферном дутье [1]. Улучшение показателей плавки было отмечено даже при подаче в фурмы относительно малого количества природного газа – на уровне 10–25 $\text{м}^3/\text{т}$ чугуна. Последующее развитие технологии вдувания природного газа с атмосферным дутьем и затем с обогащением его кислородом (комбинированное дутье), связано с совершенствованием теоретических основ плавки и разработкой практически применимых её критериев [2]. Установлено, что эффективность применения природного газа в доменной плавке достигается за счет использования тепла горения углерода природного газа и экономии тепла от уменьшения доли прямого восстановления (r_d), обусловленных, в свою очередь, повышением восстановительного потенциала образующегося фурменного газа и его температуры [2, 3].

Разработаны показатели для установления оптимального количества природного газа в дутье [2–8]. В качестве таких показателей приняты: коэффициент замены кокса природным газом (K_z или Ψ) и теоретическая температура газа у фурм, учитывающая совместный процесс горения углерода, кокса и природного газа (T_T). Способы расчета и выбора величины теоретической температуры газа у фурм известны из результатов специальных исследований и подробно изложены в ряде источников. Наиболее часто используются зависимости для определения T_T , разработанные А.Н.Раммом [2, 3], и другими специалистами [4–7]. В соответствии с разработанной теорией доменной плавки на комбинированном дутье [9–14], ее рациональные параметры реализуются при соотношении природного газа и кислорода в дутье, обеспечивающем величину теоретической температуры газа у фурм в диапазоне от 1700–1800 $^{\circ}\text{C}$ до 2150 $^{\circ}\text{C}$ [11–14]. Установлена также величина T_f равная 1880 $^{\circ}\text{C}$ [15] при которой достигается минимальное значение степени прямого восстановления. Некоторыми авторами обосновывается возможность

увеличения T_T от 2300 до 2350⁰С [11]. Низкая температура газа у фурм (1700–1800⁰С) соответствует расходу природного газа с недостаточной компенсацией его кислородом дутья. В этом случае заметно сокращается расход кокса, возрастает выход горнового газа на единицу углерода кокса, сгорающего у фурм, увеличивается (если не принять соответствующие меры) нижний перепад давления газа, менее благоприятными становятся температурно–тепловые условия по сечению горна, затрудняется формирование жидких фаз по оси воздушных фурм и, соответственно, сход шихты. Кроме этого, уменьшается интенсивность плавки по коксу и, при неизменной рудной нагрузке, по руде. При температуре 2150⁰С и более наблюдается ситуация обратная вышеописанной, что свидетельствует о необходимости поиска в каждом конкретном случае рационального соотношения кислорода и природного газа в дутье. Поскольку увеличение теоретической температуры газа у фурм обеспечивают, главным образом, увеличением концентрации кислорода в дутье, способствующей повышению интенсивности плавки и производительности печи, на практике величину T_T стремятся поддерживать ближе к верхнему пределу [14].

Вторым общепризнанным критерием эффективности комбинированного дутья является коэффициент замены кокса природным газом [15–20]. Коэффициент замены $\Psi = \Delta K / \Delta ПГ$ (ΔK – изменение удельного расхода кокса, кг/т чугуна; $\Delta ПГ$ – изменение расхода природного газа, м³/т чугуна) зависит от комплекса физико–химических и тепловых процессов в фурменной зоне, определяется теоретической температурой газа у фурм и уровнем развития прямого восстановления оксидов железа в печи, выражаемом величиной g_d . По данным [16, 17] с достаточной степенью точности коэффициент замены кокса выражается зависимостью:

$$\Psi = (3,2 T_T / 200 + 2,3) \cdot Dr_d, \quad (1)$$

где T_T – теоретическая температура газа у фурм, ⁰С; Dr_d – изменение степени прямого восстановления от базового значения или условного уровня, ед.

Для многих случаев практики величина Dr_d с достаточной точностью определяется уравнением:

$$Dr_d = 0,20 - 2,5 \cdot 10^{-4} \cdot S_{ПГ}, \quad (2)$$

где $S_{ПГ}$ – расход ПГ, м³/т чугуна.

Весьма информативным является подход определения коэффициента замены, предложенный в работах [15,19], где этот коэффициент определяется отношением количества тепла, выделяющегося от окисления природного газа кислородом шихты, и тепла, образующегося при окислении в печи 1 кг кокса:

$$\gamma = (10802m \cdot h_{H_2} + 12648g \cdot h_{CO}) / [1,866 C_k \cdot (5250 + 12648 h_{CO})], \quad (3)$$

где m и g – содержание водорода и углерода в природном газе, соответственно, $\text{м}^3/\text{м}^3$; h_{H_2} и h_{CO} – степени использования водорода и CO в печи, соответственно, ед.; $C_{\text{к}}$ – содержание углерода в коксе, ед.

Уточненное аналогичное (3) уравнение для определения величины Ψ разработано В.Н.Андроновым [18]. Предположение о том, что степень использования водорода [19,20] определяется по формуле Бабарыкина Н.Н. величиной η_{CO} [21]:

$$x=1,41-1,07 h_{\text{CO}} \text{ (при } x=h_{\text{H}_2}:h_{\text{CO}}), \quad (4)$$

открывает возможность использования уравнения (3) для оценки величины коэффициента замены u и установления его величины путем направленного изменения h_{CO} подбором шихтовых материалов соответствующего качества (по составу и физическим свойствам) и их распределения на колошнике печи. Известны и другие [20] аналогичные уравнения, определяющие u , а также алгоритмы оптимизации использования комбинированного дутья [22].

Целью работы является поиск оптимального состава обогащенного кислородом дутья и изучение возможности повышения эффективности применения природного газа в доменных печах.

Изложение основных материалов исследования. Разработка теории комбинированного дутья позволила обосновать возможность и целесообразность значительного повышения расхода природного газа вплоть до 180–200 $\text{нм}^3/\text{т}$ чугуна и, вместе с тем, выявила (помимо недостаточного смешивания) причины меньшей, чем предполагалось, эффективности использования природного газа в обычном (60–100 $\text{нм}^3/\text{т}$) диапазоне его применения, к которым, в первую очередь, относится качество шихтовых материалов. К.К.Шкодиным установлено [23], что на уровень эффективности использования природного газа оказывают особенности поведения в плавке составляющих доменной шихты. Так, за счет соответствующего характера формирования ультра- и микропористости и, следовательно, замедления развития восстановительного процесса, использование природного газа при проплавке окатышей заметно уменьшается. Это следует также из выводов проф. Г.А.Воловика, показавшего, что для доменной технологии целесообразнее подавать в фурмы не водород, а углеродсодержащие добавки, способствующие оптимизации теплового состояния горна. Как следует из расчетов и анализа, выполненных Г.А.Воловиком [24], углеводородные топливные добавки обеспечивают поступление в доменную печь определенного количества водорода, доля которого, судя по термодинамическим условиям горна, должна быть ограничена некоторым уровнем, а замена доменного кокса должна обеспечиваться освоением соответствующих углеродсодержащих добавок. Показано [24], что с увеличением расхода природного газа в печи увеличивается преимущественно степень использования окиси углерода (η_{CO}), а не водорода (η_{H_2}), то есть, более целесообразно увеличивать количество вдуваемых в печь углерод-, а не водородсодержащих компонентов. Как показано

Н.Л.Гольдштейном [25], при наличии водорода уже вскоре после начала накопления в печи паров воды от процессов восстановления, в составе печного газа сумма H_2+H_2O будет близка к равновесной и кинетические характеристики водорода реализуются недостаточно полно.

Исследованиями процесса плавки весьма сложной по составу шихты в доменных печах ЧерМК экспериментально выявлено ухудшение результатов плавки при наличии в шихте даже небольшого (20–30%) количества окатышей [26]. В текущих условиях доменной плавки коэффициент замены кокса природным газом принимается равным 0,7–0,8 кг/м³ при вдувании газа до 100 м³/т чугуна. Из опубликованных экспериментальных данных [27], в том числе, данных полученных ИЧМ [28–30], известно, что при попадании метана (основного компонента природного газа) в нагретую струю дутья еще в полости фурмы идет постепенное отделение от него атомов водорода. Часть водорода, последовательно отделяющаяся от молекул метана, концентрируется в периферийной зоне у стен (явление «вывеивания»), что подтверждено его повышенным содержанием в этой зоне. Это явление усиливает неоднородность состава и свойств фурменного газа по сечению горна. Последовательное отделение водорода от молекул метана и от других, составляющих природный газ молекул углеводородов, приводит к образованию весьма активных радикалов способных к полимеризации. Полное их сгорание в фурменной зоне затруднено, что не обеспечивает получение горнового газа стабильного состава. Часть углеводородов природного газа подвергается термической диссоциации с образованием радикалов и сажистого углерода, что помимо ухудшения состава горнового газа негативно влияет на проницаемость шлака, вследствие образования на нем сажистых пленок [31]. Как следует из экспериментальных данных [32], попадание природного газа, либо полностью разложившихся его продуктов в слой нагретого кокса резко усиливает его реакционные свойства, обуславливает потерю поверхностной прочности кусков и образование углеродистого мусора. Последний, наряду с сажистым углеродом, выделяющимся при термическом разложении углеводородов природного газа, сгущает шлак, снижает его текучесть и вызывает расстройство хода печи. Вследствие этих причин увеличение расхода природного газа выше уровня 100 м³/т чугуна приводит к заметному уменьшению коэффициента замены кокса газом и к ухудшению эффективности его использования.

При существующем уровне знаний о поведении углеводородов природного газа в фурменной области, основным направлением повышения эффективности его использования, является улучшение смешивания природного газа с кислородом воздуха для ограничения проникновения непрореагировавшей (либо полимеризовавшейся) части в коксовую насадку и зону размягчения–плавления. Это, в частности, обеспечивается реализацией приемов выравнивания соотношений, либо

локального пропорционирования «газ–дутье» в каждой фурме в сочетании с рациональным (соответствующим) распределением материалов на колошнике и формированием эффективных периферийной и осевой отдушин.

Несмотря на относительную техническую простоту применения природного газа задачи его эффективного использования в доменной плавке еще полностью не решены и являются предметом дальнейших исследований.

Таким образом, установленные положительные особенности развития процессов в печи при использовании комбинированного дутья на основе природного газа (увеличенное количество фурменного газа с высоким управляемым восстановительным потенциалом и возможность регулирования в достаточно широких пределах температурно–тепловых условий в горне), обуславливавшие стремление к увеличению расхода природного газа на тонну чугуна, в большинстве случаев не реализованы в широкой практике, в частности, из–за обнаруженного несоответствия предполагаемой и действительной эффективности такого технологического режима, что связано со следующими факторами:

- недостаточно высоким качеством шихтовых материалов;
- несоответствием уровня расчетной теоретической температуры у фурм увеличенному оптимальному расходу природного газа, вследствие особенностей характера превращений углеводородов и возрастающего развития перед фурмами их термического разложения;
- уменьшением коэффициента замены кокса природным газом при большом расходе газа (до 0,3–0,5 кг/м³);
- снижением стабильности и управляемости плавки при расходе природного газа более 70 нм³/т.ч.;
- повышением нестабильности состава чугуна, ввиду ухудшения свойств шлака за счет образования на нем плохо проницаемых пленок сажистого углерода и др.

Закключение. Изложенное вызывает необходимость поиска оптимального состава и условий применения комбинированного дутья, в частности, концентрации кислорода и соответствующего ей расхода природного газа. По данным [33, 34] обогащение дутья кислородом эффективно до уровня 24–26%, после которого расход кокса увеличивается, а рост производительности замедляется, несмотря на увеличение расхода природного газа. Отмечены случаи, когда при концентрации кислорода выше 25% наблюдались явления «захлебывания», ограничивавшие рост производительности и эффективности использования комбинированного дутья [33, 34]. В условиях ММК экономия кокса и производство чугуна увеличивалось при увеличении расхода природного газа до 55–60 м³/т чугуна [35]. Целесообразность оптимизации расхода природного газа на более низком уровне обосновывается в работах [11, 15, 28, 36, 37] и др. В этих работах подчеркивается, что важными лимитирующими факторами при этом яв-

ляется подготовка шихты и ее распределение по сечению печи, неравномерность распределения природного газа по фурмам и радиусу горна.

1. *Работа* доменной печи завода им. Петровского с применением природного газа / И.И.Коробов, Н.И.Красавцев, З.И.Некрасов и др. // Опыт применения природного газа в доменном производстве. – М.: Metallurgizdat, 1959.–С.7–26.
2. *Рамм А.Н.* Применение комбинированного дутья в доменной плавке // В сб. «Современные проблемы металлургии». –М.: АН СССР, 1968.– С.61–95.
3. *Рамм А.Н.* Определение технических показателей доменной плавки. Методическое руководство. –Ленинград: ЛПИ, 1971.– 111с.
4. *Касьян В.В.* Теоретическая температура горения как параметр комбинированного дутья // Сталь. –1975. –№8. –С.684–687.
5. *Борисов Ю.С.* Расчет теоретической температуры горения при комбинированном дутье в доменных печах // Сталь.– 1965.–№10.–С.884–890.
6. *Технологические* факторы, определяющие теоретическую температуру горения / Ю.М.Потебня, Р.Г.Рихтер и др. // Сталь.– 1982.– №10.– С.14–17.
7. *Юсфин Ю.С., Королева В.Л., Мышляев А.И.* Влияние расхода кокса на теоретическую температуру горения // Изв.ВУЗов. Черная металлургия.– 1991.– №5.– С.8–12.
8. *К вопросу* о методе определения оптимального расхода природного газа в доменной плавке / В.Н.Андронов и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность.– 1968.– №6.– С.5–7.
9. *Борисов Ю.С.* Соотношение прямого и непрямого восстановления железа при замене части кокса в доменной печи другими видами топлива, вводимыми через фурмы // Сб. «Форсирование доменной плавки». –М.: Металлургия, 1963.– С.230–241.
10. *Распределение* температур по радиусу горна доменной печи при вдувании природного газа / Г.А.Панев, А.Г.Кузуб и др.// Сталь.– 1966.– №3.– С.200–205.
11. *Технологические* аспекты применения в доменной плавке топливных добавок, вводимых в фурменные зоны совместно с дутьем, обогащенным кислородом. / В.Г.Воскобойников, Н.Е.Дунаев, Б.Л.Журковский и др. // Сталь.– 1980.– №10.– С.888–896.
12. *Некрасов З.И.* Эффективность применения комбинированного дутья высоких параметров // Сталь.– 1977.– №10.– С.880–883.
13. *Мойкин В.Н., Бабушкин Н.М., Боковиков Б.А.* Анализ работы доменной печи на комбинированном дутье с применением метода математического моделирования // Сталь.– 1984.– № 4.– С.9–14.
14. *Паршаков В.М., Боковиков Б.А., Шкляр Ф.Р.* Методика расчета и определения экономически выгодных уровней параметров высокотемпературного комбинированного дутья // Сталь.– 1980.– №3.– С. 169–173.
15. *Довголюк Б.П.* Основные номограммы доменного процесса. –К.: Техника, 1985.– 56 с.
16. *Товаровский И.Б.* Доменная плавка. Эволюция, ход процессов, проблемы и перспективы. –Дн–вск: Пороги, 2003.– 600 с.
17. *Коксосберегающие* технологии в доменной плавке / В.П.Лялюк, И.Г.Товаровский, Д.М. Демчук и др. –Дн–вск: Пороги, 2006.– 278 с.

18. *Андронов В.Н.* Доменная плавка на комбинированном дутье // Тр. ДОННИИЧМ.– 1957.– С.32–50.
19. *Критерии* оптимальности расхода природного газа, вдуваемого в доменную печь / Б.П.Довгалюк, В.Н.Никифоров, П.К.Лебедь и др. // Сталь. –1983. –№2.– С.6–8.
20. *Об эффективности* вдувания природного газа в фурмы доменных печей / Г.Д.Каменев, В.И.Бондаренко, В.А.Шатлов и др. // 19, 3, –С.41–43.
21. *Бабарыкин Н.Н.* Взаимосвязь между степенями использования водорода и окиси углерода в доменной печи. // Сталь. – 1973.– №8.– С.684–687.
22. *Гладышев В.И., Опорин О.П.* Выбор оптимальных решений при использовании комбинированного дутья в доменной плавке / Сб. тр. конференции ДметИ.– Дн–вск, 1983.– С.367–374.
23. *Шкодин К.К., Сафронов Н.Н., Жак А.М.* Эффективность применения природного газа при использовании агломерата и окатышей // Экспресс информация. Производство чугуна.– М.: ЦНИИ и ТЭИ ЧМ, 1975.– Сер. 4.– вып. 5.– С.8.
24. *Воловик Г.А.* Эффективность использования углерод– и водород содержащих добавок в доменной плавке // Сталь.– 1980.– №12.– С. 1062–1064.
25. *Гольдштейн Н.Л.* Водород в доменном процессе. – М.: Металлургия, 1971.– 298 с.
26. *Колмогорцев В.Б., Токарев Л.С. Проходов В.Н.* Использование окатышей с различными свойствами в доменной плавке // Металлург.– 1978.– №11.– С.11–14.
27. *Бугаев К.М.* К вопросу о пиролизе природного газа в доменной печи. Тр. ДОННИИЧМ. Металлургия чугуна. М.: Металлургия, 1969.– С.123–134.
28. *Окисление* природного газа в фурменной зоне доменной печи при различных параметрах комбинированного дутья / К.М. Бугаев и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность.– 1977.– №1.– С.5–7.
29. *Особенности* взаимодействия окислов железа с метаном. Сообщение 1. / З.И.Некрасов, Л.Я.Сидорова, Н.А.Гладков и др. // Изв. ВУЗов. Черная металлургия.– 1975.– №11.– С.15–18.
30. *Применение* хроматографического анализа при исследовании кинетики восстановления и накопления газообразных продуктов реакции / З.И.Некрасов, Н.А.Гладков, Л.Я.Сидорова и др. //Сб. «Новые исследования процессов восстановления черных металлов».– М.: Наука, 1974.– С.76–77.
31. *Некоторые* особенности теплового режима горна при работе на комбинированном дутье / А.В.Дидевич и др. // Тр. ДОННИИЧМ.– 1970.– С.68–74.
32. *Товаровский И.Г., Гладков Н.А., Нестеров А.С.* Особенности формирования расплава в условиях малококсовой доменной плавки // Сталь.–1994.– №2.– С.9–12.
33. *Investigation on effect of nature gas and oxygen in the blast furnace process / J. Sironi at all // Proc. Int. Conf. Ski and Technol. Iron and Steel. –Tokyo, 1970.– Part1.– P.202–205.*
34. *Ramachandran S., Dharnipalan S.* Fuel injection in the blast furnace //Chem. Ind. Develop, 1974.– Annual.– P.46–56.
35. *Применение* природного газа в доменных печах заводов Южного Урала / Ю.П.Волков и др. // Сталь.– 1966.– №5.– С.386–391.

36. *Расчетно–аналитическая* оценка показателей доменной плавки при снижении расхода природного газа, вдуваемого в доменную печь / Н.А.Гладков, Д.Н.Тогобицкая и др. // Сб. научн. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии».– К.: Наукова думка, 2006.– Вып. 12.– С.51–54.
37. *Взаимосвязь* показателей плавки в условиях применения многокомпонентной шихты / В.И.Большаков, Н.А.Гладков, Н.Г.Иванча и др. // Сб. научн. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии».– К.: Наукова думка, 2006.– Вып.13.– С.15–26.

*Статья рекомендована к печати:
заместитель ответственного редактора
раздела «Доменное производство»:
докт.техн.наук, проф. И.Г.Товаровский
рецензент канд.техн.наук А.Д.Джигота*

М.А.Гладков

Аналіз досвіду використання комбінованого дуття

Метою роботи є пошук оптимального складу збагаченого киснем дуття та вивчення можливості підвищення ефективності застосування природного газу в доменних печах. Показано, що ефективність використання природного газу визначається рівнем теоретичної температури газу біля фурм, коефіцієнтом заміни коксу природним газом, високою якістю змішування з дуттям, що виключає утворення сажі і полімеризацію вуглеводнів. Доцільна подальша оптимізація складу комбінованого дуття, витрат газу та умов його застосування.