

КОЧУРА В.В. (ДОННТУ), БАБИЧ А.И. (ИЧМ, Г. ААХЕН)

ЛОКАЛЬНАЯ ПОДАЧА КИСЛОРОДА В ФУРМЫ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ СЖИГАНИЯ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА*

Выполнены теоретические и экспериментальные исследования процесса горения пылеугольного топлива в условиях фурменной зоны доменной печи. Предложен метод интенсификации сжигания угольной пыли за счет локального повышения концентрации окислителя в районе выгорания коксового остатка угольных частиц и разработана конструкция воздушной фурмы.

Вдувание пылеугольного топлива (ПУТ) в доменную печь (ДП) является эффективной технологией с точки зрения снижения себестоимости чугуна, повышения производительности печи и защиты окружающей среды. Первая в Европе промышленная установка по приготовлению и вдуванию ПУТ была построена в 1980 году на Донецком металлургическом заводе [1]. В настоящее время более чем 100 пылеугольных комплексов работают в странах Европейского Союза, Китае, Японии, Корее, США и других странах с вдуванием около 200 кг/т чугуна угольной пыли [2,3].

Эффективное использование дорогостоящих комплексов пылевдувания достигается лишь при максимальном расходе угля.

Главными причинами, препятствующими увеличению количества вдуваемого в горн доменных печей ПУТ, являются обеспечение его полного сгорания в фурменной зоне и равномерного распределения по окружности печи.

Для выработки мер по интенсификации того или иного процесса необходимо, прежде всего, знать характер или область его протекания. С этой целью выполнены расчеты процесса факельного горения ПУТ в условиях фурменных зон доменной печи.

Характер процесса горения угольной пыли оценивали по безразмерному критерию [4]:

$$K_1 \cdot \delta_1 / (Nu \cdot D), \quad (1)$$

где K_1 — константа скорости горения, м/с; δ_1 — максимальный размер угольных частиц, м; Nu — диффузионный критерий Нуссельта; D — коэффициент диффузии кислорода в газовую фазу в зоне горения, м²/с.

Расчеты проводили для условий доменной плавки на атмосферном и обогащенном кислородом дутье с вдуванием в горн до 250 кг/т чугуна ПУТ различного химического и гранулометрического состава [5]. Результаты расчетов показали, что во всем диапазоне значений дутьевых параметров и характеристик ПУТ, соответствующих реальным условиям доменной плавки, значение критерия (1) больше 1. Это свидетельствует о протекании процесса горения в диффузионной области.

Экспериментальная проверка полученных теоретических результатов осуществлялась на лабораторной установке, созданной на принципах горячего физического моделирования, и позволяющей имитировать процесс сжигания угольной пыли в условиях фурменной зоны доменной печи [6,7].

Были проведены серии опытов по изучению влияния на степень сгорания угольной пыли ее расхода, температуры дутья и содержания в нем кислорода. Анализ полученных результатов свидетельствует о следующем. При увеличении расхода ПУТ от 5 до 20 г/мин (50–200 г/м³ дутья) степень сгорания снижалась на 40%. Увеличение температуры дутья от 600 до 1000°C повышает степень сгорания пыли на 10–15%. Концентрация кислорода в дутье существенно влияет на степень сгорания ПУТ. Повыше-

* Работа выполнялась под руководством профессора ДонНТУ С.Л.Ярошевского

ние содержания кислорода на 10% (с 21 до 31%) повысило степень сгорания угольной пыли на 25%.

Результаты лабораторных исследований подтверждают диффузионный характер режима горения ПУТ.

Промышленный опыт также свидетельствует о существенной интенсификации горения угольной пыли в окислительной зоне ДП при повышении концентрации кислорода в дутье [1-3, 8]. Однако существующие способы подачи кислорода не обеспечивают максимальную эффективность его использования ввиду сложности обеспечения полного смешения угольных частиц с дутьем.

Из-за неполного смешения ПУТ с дутьем предлагается увеличить концентрацию кислорода вблизи движущейся угольной струи. Несмотря на то, что некоторые аспекты этой идеи опробованы на практике на доменных печах фирм Тиссен Стил и Бритиш Стил при использовании коаксиальных трубок, их подход не обеспечивает оптимального использования кислорода. Это связано с тем, что горение частиц угольной пыли протекает в четыре стадии [9]:

$$\tau_1 = k_1 \cdot 5,3 \cdot 10^{14} \cdot T_r^{-4} \cdot d^{0,8}; \quad (2)$$

$$\tau_2 = k_2 \cdot 0,5 \cdot 10^6 \cdot d^2; \quad (3)$$

$$\tau_3 = k_3 \cdot 5,36 \cdot 10^7 \cdot T_r^{-1,2} \cdot d^{1,5}; \quad (4)$$

$$\tau_4 = k_4 \cdot 2,21 \cdot 10^8 \cdot (1 - A_c / 100) \cdot \rho_k \cdot d^{1,5} \cdot T_r^{-0,9} \cdot O_2^{-1}, \quad (5)$$

где $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4$ — время прогрева частиц до воспламенения и выгорания летучих, воспламенения и выгорания коксового остатка соответственно, с; k_1, k_2, k_3, k_4 — опытные коэффициенты, зависящие от марки угля; T_r — температура окружающей среды, К; d — средний начальный размер частицы, м; A — зольность коксового остатка, %; O_2 — объемная концентрация кислорода в дутье, м³/м³; ρ_k — кажущаяся плотность коксового остатка, кг/м³.

Повышение концентрации кислорода сказывается лишь на время протекания последней стадии. Поэтому предварительное смешение ПУТ с кислородом нецелесообразно: попадая в фурму или сопло, значительная часть ПУТ благодаря высокой локальной концентрации кислорода вокруг угольных частиц сгорает до их выхода в окислительную зону. Горение же ПУТ в фурменном приборе нежелательно из-за увеличения температуры газов и плавления золы, отклонения струи продуктов сгорания и несгоревших частиц вверх по периферии печи. Кроме того, вначале, как обычно, сгорают мелкие частицы и, следовательно, их горение происходит в более благоприятных условиях. Выгорание крупных частиц, которое происходит позднее, протекает уже в области пониженной концентрации кислорода.

Следовательно, повышать концентрацию окислителя наиболее эффективно после прогрева и выхода летучих веществ и прогрева коксового остатка, т.е. через время $\tau_1 + \tau_2 + \tau_3$. Расчеты показывают, что это время составляет 0,005–0,020 с в зависимости от характеристик ПУТ и температурно-дутьевых условий плавки.

В табл. 1 приведены результаты расчетов времени сгорания ПУТ при индивидуальной подаче технологического кислорода в фурмы для условий Донецкого металлургического завода.

Зона активной диффузии кислорода к частицам ПУТ принята равной 25% площади сечения фурмы. Эта величина при подаче ПУТ в фурму может изменяться в пределах 15–35% в зависимости от диаметров пылепровода и фурмы, конструкции узла ввода пыли.

Табл.1. Зависимость времени сгорания ПУТ от расхода кислорода

Расход кислорода, м ³ /т чугуна	Содержание кислорода в дутье, %	Локальная концентрация кислорода, %	Время τ ₄ , с	Общее время горения, с
-	21	21	0,045	0,065
20	22	26	0,035	0,055
35	23	30	0,025	0,045
50	24	35	0,020	0,040
70	25	40	0,015	0,035

Для полного сжигания 100 кг ПУТ необходимо 35–50 м³/т чугуна разведенного по фурмам кислорода при исключении обогащения им дутья.

Для обеспечения своевременного попадания кислорода в поток предварительно прогретого пылеугольного топлива нужно знать глубину его проникновения и траекторию движения в полости фурмы.

Для определения этих параметров в теории гидравлики и аэродинамики струй существуют аналитические и экспериментальные методики расчета траектории круглой струи в сносящем потоке. Так, по методике Ю.В.Иванова [4], траектория оси струи в сносящем потоке описывается уравнением:

$$\frac{a \cdot x}{d} = 195 \cdot \left[\frac{\rho_D \cdot v_D^2}{\rho_C \cdot v_C^2} \right]^{1,3} \cdot \left[\frac{a \cdot y}{d} \right]^3 + \frac{a \cdot y}{d} \cdot ctg\alpha, \quad (6)$$

где *a* — коэффициент структуры струи, учитывающий ее начальную турбулентность и степень неравномерности поля скоростей на выходе из сопла; *d* — диаметр струи в устье, мм; ρ_Д, ρ_С — плотности сносящего потока и струи, кг/м³; v_Д, v_С — скорости сносящего потока и струи, м/с; α — угол атаки струи, град; *x*, *y* — соответственно ось струи и сносящего потока, мм.

Для обеспечения максимальной пропускной способности кислорода 600 м³/ч на фурму диаметр подводящего кислородного патрубка должен составлять 12,5 мм.

Траектории осей струй кислорода и пылеугольного топлива представлены на рис. 1.

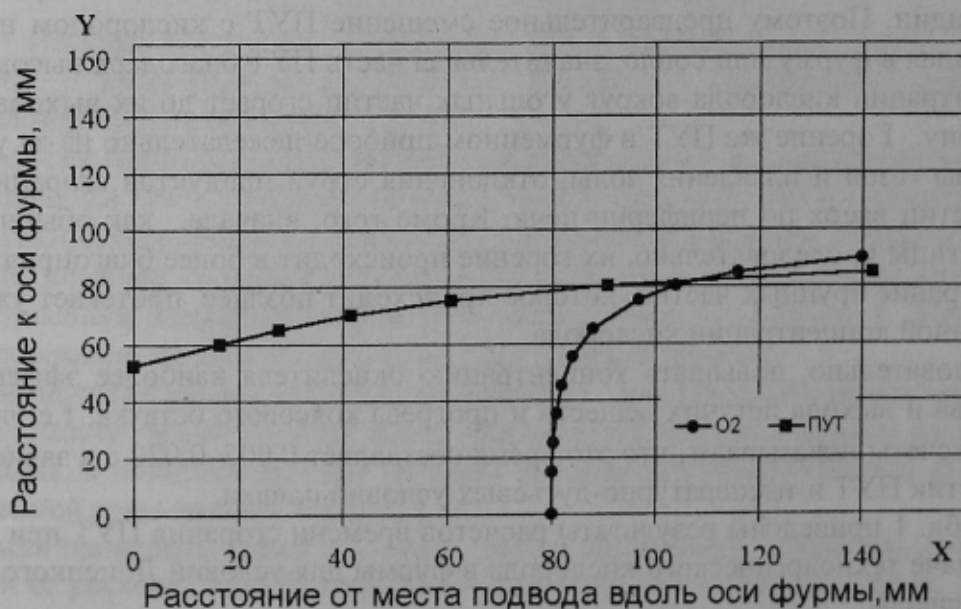


Рис. 1. Траектория струи кислорода и струи ПУТ в фурменном приборе

Для проведения исследований на ДП-1 ОАО «ДМЗ» была создана опытно-промышленная установка [7, 10]. Подача кислорода в фурму осуществлялась из кол-

лктора кислорода через кислородопровод, оснащенный необходимой арматурой и приборами.

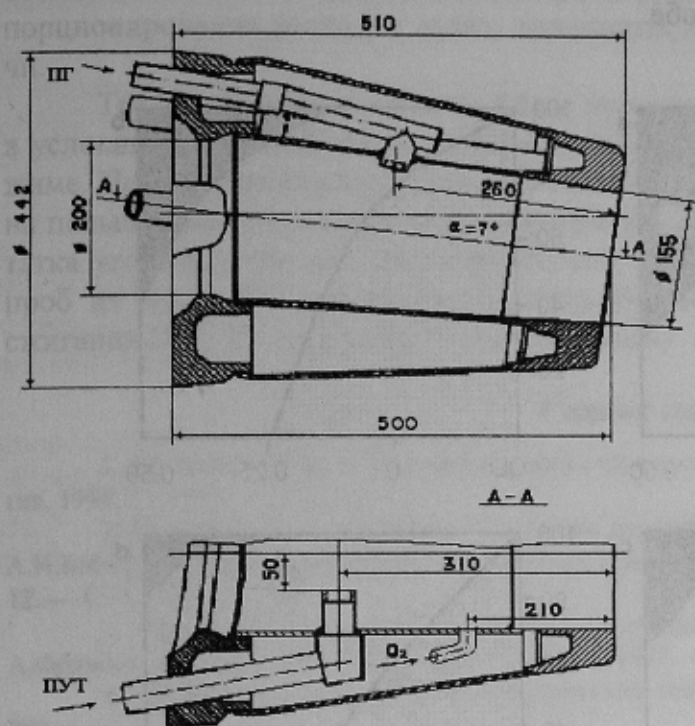


Рис. 2. Конструкция воздушной фурмы

Эффективность предложенного способа подачи кислорода оценивали с помощью количественного метода определения полноты сгорания ПУТ в фурменных зонах, который заключался в зондировании горна с отбором проб материалов из различных точек по длине фурменного прибора и окислительной зоны водоохлаждаемой трубой [7].

Исследования проводили на обогащенном кислороде до 25% и атмосферном дутье (прекращалась подача кислорода на всас воздуходувной машины). Количество подаваемого через фурму кислорода соответствовало его расходу на обогащение дутья в расчете на печь.

Каждый опыт включал два эксперимента, выполняемых последовательно с интервалом в несколько минут: зондирование горна при подаче в фурму кислорода и при его отключении.

Результаты минералогического анализа проб отобранных из горна материалов, показали, что как при подаче кислорода в фурму, так и без него в точке подвода кислорода преобладают мелкие частицы угольной пыли остроугольной формы размером 0,004–0,008 мм, реже до 0,02 мм.

На срезе фурмы, кроме, неизменных частиц ПУТ, имеются остатки его несгоревших частиц в виде тонких ободков. На расстоянии 0,25 мм от носка фурмы неизменные частицы ПУТ перестают существовать. Остаются лишь остатки от частиц пыли в виде ободков с размером 0,004–0,012 мм.

На расстоянии 0,25 и 0,50 м в пробах появляется шлак в виде округлых глобулей (кислый) и железистый. Форма частиц обычно неправильная, размеры до 0,4 мм [10].

Графики, построенные по результатам подсчета процентного содержания компонентов в исследуемых пробах, представлены на рис. 3.

Во всех опытах расход ПУТ составлял 8 т/ч, расход кислорода на обогащение дутья 6000 м³/ч, расход кислорода, подаваемого в фурму, 320 м³/ч (а и б) и 340 м³/ч (с и д).

Расход природного газа составлял 6200 м³/ч (а и б), 5500 (с и д) и 4200 м³/ч (е и ф).

Разработанная конструкция фурменного прибора с индивидуальной подачей кислорода приведена на рис. 2 [11].

Доменная печь объемом 1033 м³ в период исследований выплавляла передельный чугун на железорудной шихте, состоящей из 94% агломерата ЮГОК и окатышей ЦГОК в соотношении 1,5:1 с небольшими добавками железной и марганцевой руд. Средний расход кокса составлял 487 кг/т чугуна, пылеугольного топлива 76 кг/т, природного газа 84 м³/т, кислорода 75 м³/т.

Доменная печь оборудована системой контроля распределения дутья и ПУТ по фурмам. Давление кислорода в кислородопроводе составляло 750–1000 кПа, расход кислорода на фурму составлял 320–350 м³/ч.

Сопоставление соответствующих пар опытов показывает, что содержание частиц ПУТ на срезе фурмы при индивидуальной подаче в нее кислорода в среднем на 15–30% меньше, чем при традиционном способе.

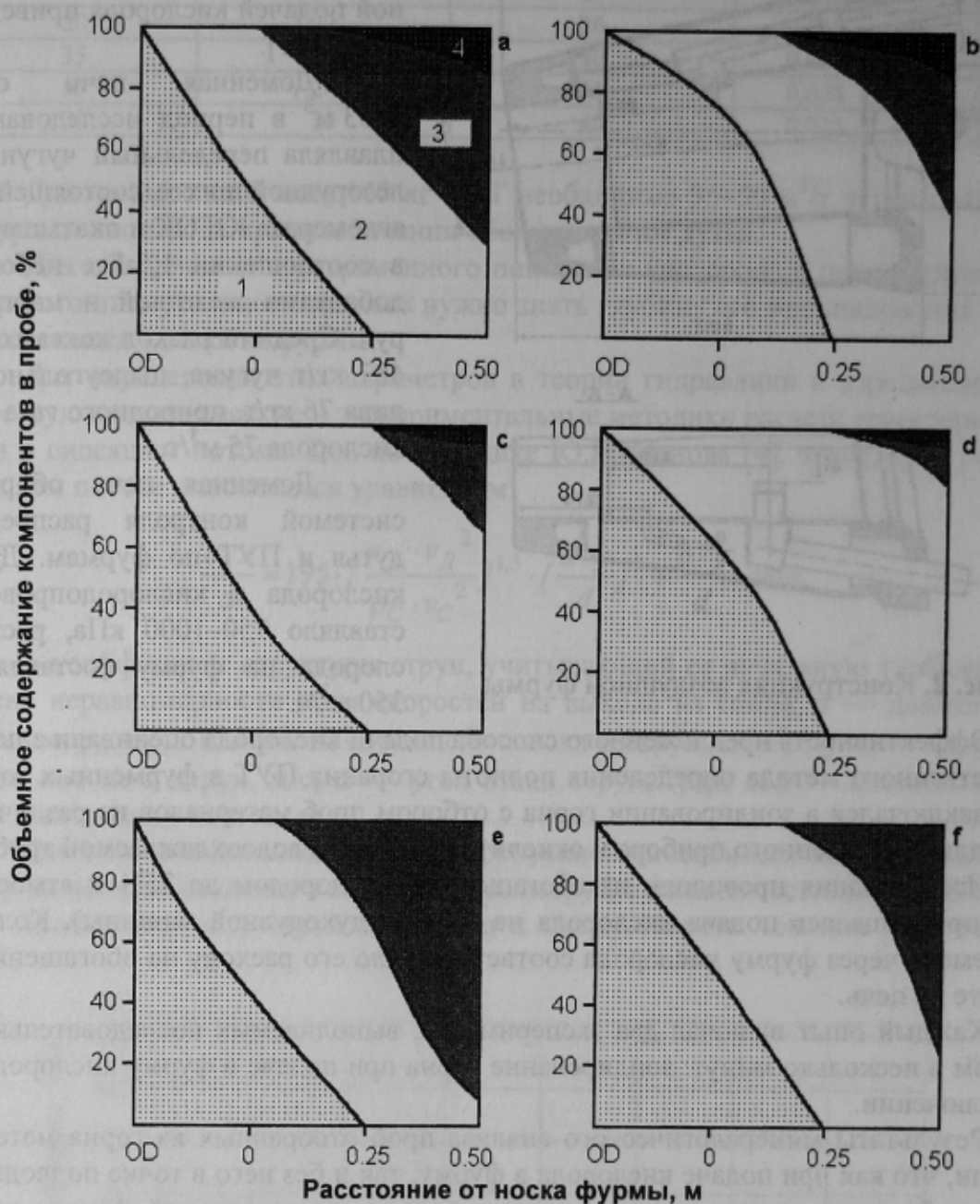


Рис. 3. Компонентный состав материалов, отобранных по радиусу горна, в зависимости от расхода кислорода, подаваемого в фурму: *a, c, и e* — опыты с подачей кислорода; *b, d, и f* — опыты без подачи кислорода; 1 — ПУТ (без изменения); 2 — остатки ПУТ (ободки); 3 — шлак; 4 — кокс; OD — точка подвода кислорода

На расстоянии 0,5 м от носка фурмы количество остатков частиц пыли в опытах с локальной подачей кислорода также меньше.

Полученные результаты исследований проб пылеугольного топлива, отобранных из различных точек по длине фурменного прибора и горна доменной печи, свидетельствуют об интенсификации сжигания угольных частиц при индивидуальном подводе кислорода в фурму.

В системе индивидуальной подачи кислорода к фурмам ДП предусмотрены подвод технологического кислорода к доменной печи, разводка кислородных трасс с необходимой запорно-регулирующей арматурой по фурмам от распределительного пункта,

расположенного на литейном дворе; автоматическое управление общим расходом кислорода и на каждую фурму; аварийное отключение с помощью быстродействующих отсечных клапанов. Предполагается также создание автоматизированной системы пропорционирования расходов дутья, топливных добавок и кислорода по окружности печи.

Таким образом, теоретические и экспериментальные исследования показали, что в условиях доменной плавки горение угольной пыли происходит в диффузионном режиме. Полная газификация больших количеств вдуваемого ПУТ может быть обеспечена повышением локальной концентрации кислорода в районе выгорания коксового остатка угольных частиц. Экспериментальные промышленные исследования с отбором проб из горна ДП подтвердили целесообразность данного способа интенсификации сжигания ПУТ по сравнению с традиционным обогащением дутья кислородом.

Список литературы

1. **Ярошевский С.Л.** Выплавка чугуна с применением пылеугольного топлива. — М.: Metallurgia, 1988. — 176 с.
2. **Состояние и перспективы технологии доменной плавки с вдуванием пылеугольного топлива / А.И.Бабич, С.Л.Ярошевский, В.В.Кочура, В.П.Терещенко // Metall и литье Украины, 1995. — № 11–12. — С. 12–18.**
3. **Производство первичного металла в странах Западной Европы / А.И.Бабич, В.В.Кочура, А.Формосо, Л.Гарсия // Metall и литье Украины, 1997. — №5. — С. 32–37.**
4. **Померанцев В.В.** Основы практической теории горения. — Л.: Энергоатомиздат, 1986. — 243 с.
5. **Расчетная оценка режима и полноты сгорания пылеугольного топлива в доменной печи / В.Н.Андронов, В.В.Степанов, А.И.Бабич, В.В.Кочура // Доменное производство. — М.: Metallurgia, 1989. — С. 39–42.**
6. **Изучение горения пылеугольного топлива в лабораторных условиях / В.В.Кочура, А.И.Бабич, О.В.Митасов и др. // Деп. в «Черметинформ», 30.04.1987, № 3976. — 11 с.**
7. **Бабич А.И., Ярошевский С.Л., Терещенко В.П.** Интенсификация использования пылеугольного топлива в доменной плавке. — К.: Техника, 1993. — 200 с.
8. **Эффективность и перспективы применения кислорода в доменной плавке / С.Л.Ярошевский, В.А.Ноздрачев, А.И.Бабич и др. // Сборник научных трудов Донецкого государственного технического университета. Metallurgia. Выпуск 8. — Донецк: ДонГТУ, 1999. — С. 39–55.**
9. **Бабий В.И., Куваев Ю.Ф.** Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 208 с.
10. **Individual delivery of process oxygen to blast furnace tuyeres / A.I.Babich, V.V.Kochura, V.A.Nozdachev, E.N.Skladanovskiy, V.V.Stepanov // Steel USSR-Eng. Tr., 1991. — Vol. 21. — No 12. — P. 538–540.**
11. **Intensifying pulverised coal combustion in blast furnace / V.V. Kochura, A.I. Babich, S.L.Yaroshevskiy // International blast furnace lower zone symposium. — Wollongong, Australia, 2002. — P. 35–47.**

© Кочура В.В., Бабич А.И., 2004

ТРОЯНСКИЙ А.А., РОСТОВСКИЙ В.И., СКРЯБИН В.Г., РАДЖИ О.И. (ДОННТУ)

ПЕРСПЕКТИВЫ КОМПЛЕКСНОЙ УТИЛИЗАЦИИ ЦИНКСОДЕРЖАЩИХ ШЛАМОВ ПО «ХИМВОЛОКНО» И ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Приведены сведения о ресурсах и состоянии использования цинксодержащих шламов ПО «Химволокно» и черной металлургии, а также возможные направления комплексной их переработки на специальных установках черной и цветной металлургии. Для разработки пирометаллургической технологии комплексной переработки отходов производства на основе анализа температур плавления, кипения и рассчитанных