

ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ КИСЛОРОДА В ДОМЕННОЙ ПЛАВКЕ

ЯРОШЕВСКИЙ С.Л. (ДОНГТУ), НОЗДРАЧЕВ В.А. (ОАО «КОНСТАНТИНОВСКИЙ МЕТЗАВОД»), БАБИЧ А.И. (ГЕРМАНИЯ), ФОРМОСО А. (ИСПАНИЯ, SENIM), КРАСАВЦЕВ А.И. (ДОНГТУ)

Рассмотрены теоретическая основа и опыт промышленного опробования технологических режимов доменной плавки с высоким расходом низкочольного пылеугольного топлива (ПУТ) и расходом кокса на 1 т чугуна 270–350 кг. При этом компенсация негативного влияния ПУТ на технологию обеспечивается, прежде всего, обогащением дутья кислородом и повышением его температуры, улучшением качества железорудной шихты, кокса и ПУТ, оптимизацией технологического режима.

В 70—80-х годах применение кислорода в доменных печах Украины было массовым. Годовой его расход на весь выплавляемый чугун превышал 5 млрд. м³, что обеспечивало экономию 3,5–4,0 млн. т кокса, соответственный прирост производства чугуна.

В последние годы по разным причинам использование кислорода резко сократилось, что стало одной из причин снижения объема производства чугуна в 2,5–3 раза, резкого снижения эффективности плавки: большинство кислородных блоков на металлургических предприятиях в настоящее время простаивают.

В связи с изложенным, несомненный интерес представляет теоретическая разработка и промышленный опыт массового использования кислорода для интенсификации сгорания и повышения эффективности применения ПУТ в доменной плавке.

1. Основные положения теории и практики полной и комплексной компенсации негативных изменений технологии, определяемых горением ПУТ и снижением доли кокса в шихте

Горение ПУТ и замена им кокса неизбежно сопровождается ухудшением определяющих параметров доменной технологии: снижением доли кокса в шихте и, соответственно, ухудшением порозности и газопроницаемости шихты, снижением теоретической (и реальной) температур в фурменной зоне, снижением содержания кислорода в горновом газе по длине фурменной зоны и прочее. Поэтому без применения специальных компенсирующих мер оптимальный расход ПУТ обычно не превышал 30–50 кг/т чугуна [1, 2, 3].

Однако, поскольку последствия вдувания ПУТ можно рассчитать, параллельно с увеличением его расхода можно применять соответствующие изменения, т.н. «компенсирующие мероприятия», которые нейтрализовали бы указанное негативное действие ПУТ и способствовали повышению его оптимального расхода при сохранении и улучшении показателей базового технологического режима.

При оценке комплекса технологических условий, определяющих эффективность применения ПУТ, для характеристики теплового режима горна приняли полученное из уравнения теплового баланса для нижней зоны теплообмена уравнение

необходимой теоретической температуры горения [4, 5] (индекс «0» для исходных, индекс «1» для новых технологических условий):

$$t_1 = t_n + \left(1 - 0,7 \cdot \frac{r_{d_0} - r_{d_1}}{r_{d_0}} \right) \cdot \frac{K_0}{K_1} \cdot \frac{V_0}{V_1} \cdot (t_0 - t_n), \quad (1)$$

где: t_0 и t_1 — необходимая теоретическая температура горения, при которой обеспечивается сохранение базовой температуры продуктов плавки, $^{\circ}\text{C}$; r_{d_0} и r_{d_1} — степень прямого восстановления, в долях единицы; V_0 и V_1 — выход горновых газов, $\text{м}^3/\text{т}$ кокса; K_0 и K_1 — расход кокса, $\text{кг}/\text{т}$ чугуна; t_n — температура в зоне замедленного теплообмена, $^{\circ}\text{C}$.

Для характеристики газодинамического режима использовали уравнение А.Н. Рамма [6, 7]:

$$P_1 = P_0 \cdot \frac{V_{r_0}}{V_{r_1}} \cdot \left(\frac{\gamma_0 \cdot Q_0}{\gamma_1 \cdot Q_1} \right)^{0,5} \cdot \left(\frac{d_0}{d_1} \right), \quad (2)$$

где: P_1 и P_0 — производительность доменной печи, %; V_{r_0} и V_{r_1} — выход горновых газов, $\text{м}^3/\text{т}$ чугуна; Q_0 и Q_1 — температура горновых газов, $^{\circ}\text{C}$; γ_0 и γ_1 — плотность горновых газов, $\text{кг}/\text{м}^3$; d_0 и d_1 — относительная газопроницаемость шихты, %.

Для характеристики хода восстановительных процессов и изменения величины замены использовали уравнение Б.И. Китаева [8]:

$$D_1 = D_0 \cdot \left(1 - e^{-0,63\tau_k} \right), \quad (3)$$

где: D_1 и D_0 — равновесная и фактическая степень использования восстановительной энергии газа, в долях единицы; τ_k — время контакта газов с окислами железа, с.

Для расчета времени сгорания частиц ПУТ использовали следующую методику [9]:

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

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

$$\tau_3 = k_3 \cdot 5,36 \cdot 10^7 \cdot T_r^{-1,2} \cdot d^{1,5}, \quad (6)$$

$$\tau_4 = k_4 \cdot 2,21 \cdot 10^8 \cdot \frac{100 - A_k^c}{100} \cdot \frac{\rho_k \cdot d^2}{T_r^{0,9} \cdot O_2}, \quad (7)$$

где: $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4$ — время прогрева частиц до воспламенения летучих, выгорания летучих, нагрева до температуры 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_k^c — зольность коксового остатка, %; O_2 — объемная концентрация кислорода, доли единицы; ρ_k — кажущаяся плотность коксового остатка, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Суть методики заключается в расчете времени указанных стадий горения и их последующем суммировании.

Из анализа приведенных уравнений, результатов опытных и промышленных плавов, проведенных в Украине и за рубежом, следует, что при величине суммарного коэффициента замены (ΣK_3) 1,0 и более повышение расхода ПУТ не вызывает ухудшения комплекса технологических условий, определяющих производительность доменной печи, степень использования восстановительной способности горновых газов, длительность и полноту сгорания дополнительного топлива, условия восстановления оксидов железа и перегрева продуктов плавки*.

Следовательно, при величине суммарного коэффициента замены 1,0 и более по мере увеличения расхода ПУТ не происходит негативных изменений в состоянии технологического режима, которые бы снижали эффективность применения ПУТ и ограничивали величину его оптимального расхода.

Таким образом, комплексными компенсирующими мероприятиями могут быть улучшение качества железорудной шихты, кокса и ПУТ, повышение давления и температуры дутья, содержания в нем кислорода, снижение влажности и т.д.

В современных технологических условиях резервы повышения показателей плавки и комплексной компенсации за счет улучшения качества железорудных материалов, повышения давления и температуры дутья, как правило, исчерпаны. Так, в доменных печах Европы в 90-х годах нормой стали выход шлака на 1 т чугуна 200–300 кг, содержание мелочи 0–5 мм в скиповом агломерате — 1–5%, температура дутья 1200–1280⁰С [5, 10]. В таких условиях наиболее значительным резервом комплексной компенсации остается повышение содержания кислорода в дутье. Изменение данного параметра при вдувании ПУТ определяет, наравне с компенсацией снижения температуры горения и выхода горновых газов, компенсацию ухудшения газодинамики, сохранение содержания кислорода в зоне горения и условий сгорания ПУТ, улучшение условий восстановления оксидов железа и т.д.

Наиболее трудным компонентом компенсации является сохранение условий сгорания ПУТ в фурменных зонах. Расчеты по уравнениям (4)–(7) показывают, что снижение фракционного состава ПУТ от 0,2 до 0,06 мм, в сочетании с обогащением дутья кислородом до 30% могут обеспечить снижение времени сгорания частицы ПУТ от 0,6–0,8 до 0,03–0,05 с, т.е. в 20 раз и более.

Обогащение дутья кислородом является основным элементом технологии как при применении ПУТ на основе традиционных доменных оборудования и технологии, так и при разработке перспективных технологических режимов на основе технического кислорода и ПУТ.

2. Использование ПУТ и кислорода в традиционной технологии доменной плавки

Вдувание ПУТ

В настоящее время в странах Европы, Азии, Северной Америки обычной практикой является вдувание 180 кг/т чугуна пылеугольного топлива (ПУТ) при расходе кокса 320 кг/т чугуна. Характерные условия и показатели работы печей при этом следующие:

- доля коксового орешка, включаемая в указанный выше расход кокса — 0–50 кг/т чугуна;
- концентрация кислорода в дутье — 23–30%;
- содержание летучих веществ (ЛВ) в угле — 10–35%;

* (ΣK_3) определяется делением суммарного снижения расхода кокса, полученного от вдувания ПУТ и осуществления компенсирующих мероприятий, на расход ПУТ

— удельная производительность — 2,1–2,8 т/(м³сут.)^{*}.

В 1997 г. 135 из 68 работавших доменных печей ЭЭС вдували ПУТ. Поскольку работа европейских доменных печей достаточно известна, остановимся на показателях работы испанских печей, начавших вдувание угля недавно, и доменных печей фирмы «Hoogovens» (Голландия), имеющей в последние годы наибольший прогресс [11, 12].

Компания «ACERALIA», Испания в 1996—1997 гг. построила 2 новые доменные печи на заводе в г. Gijon взамен старых. Обе печи имеют одинаковые конструктивные характеристики ДП-В была задута в октябре 1996 г. Качество агломерата, окатышей, угля, кокса, показатели температурно-дутьевого режима в полной мере отвечают требованиям современного технического уровня, освоенного в 90-х годах лучшими доменными цехами Европы (таблицы 1–3) [11].

В декабре 1996 г. начали пробовать вдувать ПУТ. Темпы освоения пылеугольной технологии на этой печи в 1997 г. представлены данными таблицы 4. Среднегодовой в 1997 г. расход ПУТ составил 110 кг/т чугуна при расходе кокса 390 кг/т чугуна и производительности 6045 т/сутки или 2,57 т/(м³сут). В конце 1997 г. перешли на вдувание смеси углей с высоким и низким содержанием ЛВ (таблица 3).

ДП-А на заводе Gijon была задута в ноябре 1997 г. В декабре 1997 г. среднемесячный расход ПУТ составил 80 кг/т чугуна, расход кокса — 412 кг/т чугуна.

Таблица 1 - Химический состав агломерата, в процентах

Содержание компонентов	Содержание, %	
	Голландия	Испания
Fe _{общее}	58,8	56,5–57,0
Fe ⁺²	8,9–9,9	4,2–5,3
SiO ₂	4,65–4,75	5,35–5,75
CaO	9,15–9,30	9,5–9,3
CaO/SiO ₂	1,93–1,99	1,66–1,90
MgO	1,54	1,5–1,9
Al ₂ O ₃	1,40	1,2–1,5

Таблица 2 - Химический состав окатышей

Тип	Содержание компонентов, %								
	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	S	P	Na ₂ O ₃	K ₂ O
Основные (LKAB)	67,0	2,00	—	—	1,50	—	0,010	0,06	0,030
Офлюсованные (LKAB)	66,3	1,94	0,81	1,61	0,37	—	0,06	0,02	—
Офлюсованные (HISpanoBRAS)	65,9	2,37	0,44	2,53	0,06	0,05	0,026	0,01	0,012
Кислые (Испания)	65,2	5,10	0,42	0,75	0,20	0,08	0,012	0,03	0,018

Таблица 3 - Анализ углей для приготовления ПУТ на заводе Gijon

Тип угля	Влага, %	Зола, %	Легучие, %	Сера, %	Щелочи, %
Уголь А (60% в смеси)	7,34	6,78	37,9	0,62	0,157
Уголь Б (40% в смеси)	8,56	8,53	13,2	0,55	0,178

* Расчет на 1 м³ рабочего объема печи (до уровня оси воздушных фурм).

Полная компенсация вдувания в горн 142 кг/т чугуна ПУТ на доменной печи «В» была обеспечена приростом температуры дутья на 100⁰С, содержания в нем кислорода на 3,2%, давления газа на колошник на 0,28 атм., качественным улучшением химического состава горнового газа по содержанию водорода по сумме восстановителей, снижением расхода сырого флюса и выхода шлака (таблица 4).

Таблица 4 - Показатели работы печи «В» Gijon (Испания)

Показатели	1996	Январь	Февраль	Июнь	Сентябрь
1	2	3	4	5	6
Производительность, т·м ³ /сут	1,76	2,39	2,45	2,61	2,74
Кокс, кг/т чугуна	514,6	456,8	406,1	381,5	360,4
Агломерат, кг/т чугуна	1062,7	1094,0	991,6	986,7	964,3
Окатыши, кг/т чугуна	425,7	383,7	511,4	449,4	495,0
Руда, кг/т чугуна	136,5	184,3	120,3	170,6	168,4
Флюс, кг/т чугуна	16,1	7,3	6,4	0,1	6,5
Дутьевой режим:					
Расход, м ³ /т чугуна	1073	1144	1038	989	989
Температура, °С	1080	1138	1171	1157	1180
Давление кг/см ²	3	3,33	3,27	3,47	3,56
Влага, г/м ³	29,0	29,6	34,4	28,2	33,3
Обогащение O ₂ , %		0,23	1,07	2,43	3,2
ПУТ, кг/т чугуна		50,6	95,7	121,2	144,4
Колошниковый газ:					
Температура, °С	155	155	155	156	169
Давление кг/см ²	1,63	1,77	1,91	1,90	1,91
CO, %	21,91	21,25	21,24	21,39	22,52
CO ₂ , %	19,54	20,05	19,73	20,74	21,38
H ₂ , %	2,43	3,04	3,37	2,69	4,41
N ₂ , %	56,12	55,67	55,67	55,18	51,69
Химический состав чугуна, %:					
Si	0,692	0,553	0,710	0,554	0,529
Mn	0,386	0,397	0,344	0,525	0,500
S	0,031	0,032	0,027	0,028	0,029
C	4,716	4,760	4,783	4,733	4,710
Температура, °С	1521	1494	1505	1489	1485
Выход шлака, кг/т чугуна	290	277	248	242	249
Состав шлака, %:					
CaO	39,92	40,83	40,39	40,19	40,75
SiO ₂	35,61	34,98	35,48	35,38	35,62
MgO	8,00	7,72	7,78	7,04	7,67
Al ₂ O ₃	11,71	11,66	11,64	12,45	10,91
S	0,77	0,75	0,86	0,91	0,89
FeO	0,49	0,57	0,44	0,49	0,52
MnO	0,39	0,45	0,33	0,55	0,54
K ₂ O	0,46	0,37	0,37	0,41	0,41
Na ₂ O	0,17	0,12	0,17	0,20	0,17
TiO ₂	0,45	0,44	0,42	0,45	0,47
Основность шлака, CaO/SiO ₂	1,12	1,17	1,14	1,13	1,15

Показатели	1996	Январь	Февраль	Июнь	Сентябрь
1	2	3	4	5	6
Комплексные расчетные показатели:					
Расход сухого дутья, м ³ /т чугуна	1258,0	1225,8	1235,4	1213,7	1099,8
Выход сухого колошникового газа, м ³ /т чугуна	1868,0	1836,1	1874,4	1786,0	1693,7
Степени использования:					
СО	47,1	48,5	48,2	49,2	48,7
Н ₂	42,6	47,0	52,8	66,7	50,4
Отношение степеней использования n_{CO}/n_{H_2}	0,904	0,968	1,097	1,354	1,035
Углерод кокса, дошедший до Фурм, кгС _ф	307,8	263,3	239,3	232,1	194
Коэффициент использования тепловой энергии:					
Углерода, %	26,34	39,91	39,75	39,34	38,58
Полезный расход тепла, ккал/т	2250,6	2253,687	2251,3	2202,363	2216,3
КПД тепла, %	85,6	85,4	83,7	80,7	85,0
Суммарный выход газов восстановителей м ³ /т чугуна	612,3	644,7	703,14	733,37	680,2
Потери тепла: ккал/кг	378,40	384,44	437,96	528,16	390,81
%	14,30	14,57	16,29	19,34	14,99
Теоретическая температура горения, °С	2271	2217	2124	2149	2118
Объемная доля кокса:					
в шихте, %	55,86	51,70	49,29	48,13	46,25
R_d , %	50,0	47,8	45,2	34,9	41,4
Расход условного топлива топлива, кг/т чугуна	525,20	523,43	522,22	525,70	523,43
Приведенный коэффициент замены кокса ПУТ	—	0,83	1,00	0,93	0,96

Об эффективности освоенного технологического режима свидетельствуют высокий прирост производительности: 2–3% на 1% прироста кислорода, сохранение базового коэффициента замены кокса топливом, расхода условного топлива, повышение степени использования восстановительной способности газа (η_{CO} — +1,6%), сохранение на высоком базовом уровне качества чугуна, КПД использования тепла и т.д.

Следует отметить существенное снижение степени прямого восстановления оксида железа — 8,5%, свидетельствующее о благоприятном изменении восстановительных процессов в печи: указанные изменения являются прямым следствием улучшения химического состава горнового газа, благоприятного изменения технологических факторов $P_{коль}$, $V_{гг}$, $I_{плавки}$ и др. — способствующих оптимизации и стабилизации газораспределения в печи и схода шихты.

Некоторое снижение уровня теоретической температуры горения и улучшение условий десульфурации чугуна в печи являются следствием снижения показателя r_d и комплексной оптимизации технологического режима (таблица 4).

Фирма «HooGovens Igmuiden» (Голландия) с 1983 г. использует вдувание ПУТ на обеих своих печах (ДП-6 с $d_r = 11,0$ м и ДП-7 с $d_r = 13,83$ м), добившись рекордных показателей по расходу угля — 212 и 215 кг/т соответственно [13].

В 1996 г. построен третий пылеугольный комплекс мощностью, как и первые два, 50 т/час. Это обеспечивает возможность регулярного вдувания более 200 кг/т чугуна ПУТ на каждую печь.

В первые месяцы 1997 г. обе печи работали с расходом ПУТ 215 и кокса — до 280 кг/т чугуна при обогащении дутья кислородом до 29% (ДП-6) и 27% (ДП-7).

Несмотря на то, что доменная печь Аманда в г. Ашленде работает с вдуванием ПУТ с 1963 года, на других печах США эта технология не использовалась.

В США широкое промышленное внедрение технологии с вдуванием ПУТ началось с 1990—1992 гг., когда резко возросло число подлежащих реконструкции коксовых батарей. В то же время в США имеется достаточное количество энергетических углей, пригодных для вдувания в горн [14].

В результате за 3 года (1993—1996) в США построено 6 комплексов по приготовлению ПУТ годовой мощностью 4,3 млн. т. В настоящее время вдувание угольной пыли осуществляется на 13 доменных печах.

Среднемесячные результаты работы некоторых ДП США с лучшими технико-экономическими показателями приведены в таблице 5.

Фактический коэффициент замены кокса ПУТ составляет 0,8–1,0 кг/кг.

Внедрение вдувания ПУТ на 12 ДП снизило потребление в США кокса, природного газа, мазута и смолы на 0,7; 0,4; 0,5 и 0,1 млн. т в год соответственно.

Совместное вдувание дополнительных топлив

Известен многолетний опыт Донецкого металлургического завода по одновременному вдуванию в горн пылеугольного топлива и природного газа [4, 5, 13, 15].

В технологических условиях доменной печи № 1 Донецкого металлургического завода обогащение дутья кислородом от 22,5 до 25–27% сопровождалось увеличением расхода пылеугольного топлива на 4,9–13,7 кг/т чугуна и природного газа на 13,9–27,8 м³/т чугуна. Суточная производительность доменной печи при этом повысилась на 97,5–99,2 т, что составило 1,6–1,8% на 1% прироста кислорода в дутье. Расход кокса на 1 т чугуна сократился на 74,4 кг (16,5%), условного топлива — на 15,7–28,9 кг (2,8–5,7%) (таблица 6).

Вдувание в горн ПУТ и ПГ при работе доменной печи на обогащенном кислородом дутье способствовало снижению расхода кокса на 25–30%. Полная и комплексная компенсация негативных изменений технологического режима, определяемых применением ПУТ и ПГ, была обеспечена, прежде всего, повышением температуры дутья и содержания в нем кислорода, оптимизацией технологического режима плавки.

Ряд печей за рубежом работают с одновременным вдуванием ПУТ и природного газа, ПУТ и мазута, мазута и смолы. В США существует тенденция вдувания ПУТ в качестве основного заменителя кокса с добавлением другого инжестируемого топлива. Рассмотрим такую технологию на примере работы ДП-13 завода «Gary» фирмы «US Steel» (диаметр горна — 11,13 м, 3 чугунные летки). Вдувать ПУТ на этой печи начали в 1993 г. Расход угля за 9 месяцев составил около 200 кг/т чугуна [16]. В первые 3 месяца 1994 г. расход ПУТ составил 215 кг/т чугуна. С апреля 1994 г. начали совместно вдувать ПУТ и мазут [17].

В таблице 7 представлены 4 периода работы печи. В первом периоде основным вдуваемым топливом был мазут. Во втором периоде вдували только ПУТ; производительность печи занижена из-за простоев; фактическая суточная производительность превышала 9000 т, чему способствовало обогащение дутья кислородом. В 3-м и 4-м периодах печь работала с одновременным вдуванием ПУТ и мазута. Ста-

Таблица 5 - Показатели работы некоторых доменных печей США с вдуванием пылеугольного топлива (ПУТ)

Фирма	Island Steel			U.S. Steel			AK Steel	USS/Kobe
	Indiana Harbor Works			Gary Works				
Завод	№ 5 BF	№ 6 BF	№ 7BF	№ 4 BF	№ 6 BF	№ 8 BF	Ashland	Lorain
Доменные печи							Amanda	№ 3 BF
Производительность, т/(м ³ ·сутки)	2,24	2,05	2,35	2,36	2,00	2,37	2,41	2,29
Кокс, кг/т	342	387	284	302	289	353	342	310
Кокс. Орешек, кг/т	44	34	26	34	48	32	28	28
Всего кокса, кг/т	336	421	310	336	337	385	370	338
Дополнительное топливо:								
ПУТ, кг/т	114	61	166	164	162	131	163	181
ПГ, кг/т	—	11	—	—	—	—	12	—
Температура дутья, °С	1093	871	1264	1041	961	962	1049	1076
Влажность дутья, г/м ³	27	23	19	20	23	23	40	19
O ₂ в дутье, %	23,6	23,9	24,8	25,4	25,1	25,4	26,3	23,6
Выход шлака, кг/т	239	232	274	236	230	248	205	190
(CaO+MgO)/(SiO ₂ +Al ₂ O ₃)	1,08	1,08	1,09	1,15	1,08	1,08	1,06	1,01
Чугун:								
Температура, °С	1460	1471	1494	1474	1472	1473	1470	1479
Кремний, %	0,58	0,73	0,34	0,76	1,10	0,66	0,66	1,06
Сера, %	0,039	0,031	0,035	0,051	0,049	0,052	0,052	0,060

бильная работа печи и коэффициент замены кокса дополнительным топливом, равный 1,0 кг/кг, достигались при расходе мазута 30–35 кг/т чугуна. Доля замены кокса ПУТ и мазутом составила в 3–4-м периодах 40–45%.

Таблица 6 - Показатели работы доменной печи № 1 ДМЗ при вдувании в горн природного газа и пылеугольного топлива при обогащении дутья кислородом

Показатели	Периоды			
	I	II	III	IV
Продолжительность работы печи, сутки	10	29	9	15
Производительность печи, т/сутки	1782	1770,1	1867,6	1869,3
Расход сухого кокса, кг/т чугуна	519,9	453,5	379,2	379,2
Расход сухих материалов, кг/т чугуна:				
Агломерат ЮГОК	958,2	839	819,7	675,9
Окатыши ЦГОК	442,6	57	697,6	650,7
Железная руда	56	33	72,2	68,2
Известняк	141	147	157,1	150,3
Дутьевой режим:				
Давление, кПа	242	226	210	231
Температура, °С	1067	1101	1093	1110
Содержание кислорода, %	22,5	22,5	25,3	26
Расход кислорода, м ³ /т	24,5	25,5	68,1	80,1
Расход природного газа, м ³ /т	75,2	72,4	86,3	100,2
Расход ПУТ, кг/т	0	72	85,7	76,9
Колошиковый газ:				
Температура, °С	257	265	278	279
Давление, кПа	127	122	105	125
Состав, %	—	—	—	—
CO ₂	14,7	15	16,9	17,2
CO	25,1	24,0	26	25,7
H ₂	5,8	7	7	8,3
Химический состав чугуна, %:				
Si	0,76	0,75	0,74	0,77
Mn	0,64	0,76	0,86	0,91
S	0,03	0,037	0,033	0,03
Основность, CaO/SiO ₂	1,28	1,28	1,25	1,26
Выход шлака, кг/т чугуна	425,3	425,3	459,4	459,3
Степень прямого восстановления r_d , %	33,2	26,1	29,5	26,7
Степень использования CO, %	36,9	38,5	39,4	40,1
Теоретическая температура горения, °С	2067	1993	1977	1916
КПД тепла, %	82,1	82,4	82,4	82,9
Расход условного топлива, кг/т чугуна	601,9	597,7	582	563,8

Основная комплексная компенсация нарушений технологического режима, определяемых вдуванием в горн до

Таблица 7 - Показатели работы ДП-В завода «Gary», США

Показатели	Период			
	Сентябрь — ноябрь 1992 г.	Октябрь — декабрь 1993 г.	Май 1995 г.	Июнь 1995 г.
1	2	3	4	5
Производительность, т/сут	7665	7193	8820	8172
Количество рабочих часов	2110	2105	738	676
Расход топлива, кг/т чугуна:				
Кокса	355	290	275	270
Коксового орешка	35	44	11	11
ПУТ	0	194	188	190
Мазут	84	0	31	35
Всего вдуваемого топлива	92	194	226	231
Температура дутья, °С	1126	1119	1147	1147
Количество сгоревших фурм, шт.	11	5	1	0
Температура колошника, °С	131	143	149	151
Выход шлака, кг/т чугуна	264	276	268	256
Чугун:				
Si, %	0,39	0,56	0,36	0,41
S, %	0,056	0,063	0,040	0,066
Температура, °С	1477	1481	1481	1483
Расход шихтовых материалов, кг/т чугуна:				
Агломерата	1202	1158	1229	1201
Окатышей	341	477	334	305
Скрапа	37	53	23	42
Система загрузки	КККРРР	ККРРР	ККРРР	ККРРР

3. Перспективные технологии доменной плавки на основе вдувания пылеугольного топлива и кислорода

Обоснование актуальности разработки перспективных технологий

Повышение дефицитности и стоимости природного газа в Украине определили значительное сокращение его расхода на выплавку чугуна.

Сокращение расхода и вывод из состава дутья природного газа неизбежно затрудняют использование высокого кислородно-температурного потенциала горна, определяют значительный прирост степени прямого восстановления оксида железа (+10–20%). Выходом из сложившейся ситуации может быть вдувание природного газа или нового компонента дутья, который по своему воздействию на технологию аналогичен природному газу.

Функции указанного компонента дутья могут выполнить колошниковый газ, содержащий минимальное количество азота, из которого удалены диоксид углерода до уровня 3–5% и пара — до 0,5–1,0% — т.е. очищенный колошниковый газ (ОКГ), а также конвертерный (КГ) или коксовый газы (рисунки 1, 2).

В настоящее время известны эффективные промышленные методы очистки газов от CO₂ и H₂O и нагрева их до 1000–1200⁰С [18]. Решение проблемы производства ОКГ создает предпосылки для качественного скачка в развитии доменной технологии на Украине, поскольку в этом случае в комплексе решаются задачи максимально эффективного использования имеющихся мощностей по производству чугуна, нагреву горячего дутья и обогащению его кислородом, отказа от применения для

вдувания в горн ПГ и высвобождения его для нужд народного хозяйства 1,5–2,0

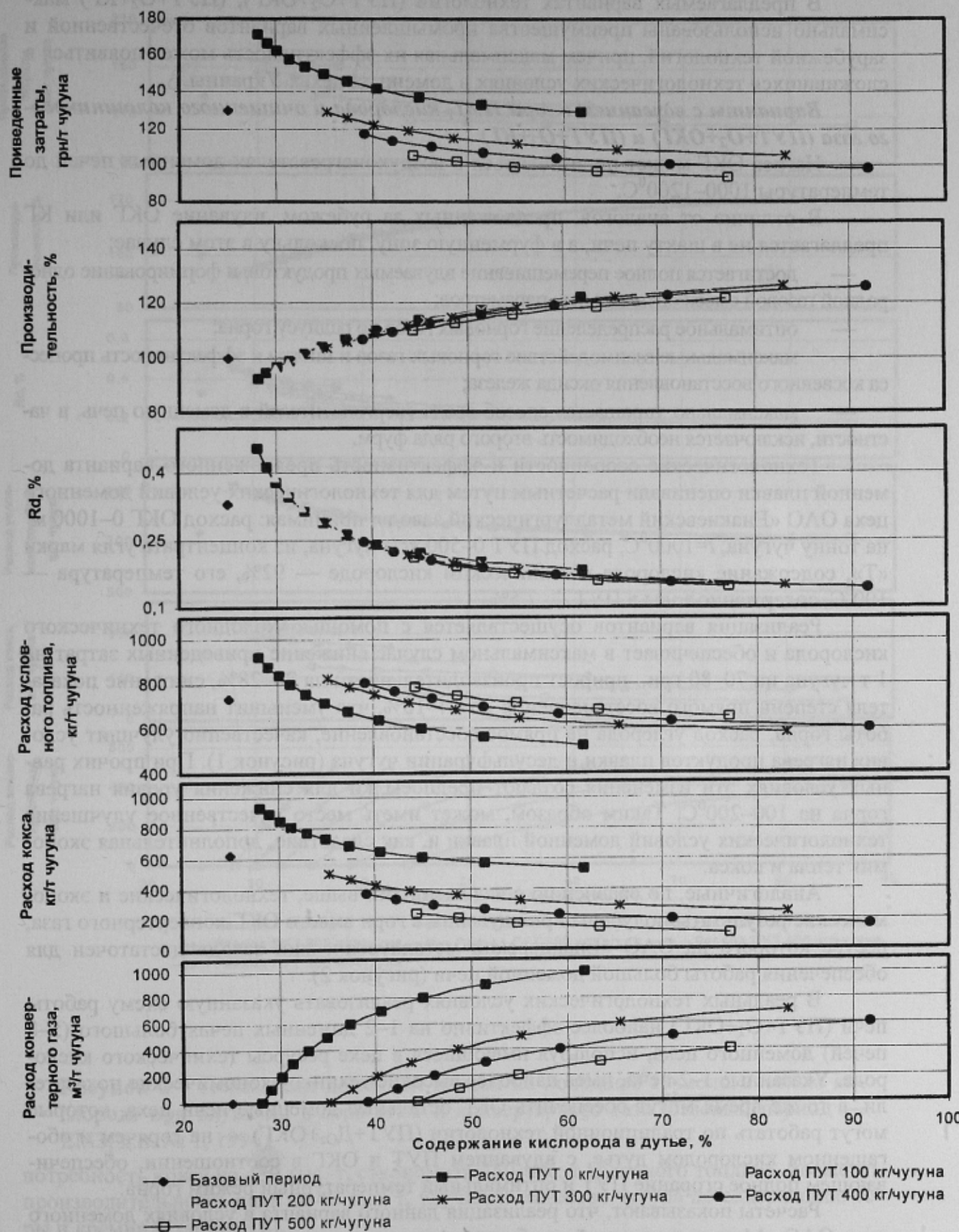


Рисунок 1 – Показатели доменной плавки на холодном технологическом кислороде при вдувании в горн ПУТ и ОКД (базовый период — ЕМЗ, д.п. № 1, 1996)

млрд м³/год, значительного повышения эффективности доменной плавки.

В предлагаемых вариантах технологии (ПУТ+O₂+ОКГ), (ПУТ+O₂+КГ) максимально использованы преимущества промышленных вариантов отечественной и зарубежной технологий, причем максимальная их эффективность может появиться в сложившихся технологических условиях в доменных цехах Украины.

Варианты с вдуванием в горн ПУТ, кислорода и очищенного колошниково-го газа (ПУТ+O₂+ОКГ) и (ПУТ+O₂+КГ)

Нагрев ОКГ может производиться в воздухонагревателях доменных печей до температуры 1000–1200⁰С.

В отличие от аналогов, предложенных за рубежом, вдувание ОКГ или КГ предлагается не в шахту печи, а в фурменную зону, поскольку в этом случае:

- достигается полное перемешивание вдуваемых продуктов, и формирование однородной газовой смеси оптимальных параметров;
- оптимальное распределение горновых газов по радиусу горна;
- максимальное взаимодействие горновых газов и шихты и эффективность процесса косвенного восстановления оксида железа;
- максимально упрощается способ ввода энергоносителей в доменную печь, в частности, исключается необходимость второго ряда фурм.

Технологические особенности и эффективность предложенного варианта доменной плавки оценивали расчетным путем для технологических условий доменного цеха ОАО «Енакиевский металлургический завод», принимая: расход ОКГ 0–1000 м³ на тонну чугуна, $t=1000^0$ С, расход ПУТ 0–500 кг/т чугуна, из концентрата угля марки «Т», содержание кислорода в техническом кислороде — 92%, его температура — 100⁰С, содержание золы в ПУТ — 7,5%.

Реализация вариантов осуществляется с помощью холодного технического кислорода и обеспечивает в максимальном случае снижение приведенных затрат на 1 т чугуна на 70–80 грн., прирост производительности на 20–28%, снижение показателя степени прямого восстановления до 14–16%, что уменьшит напряженность работы горна, расход углерода на прямое восстановление, качественно улучшит условия нагрева продуктов плавки и десульфурации чугуна (рисунок 1). При прочих равных условиях эти изменения создают предпосылки для снижения уровня нагрева горна на 100–200⁰С. Таким образом, может иметь место качественное улучшение технологических условий доменной плавки и, как следствие, дополнительная экономия тепла и кокса.

Аналогичные, по сравнению с изложенными выше, технологические и экономические результаты получены при вдувании в горн вместо ОКГ конвертерного газа, ресурс которого на ОАО «Енакиевский металлургический завод» достаточен для обеспечения работы большой доменной печи (рисунок 2).

В реальных технологических условиях реализовать указанную схему работы печи (ПУТ+O₂+ОКГ) наиболее эффективно на 1–2 доменных печах большого (5–8 печей) доменного цеха, используя имеющиеся в цехе ресурсы технического кислорода. Указанные 1–2 печи, имея наиболее высокие технико-экономические показатели, в то же время могут обеспечить ОКГ остальные доменные печи цеха, которые могут работать по традиционной технологии (ПУТ+D₀₂+ОКГ) — на горячем и обогащенном кислородом дутье, с вдуванием ПУТ и ОКГ в соотношении, обеспечивающем полное сгорание ПУТ и оптимальный температурный режим горна.

Расчеты показывают, что реализация данного варианта в условиях доменного цеха ОАО «Металлургический комбинат «Азовсталь» позволит на базе имеющихся ресурсов кислорода отказаться от применения ПГ ($\cong 0,6$ млрд. м³), снизить годовую

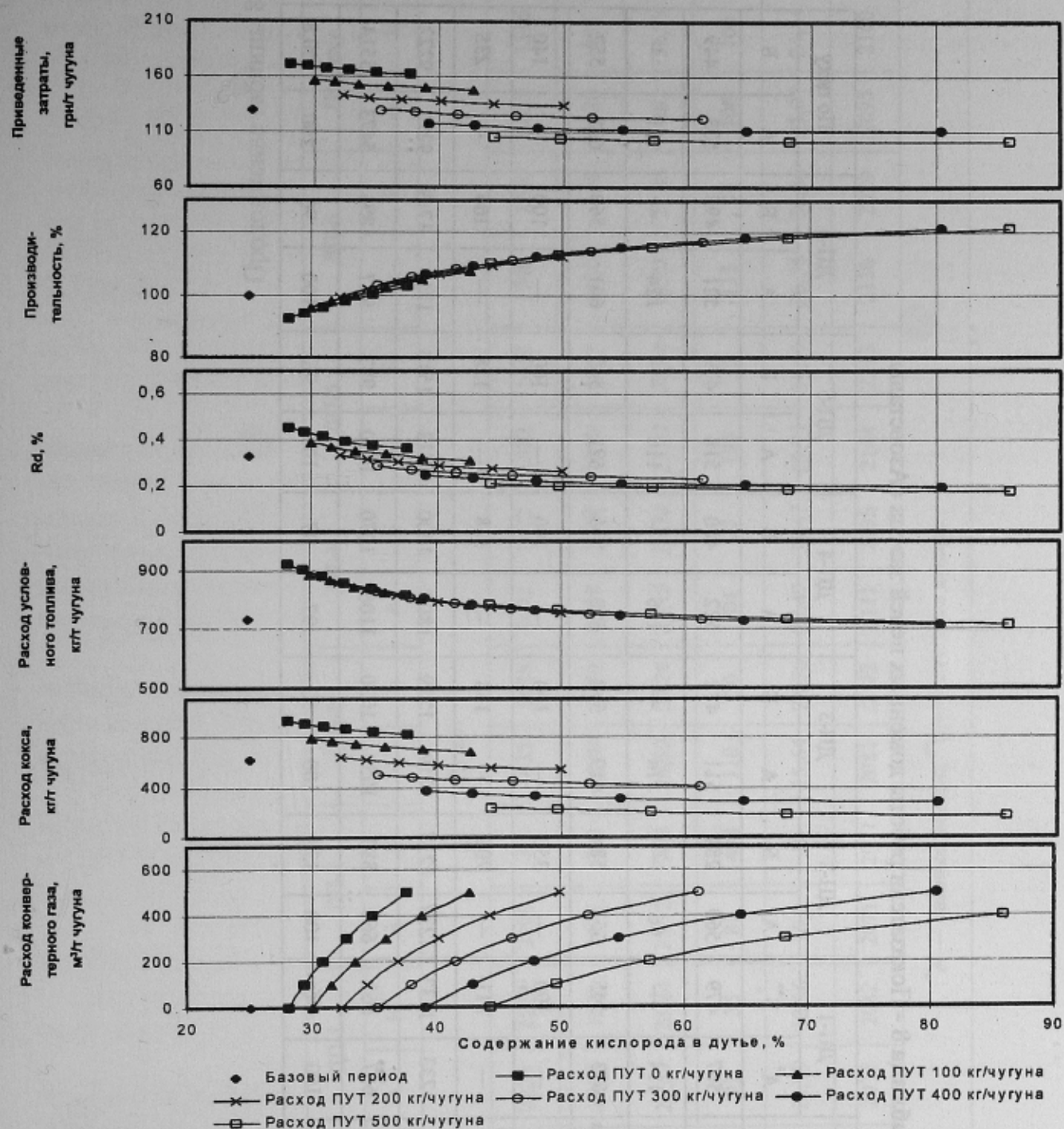


Рисунок 2 – Показатели доменной плавки на холодном технологическом кислороде при вдувании в горн ПУТ и конвертерного газа (базовый период — ЕМЗ, д.п. № 1, 1996)

потребность кокса на 430 тыс. т, сэкономить 450 тыс. т условного топлива, повысить производительность цеха на 40 тыс. т, улучшить качество чугуна по содержанию серы и кремния (таблица 8).

Таблица 8 - Показатели работы доменных печей завода «Азовсталь»

Показатели	ДП-1		ДП-2		ДП-3		ДП-4		ДП-5		ДП-6		По цеху	
	А*	Б**	А	Б	А	Б	А	Б	А	Б	А	Б	А	Б
Расход кокса, кг/т чугуна	567	479	569	284	511	472	522	480	518	479	521	495	533	449
Расход ПП, м ³ /т чугуна	114	—	96	—	114	—	106	—	110	—	124	—	111	—
Расход условного топлива, кг/т чугуна	673	545	653	584	619	538	620	546	621	545	641	560	638	552
Расход ПУТ, кг/т чугуна	—	100	—	350	—	100	—	100	—	100	—	100	—	140
Расход ОКГ, м ³ /т чугуна	—	211	—	700	—	138	—	118	—	128	—	164	—	235
Полезный объем, м ³	1233	1233	1237	1237	1719	1719	1800	1800	1513	1513	1719	1719	9222	9222
Вылавка чугуна, тыс. т	687	661	660	883	1052	1020	1106	1070	1070	987	927	893	5473	5514
Производительность, %	100	96	100	133	100	97	97	97	100	96	100	96	100	100,8

Продолжение таблицы 8

Показатели	ДП-1		ДП-2		ДП-3		ДП-4		ДП-5		ДП-6		По пеху	
	А*	Б**	А	Б	А	Б	А	Б	А	Б	А	Б	А	Б
Дутье:														
Расход, м ³ /т чугуна	2229	2229	2390	494	1635	1635	1472	1472	1482	1482	1746	1746	1825	1516
Температура, °С	1068	1068	1075	300	1080	1080	1118	1118	1057	1057	1130	1100	1088	953
Кислород, %	25,59	23,84	25,12	96,3	26,59	24,76	21,15	25,32	27,27	24,91	29,81	27,83	26	36,73
Расход технического O ₂ , м ³ /т чугуна	91	35	81	494	110	30	104	27	103	35	133	34	106	106
Степень прямого восстановления, %	23,99	32,36	16,2	10	15,64	24,76	27,47	35,47	25,71	34,71	26,36	36,36	23,01	24,44
Теоретическая температура, °С	2037	2082	2071	2071	2081	2172	2111	2196	2144	2213	2130	2229	2095	2160

*А — Базовые данные, **Б — Расчетные данные

Освоение описанной технологии в доменном цехе ОАО «Металлургический комбинат «Азовсталь» будет сопровождаться также производством $\cong 4,1$ млн. т CO_2 в газообразном, жидком и твердом состоянии. Существенная часть — 20–40% этого нового продукта может найти применение на металлургическом комбинате.

Заключение

1. За прошедшие 3 года отмечено значительное расширение использования ПУТ в доменной плавке. Так, в 1997 г. в странах ЕЭС 35 ДП из 68, а в Японии 30 печей работали с использованием ПУТ; вдувание его в количестве 180 кг/т чугуна при расходе кокса 320 кг/т чугуна стало обычной практикой. Готовятся промышленные опыты с вдуванием до 250–270 кг/т чугуна ПУТ при снижении расхода кокса до 220 кг/т чугуна. Высокая эффективность достигнута на совместном вдувании в горн ПУТ+ПГ и ПУТ+мазут.

Доля замены кокса дополнительными топливами составила 20–30%, а в лучших случаях практики — 40–50%.

Основой указанных достижений стали очень высокое качество железорудного сырья, ПУТ и кокса, высокий уровень нагрева дутья, широкое использование кислорода как для обогащения им дутья, так и для интенсификации сгорания дополнительных топлив. Перечисленные и другие мероприятия обеспечили полную комплексную компенсацию негативного влияния на технологию снижения окислительного потенциала фурменных зон и доли кокса в шихте, определяемых вдуванием ПУТ.

2. Одной из причин значительного ухудшения эффективности доменной плавки на металлургических предприятиях Украины является сокращение или исключение вдувания в горн ПГ, что явилось следствием повышения его дефицитности и опережающего по сравнению с коксом роста стоимости.

3. В сложившихся технологических условиях для доменных цехов Украины представляются перспективными технологии с вдуванием в горн (ПУТ+ O_2 +ОКГ) и (ПУТ+ O_2 +КГ).

4. Использование данных вариантов технологии обеспечивает:

- получение высокого экономического эффекта за счет полного вывода из состава дутья ПГ, сокращения расхода кокса и условного топлива, улучшения качества чугуна;
- максимальное и эффективное использование имеющихся в доменных цехах мощностей по производству чугуна, кислорода, нагреву горячего дутья;
- качественное улучшение технологических условий доменной плавки благодаря значительному снижению степени прямого восстановления FeO (r_d), возможному снижению уровня максимальных температур горна;
- возможность использования для реализации технологии освоенного в промышленном масштабе способа очистки газов от CO_2 путем растворения последней в воде при высоком давлении;
- дополнительное существенное снижение себестоимости чугуна за счет реализации ценного побочного продукта, получаемого при производстве ОКГ — CO_2 при газообразном, жидком и твердом виде.

Список литературы

1. Дунаев Н.Е., Кудрявцева З.М., Кузнецов Ю.М. Вдувание пылевидных материалов в доменные печи. — М.: Metallurgy, 1977. — 207 с.
2. Емушинцев В.В., Галемин И.М., Дунаев Н.Е. Выплавка передельного чугуна с различным расходом пылеугольного топлива // Сталь. — 1969. — № 6. — С. 489–493.
3. Работа доменной печи при совместном применении природного газа, пылеугольного топлива и обогащении кислородом дутья / З.И.Некрасов, Л.Д.Юпко, П.Я.Мухин и др. // Интенсификация процессов доменной плавки и освоение печей большого объема. — М.: Metallurgy, 1978, № 4. — С. 1–5.
4. Ярошевский С.Л. Выплавка чугуна с применением пылеугольного топлива. — М.: Metallurgy, 1988. — 176 с.
5. Бабич А.И., Ярошевский С.Л., Терещенко В.П. Интенсификация использования пылеугольного топлива в доменной плавке. — К.: Техника, 1993. — 200 с.
6. Рамм А.Н. Определение технических показателей доменной плавки. Методическое руководство. — Л.: Ленинградский политехнический институт, 1971.
7. Рамм А.Н. Современный доменный процесс. — М.: Metallurgy, 1980. — 304 с.
8. Китаев Б.И. Теплообмен в доменной печи. — М.: Metallurgy, 1966.
9. Бабий В.И., Иванова И.В. Длительность воспламенения и горения частиц пыли различных марок углей. — В сб.: "Горение твердого топлива". Материалы III Всесоюзной конференции по теории горения твердого топлива. — Новосибирск: Наука, 1969.
10. Ноздрачев В.А., Ярошевский С.Л., Терещенко В.П. Перспективные технологии доменной плавки с применением кислорода и пылеугольного топлива. — Донецк, 1996. — 173 с.
11. Бабич А.И., Кочура В.В., Формосо А., Гарсия Л. Производство первичного металла в странах Западной Европы // Металл и литье Украины. — 1997. — № 5. — С. 32–37.
12. Ноздрачев В.А., Формосо А., Бабич А.И. и др. Развитие технологии вдувания пылеугольного топлива в доменную печь // М.: Metallurg. — 1998. — № 8–9. — С. 41–45 и 35–38.
13. Бабич А.И., Ярошевский С.Л., Кочура В.В., Терещенко В.П. Состояние и перспективы технологии доменной плавки с вдуванием пылеугольного топлива // Металл и литье Украины. — 1995. — № 11–12. — С. 12–18.
14. Ranade M.G., White D.G., Duncan J. Current status of coal injection in North America. Proc. 3rd European Ironmaking Congr., Gent, 1996, P. 82–92.
15. Ярошевский С.Л., Бабич А.И., Терещенко В.П. и др. // Сталь. — 1995. — № 8. — С. 11–17.
16. Sherman G.J. Gary No. 13 Blast Furnace Achieves 400 lbs/tHM Coal Injection in 9 Months / ISIS, Ironmaking Conf. Proc., Vol. 54, 1995, P/ 39–44.
17. Schuett K.J., White D.G. Record Production on US Steel Gary Works No. 13 BF With 450 pounds/tHM CO-injection Rates/ ISSM, 1997, No. 3, P. 65–68.
18. Справочник азотчика / Н.А.Ситулин, Е.Я. Мельников, М.С.Фурман, И.Р.Кричевский. - М.: Химия, 1967. — 492 с.

©Ярошевский С.Л., Ноздрачев В.А., Бабич А.И., Формосо А., Красавцев А.И., 1999.

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ ПРИ ТВЕРДОФАЗНОМ ВОССТАНОВЛЕНИИ РУДОУГОЛЬНЫХ ЗАГОТОВОК

КРАВЦОВ В.В., ПОНОМАРЕВ Л.Л., ИВАНОВ С.А. (ДОНГТУ)

Приведены результаты экспериментов по формированию суммарной газовой фазы при восстановлении рудоугольных брикетов с использованием генераторного газа, полученного из тощих углей.

Лабораторные и промышленные исследования показали существенное влияние восстановительных газов на режимы технологического процесса твердофазного восстановления. Объем восстановительных газов составляет около 50% от общего объема газовой фазы, что объясняет его воздействие на такие параметры процесса как скорость восстановления, степень металлизации и т.д.