

ЯРОШЕВСКИЙ С.Л. (ДОНГТУ), КОВАЛЕВ А.И. (ЭНЕРГО), КУЗНЕЦОВ А.М. (ОАО «ЕМЗ»), КРАСАВЦЕВ А.И., КУЗИН А.В. (ДОНГТУ)

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ РЕЖИМЫ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ДОМЕННЫХ ЦЕХОВ УКРАИНЫ

Рассмотрены мировой опыт применения пылеугольного топлива в последние годы. На основании указанного опыта и теоретических предпосылок, основанных на соблюдении полной и комплексной компенсации для условий одной из доменных печей Донбасса, рассчитаны технологические режимы вдувания на 1 т чугуна 200 кг пылеугольного топлива. Реализация доменных режимов обеспечит замену до 35–41% кокса, прирост производительности на 23–25%, окупаемость капитальных вложений — менее 1 года.

Применение ПУТ в технологических условиях доменных цехов Донбасса имеет благоприятные предпосылки благодаря наличию:

- значительного резерва температурно-кислородного потенциала горна, определяемого содержанием в дутье до 25% O_2 и высокой температурой дутья (1000°C и выше);
- возрастающими дефицитностью и стоимостью природного газа;
- наличием в Донбассе практически неограниченных запасов неспекающихся углей, отвечающих основным требованиям доменной технологии;
- разработкой на ОАО «ДМЗ» пылеугольного комплекса, успешно апробированного в ходе длительной промышленной эксплуатации (1980—1996 гг.).

В настоящее время более 120 мощных доменных печей в мире работают с вдуванием в горн ПУТ в количестве от 100 до 300 кг/т чугуна, обеспечивая замену до 30–50% кокса (табл. 1) [1–10]. В 1999 году все 30 действующих доменных печей Японии использовали ПУТ как единственный заменитель кокса; на одной из мощных доменных печей проведены промышленные плавки с расходом ПУТ 289 кг/т и заменой 50% кокса. Расчетным и опытным путем показано наличие значительных резервов технологии с применением ПУТ.

Основой реализации указанной технологии является необходимость полной и комплексной компенсации негативного влияния ПУТ на газопроницаемость шихты, температурно-окислительный потенциал горна, условия восстановления оксидов железа и т.д. При наличии такой компенсации коэффициент замены кокса углем не изменяется при увеличении расхода ПУТ до 200 кг/т чугуна и более.

Теория и практика полной и комплексной компенсации при вдувании в горн больших количеств ПУТ

Исходя из теоретических соображений и анализа 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.

Табл. 1 — Перспективные технологии доменной плавки с применением кислорода и ПУТ

Показатели	Фирма, страна									
	Thyssen Stahl, Schwelgern, Германия	Sollac, Dunkerque, Франция	Hoogovens, IJmuiden, Голландия	British Steel, Scunthorpe, Англия	ILVA, Taranto, Италия	Cobe Steel, Япония	Lis Still, Gary, США			
Доменная печь	№1	№4	№6	Queen Victoria	№2	№3	B			
Диаметр горна, м	13,6	14,0	11,0	9,0	10,3	9,5	11,1			
Период	Март, 1992	Июль, 1990	Фев., 1991	12.10-2.11, 1991	1994	1994	Май, 1995			
Расходы, кг/т чугуна										
Сухого кокса	313,0	295,0	272,0	290,0	309,0	308,0	275,0			
Угля	187,0	180,0	206,0	208,0	187,0	188,0	188,0			
Мазута	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	31,0			
Итого топлива, кг/т чугуна	500,0	475,0	502,0	498,0	496,0	496,0	495,0			
Температура дутья, °С	1233	1193	1245	Н.д.	1220	1185	1147			
Содержание кислорода в дутье, %	24,06	22,48	25,2	29,33	25,3	24,1	28-30			
Производительность, т/сутки	9225	8814	7690	3620	5326	3729	8820			
Температура колошникового газа, °С	168,0	185,0	175,0	149,0	140,0	184,0	149,0			
Выход шлака, кг/т чугуна	258,0	313,0	250,0	268,0	294,0	270,0	268,0			
							256,0			

Таким образом, комплексными компенсирующими мероприятиями, наравне с параметрами дутьевого режима, могут быть улучшение качества железорудной шихты, кокса и ПУТ и другие мероприятия, обеспечивающие повышение ΣK , [6–8, 16, 17].

Расчеты и имеющийся промышленный опыт показывают, что на основе соблюдения принципа комплексной и полной компенсации принципиально возможна замена ПУТ до 50% и больше кокса.

Типичным примером решения задач комплексной компенсации при освоении технологии доменной плавки с применением ПУТ может быть опыт доменных печей в Европе в 1997—1998 гг. Базовый режим исследуемых печей:

— очень высокое качество железорудного сырья, характеризующееся очень высокой стабильностью химического состава, выходами мелочи 5–0 мм — до 5%, шлака — 240–300 кг/т чугуна;

— высокие уровни температуры дутья (1080–1250°C) и содержания в нем кислорода (21–30%), давления газов на колошнике (1,5–2,5 атм.);

— средние и большие объемы доменных печей;

— примерно равные и оптимальные условия по режиму шлакообразования;

— высокое качество углей и их смесей, применяемых для приготовления ПУТ ($A^c < 10\%$).

Из рисунка видно, что компенсация вдувания ПУТ в количестве до 200 кг/т чугуна обеспечена как высоким исходным качеством железорудного сырья и кокса, так и повышением температуры дутья (+100°C), содержания в нем кислорода (+5–8 %), давления газов на колошнике (+1,2 атм). В итоге доменные печи при вдувании до 200 кг/т чугуна ПУТ работали, по существу, в режиме сверхкомпенсации, что позволило увеличить базовую производительность печей на 40–50 %, снизить расход кокса на 40%, суммарный коэффициент замены кокса углем составил 1,05 кг/кг, что подтверждает выполнение основного условия полной и комплексной компенсации. Теоретическая температура горения — 2150–2180°C — также полностью отвечает требованию уравнения нижней зоны теплообмена для соответствующих условий.

Методика расчета эффективности применения ПУТ

Для приготовления ПУТ использовали наиболее распространенные угли Донбасса: антрациты, коксующиеся и газовые угли. Данные по качеству принятых в расчете углей приведены в табл. 2.

В качестве базового периода (январь 1999 г.) для расчета приняли одну из печей Донбасса, полезным объемом 1033 м³, работающую на привозном железорудном сырье.

Расчет расхода кокса и производительности печи выполняли по методике профессора ЛПИ Рамма А.Н., основанной на сведениях материально-тепловых балансов плавки [14, 15].

Возможности применения ПУТ в режиме полной и комплексной компенсации в шихтовых условиях металлургических предприятий Донбасса

Перечисленные выше требования компенсации в перспективе при минимальных затратах могут быть реализованы в условиях ряда предприятий Донбасса.

В частности для рассматриваемого базового режима, полная и комплексная компенсация может быть обеспечена за счет:

— улучшения качества железорудной шихты;

— повышения в шихте доли окатышей до 60–70%;

— оптимизации технологического режима плавки на основе математической модели доменной плавки;

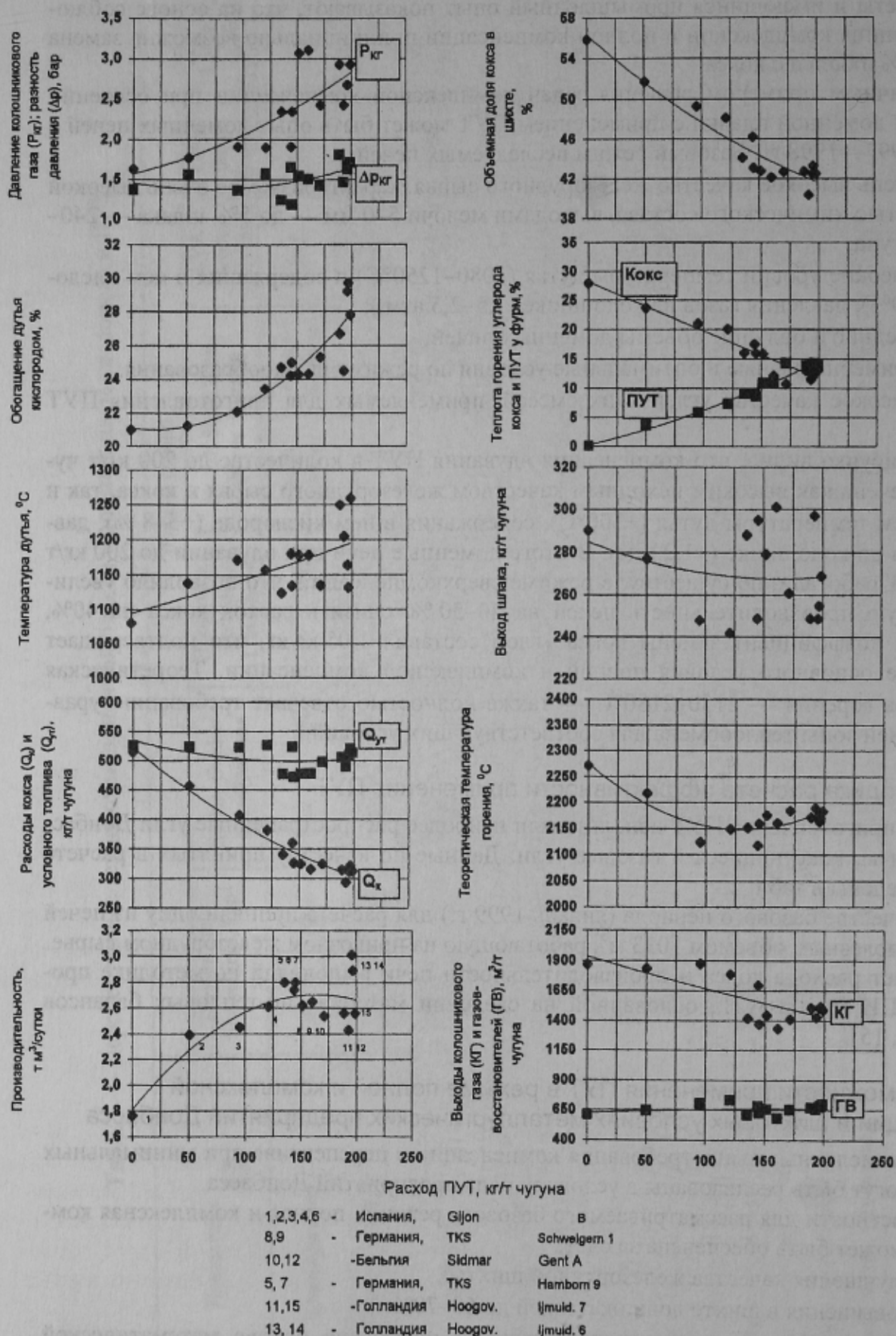


Рисунок. Показатели эффективности применения ПУТ в доменных цехах Европы, 1997—1998 гг [19,20]

Табл. 2 — Технический составы углей Донбасса и химический состав ПУТ приготовленного из этих углей приняты в расчете.

Обогащательная фабрика (шахта)	Условное обозначение	Уголь					Химический состав ПУТ, %										Цена ПУТ с учетом затрат на помол, грн/т
		Технический анализ, %															
		зола	летучие	Сера	Влага		C ^p	H ^p	O ^p	N ^p	S ^p	W ^p	A ^p	CaO в золе	SiO ₂ в золе		
Концентрат угля марки «АШ» (0-6 мм)	АШ	10,0	3,0	1,00	9,5		84,69	1,66	0,88	0,77	1,00	1,00	10,00	3,50	49,50	122,83	
Концентрат угля марки «К»	К	8,4	29,0	0,90	9,0		80,90	4,30	3,00	1,50	0,90	1,00	8,40	3,50	38,00	142,37	
Концентрат угля марки «Д»	Г2	8,0	40,0	0,90	10,0		74,82	5,48	8,30	1,50	0,90	1,00	8,00	5,80	47,60	239,92	

- улучшения качества кокса;
- выбора лучшего и ограничение числа поставщиков кокса;
- отсева из скипового кокса мелочи — 30–40 мм, снижение до минимума фракции +80 мм;
- введения в состав железорудной шихты 10–20% коксового орешка;
- повышения температурно-кислородного потенциала горна;
- сокращения или вывода из состава дутья природного газа;
- повышения температуры дутья до 1100°C и выше;
- искусственного увлажнения горячего дутья до 15–30 г/м³;
- выбора наиболее эффективного вида угля или смеси углей для приготовления ПУТ, зольностью 5–8%;
- разработки и освоения наиболее современных устройств для ввода и сжигания ПУТ в пределах фурменных зон;
- оперативного контроля и управления температурой горна и продуктов плавки с использованием современных пирометрических комплексов.

Опыт работы доменных печей № 1 и 2 ОАО «ДМЗ» в 1980—1996 гг. показывает, что совместное вдувание в горн ПУТ и ПГ позволило заменить до 25–30% кокса ($K_3=0,8-0,9$ кг/кг) при оптимальном расходе ПУТ 60–80 кг/т чугуна, температуре дутья 1090–1120°C, содержании в дутье кислорода 23–25%. Длительный период эксплуатации доменной печи и проведение исследований по оптимизации технологического режима в сложившихся условиях плавки показали, что дальнейшее увеличение расхода ПУТ не эффективно, ввиду крайне напряженного газодинамического режима плавки, обусловившего нарушения схода шихты и снижение производительности печей. Последнее определялось крайне низким качеством основных компонентов железорудной шихты — агломерата ЮГОК и окатышей ЦГОК, высокими выходом шлака (450–500 кг/т чугуна) и его тугоплавкостью (CaO/SiO_2) 1,25–1,30, $T_{пл}=1400-1450^\circ C$), работой печи с высокими нагревами горна и продуктов плавки [6–8].

Аналогичные и худшие по расходу ПУТ и эффективности результаты получены в разные года на Карагандинском, Запорожском («Запорожсталь»), Западно-Сибирском металлургических заводах, применяющих ПУТ без реализации мероприятий по полной комплексной компенсации [11–13].

На основании изложенного принимаем, что при отсутствии полной и комплексной компенсации, в первую очередь, в части шихтового режима, при вдувании в горн ПУТ+ПГ, работа печи на обогащенном кислородом дутье (23%) с температурой дутья 1100°C, оптимальный расход ПУТ составит 80 кг/т, что обеспечит прирост производства на 1,5–4,0%, снижения расхода кокса на 19–22% и себестоимости чугуна на 8–21 грн/т. (табл. 3).

Полную и комплексную компенсацию доменной плавки для базового режима предлагается осуществить прежде всего за счет:

- применения в доменной плавке железоблюса с использования технологии их производства и оборудования фирмы BELROS'S Corporation LTD [18];
- использования в шихте в качестве основного топлива кокса фракций 40–80 мм и в качестве дополнительного — коксового орешка фракций 10–40 мм, загружаемого в смеси с железорудной шихтой;
- повышения в шихте доли окатышей до 70%;
- повышения температуры дутья до 1100°C и обогащения его кислородом до 25%;
- использования для вдувания в горн ПУТ из низкзолельных и относительно низкосернистых углей;
- сокращения расхода или вывода из состава дутья природного газа;

Табл. 3 — Расчет комплексной компенсации дувания ПУТ для условий металлургических предприятий Донбасса (база — апрель 1999)

Показатели	База	Вид угля (концентрата) для приготовления ПУТ																	
		Концентрат угля марки «АШ» (0-6 мм)				Концентрат угля марки «К»				концентрат угля марки «Г»									
		Вид компенсации при дувании ПУТ (последовательное повышение температуры дутья, содержания кислорода) с нарастающим итогом																	
		Повышение T_d			Повышение T_d и O_2			повышение T_d и O_2			повышение T_d			повышение T_d и O_2					
Температура дутья, С	958	985	1013	1043	1073	1100	1100	998	1041	1086	1100	1100	1100	1005	1055	1100	1100	1100	1100
Влажность дутья, г/м ³	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000
Содержание кислорода в дутье, %	21,90	21,90	21,90	21,90	21,99	22,57	21,90	21,90	21,90	22,48	23,35	24,29	21,90	21,90	22,04	23,01	24,05	25,18	25,18
Расход кислорода на обогащение дутья, м ³ /т чугуна	21,00	20,00	20,00	20,00	19,00	21,00	32,00	20,00	20,00	19,00	30,00	47,00	63,00	20,00	20,00	22,00	41,00	59,00	78,00
Расход природного газа, м ³ /т	89,70	89,70	89,70	89,70	89,70	89,70	89,70	89,70	89,70	89,70	89,70	89,70	89,70	89,70	89,70	89,70	89,70	89,70	89,70
Расход ПУТ, кг/т	0	20	40	60	80	100	120	20	40	60	80	100	120	20	40	60	80	100	120
Степень прямого восстановления, доли	0,316	0,310	0,305	0,299	0,294	0,288	0,282	0,307	0,299	0,291	0,282	0,272	0,263	0,306	0,297	0,288	0,277	0,266	0,256
Температура колосникового газа, С	262	261	260	259	258	256	249	261	260	258	251	241	231	260	259	256	244	233	221
Расход кокса сухого скипового, кг/т	551	521	491	461	431	403	380	518	486	454	429	409	388	520	489	460	442	424	407
Степени использования																			
СО	0,395	0,403	0,410	0,418	0,427	0,434	0,438	0,404	0,413	0,423	0,428	0,430	0,432	0,404	0,413	0,421	0,422	0,423	0,423
H ₂	0,280	0,286	0,291	0,297	0,303	0,308	0,311	0,287	0,294	0,300	0,304	0,305	0,307	0,287	0,293	0,299	0,300	0,300	0,300
Расход флюса, кг/т	135	134	133	132	131	130	130	133	131	129	128	127	126	133	131	130	130	130	130
Выход шлака, кг/т	468	466	464	462	460	459	458	464	461	459	457	456	455	465	462	460	459	459	45,
Количество СО и H ₂ в горном газе, тыс м ³ /т	1,131	1,116	1,102	1,088	1,073	1,061	1,060	1,117	1,103	1,089	1,088	1,093	1,098	1,119	1,108	1,100	1,110	1,120	1,131
Теоретическая температура горения, С	1942	1942	1942	1942	1942	1942	1942	1942	1942	1942	1942	1942	1942	1942	1942	1942	1942	1942	1942
Производительность, %	100	100	100	101	101	101	102	100	101	101	103	104	106	100	101	102	103	105	107
Условное топливо, кг/т	649	640	632	623	614	606	605	639	628	618	615	616	617	639	629	621	624	627	630
Себестоимость, грн/т	457,5	452,1	446,8	441,5	436,1	431,6	430,2	453,0	448,8	444,3	444,0	445,7	447,3	453,3	449,3	446,2	448,9	451,5	454,5

— повышения теоретической температуры горения до 2100°C в соответствии с изменением выхода горновых газов и показателя r_d ;

— оптимизации и стабилизации технологического режима на основе математической модели доменной плавки.

Эффективность перечисленных компенсирующих мероприятий доказана длительным промышленным опытом работы отечественных и зарубежных доменных печей [6–10].

Выполненные расчеты показывают, что по основным показателям технологии плавки: выходу шлака, расходу флюса, выходу мелочи 5–0 мм на 1 т чугуна и кокса, $T_{\text{теор}}$, выходу горновых газов ($\text{м}^3/\text{т}$ чугуна), распределению температур по высоте печи и т.д., проектируемые технологические условия работы доменной печи Донбасса качественно близки аналогичным показателям, полученным на современных доменных печах Европы при вдувании в горн 180–200 кг/т чугуна ПУТ. Это дает основание прогнозировать для таких условий оптимальный расход ПУТ в количестве 150–200 кг/т чугуна.

Из табл. 4 видно, что реализация такого режима обеспечивает снижение расхода кокса до 291–356 кг/т чугуна (35,5–41,0%), прирост производства на 23,4–25,0%, практически полное исключение вдувания ПГ, снижение себестоимости чугуна на 40,95–73,96 грн/т, что в 2–3 раза превышает эффективность, достигаемую в обычных технологических условиях плавки (табл. 4).

Реализация технологического режима по табл. 4 требует дополнительных капитальных затрат в количестве 5–7 млн. долл. на обеспечение производства железоблины, производство и введение в состав железорудной шихты коксового орешка. Тем не менее, окупаемость предлагаемого технологического режима будет минимальной по сравнению со всеми другими вариантами и составит менее года.

Выводы

1. В настоящее время более 120 мощных доменных печей в мире работают с вдуванием в горн ПУТ в количестве от 100 до 300 кг/т чугуна, обеспечивая замену до 30–50% кокса.

Основой реализации указанной технологии является необходимость полной и комплексной компенсации негативного влияния ПУТ на газопроницаемость шихты, температурно-окислительный потенциал горна, условия восстановления оксидов железа и т.д.

2. Из результатов опытных и промышленных плавки, 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.

3. Перечисленные выше требования компенсации в перспективе при минимальных затратах могут быть реализованы в условиях за счет:

- улучшения качества железорудной шихты;
- улучшения качества кокса;
- повышения температурно-кислородного потенциала горна.

Табл.1.4 — Расчет эффективности применения различных компенсирующих мероприятий с нарастающим итогом и эффективностью применения ПУТ

Наименование	База	Варианты								
		Снижение прихода мелочи с шихтой	Вывод шлака SiMn	Повышение содержания окатышей	Ввод Fe флюса	Ввод коксового орешка	Оптимизация технологического режима	Вдувание 200 кг ПУТ на 1 т чугуна на		
1	2	3	4	5	6	7	8	9 «АШ»	10 «К»	11 «Г»
Производительность, %	100,0	101,4	104,3	103,0	107,9	107,9	111,1	123,8	125,0	123,4
Производительность, т/сутки	1458,3	1479,1	1520,6	1501,4	1573,5	1573,5	1620,7	1806,0	1822,9	1799,0
Температура дутья, С	958,0	958,0	958,0	958,0	958,0	958,0	958,0	1100,0	1100,0	1100,0
Кокс, кг/т чугуна	551,00	544,70	529,41	536,5	509,90	458,91	445,14	262,37	298,29	320,97
Коксовый орешек, кг/т чугуна	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	50,99	49,46	29,15	33,14	35,66
Сумма кокса и коксового орешка, кг/т чугуна	551,00	544,70	529,41	536,47	509,90	509,90	494,60	291,53	331,44	356,63
Расход природного газа, м ³ /т	89,7	89,7	89,7	89,7	89,7	89,7	89,7	30,0	0,0	0,0
ПУТ, кг/т чугуна	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	200,0	200,0	200,0
Агломерат ЮГОК, кг/т чугуна	1055,0	1055,0	1057,2	494,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Окатыши СевГОК, кг/т чугуна	636,0	636,0	636,0	1150,0	1210,0	1210,0	1210,0	1210,0	1210,0	1210,0
Железофлюс В=3,31, кг/т чугуна	0,0	0,0	0,0	0,0	493,7	493,7	493,7	493,7	493,7	493,7

Продолжение табл.4

Наименование	База	Варианты									
		Снижение прихода мелочи с шихтой	Вывод шлака SiMn	Повышение содержания окатышей	Ввод Fe флюса	Ввод коксового ореска	Оптимизация технологического режима	Вдувание 200 кг ПУТ на 1 т чугуна			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Расход кислорода на обогащение дугья, м ³ /т чугуна	21,0	21,0	21,0	21,0	19,0	19,0	19,0	62,0	62,0	64,0	
Влажность дугья, гр/м ³	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	15,0	8,0	
Степень использования CO, доли	0,395	0,395	0,395	0,395	0,436	0,436	0,436	0,512	0,499	0,483	
Степень прямого восстановления, доли	0,316	0,316	0,316	0,316	0,316	0,316	0,316	0,342	0,339	0,336	
Шлак, кг/т чугуна	469,8	469,8	416,1	397,6	379,1	379,1	377,34	375,5	374,6	379,3	
(MgO)	3,90	3,90	4,03	3,62	3,63	3,63	3,63	3,87	3,87	3,87	
(Al ₂ O ₃)	6,20	6,20	6,38	6,28	6,20	6,20	6,20	6,37	6,37	6,37	
(MnO)	0,66	0,66	0,34	0,31	0,31	0,31	0,31	0,33	0,33	0,33	
(S)	1,98	1,98	2,12	2,22	2,24	2,24	2,22	2,18	2,15	2,15	
CaO/SiO ₂	1,27	1,27	1,26	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	
Чугун:											
[Mn]	0,580	0,580	0,268	0,230	0,220	0,220	0,220	0,247	0,247	0,247	
[P]	0,040	0,040	0,038	0,033	0,043	0,043	0,043	0,042	0,042	0,042	
[S]	0,033	0,033	0,035	0,037	0,037	0,037	0,037	0,036	0,036	0,036	
Теоретическая температура горения, С	1934	1934	1934	1934	1919	1919	1908	2112	2100	2078	
Коэффициент замены кокса ПУТ, доля	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,02	0,82	0,69	
Себестоимость, грн/т	457,55	455,25	448,73	447,99	431,80	425,04	419,95	383,59	389,90	416,60	
Снижение себестоимости, грн/т	0,00	2,30	8,82	9,56	25,75	32,51	37,60	73,96	67,65	40,95	

Применение ПУТ без реализации компенсирующих мероприятий технологически и экономически нецелесообразно, поскольку в этом случае оптимальный расход топлива ограничивается 30–50 кг/т чугуна, вследствие чего окупаемость пылеугольного комплекса повышается до 10 лет и более.

4. Реализация технологического режима с полной и комплексной компенсацией обеспечит на металлургических предприятиях Донбасса снижение расхода кокса до 291–356 кг/т чугуна (35,5–41,0%), прирост производства на 23,4–25,0%, практически полное исключение вдувания ПГ, снижение себестоимости чугуна на 40,95–73,96 грн/т, что в 2–3 раза превышает эффективность достигаемую в обычных технологических условиях плавки. Окупаемость дополнительных капитальных вложений в данную технологию составит менее 1 года.

Список литературы

1. Peter No / 6207, 1831 (Великобритания) I.S.Dawer, Manufacture of Iron.
2. Bogdandy I. Mechenishes, termisher und chemishes Verhalten Kleiner Kohlekorner beim Einblasen in den Hochofen und die sich dabei ergebenden der Hochofenbetriebsdaten // Arch Eisenhüttenwesen, 1964. — Bd. 35. — № 10. — S. 936–976.
3. Дунаев Н.Е., Кудрявцева З.М., Кузнецов Ю.М. Вдувание пылевидных материалов в доменные печи. — М.: Металлургия, 1977. — 207 с.
4. Brandy J.L. Amanda and Bellefonte, answers to ironmaking // J. Iron Age., 1968. — Vol. 16. — № 8. — P. 637–643.
5. Bell S.A. Coal injection — Bellefonte furnace // Metals, 1968. — Vol. 20. — № 4. — P. 35–45.
6. Ярошевский С.Л. Выплавка чугуна с применением пылеугольного топлива. — М.: Металлургия, 1988. — 176 с.
7. Бабич А.И., Ярошевский С.Л., Терещенко В.П. Интенсификация использования пылеугольного топлива в доменной плавке. — К.: Техника, 1993. — 200 с.
8. Ноздрачев В.А., Ярошевский С.Л., Терещенко В.П. Перспективные технологии доменной плавки с применением кислорода и пылеугольного топлива. — Донецк: Новый мир, 1996. — 173 с.
9. 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.
10. Ноздрачев В.А., Формосо А., Бабич А.И. и др. Развитие технологии вдувания пылеугольного топлива в доменную печь. — М.: Металлург, 1998. — № 8–9. — С. 35–38, 41–45.
11. Дунаев Н.Е., Кудрявцева З.М., Кузнецов Ю.М. Вдувание пылевидных материалов в доменные печи. — М.: Металлургия, 1977. — 207 с.
12. Емущинцев В.В., Галемин И.М., Дунаев Н.Е. Выплавка передельного чугуна с различным расходом пылеугольного топлива // Сталь, 1969. — № 6. — С. 489–493.
13. Некрасов З.И. и др. Вдувание пылеугольного топлива в горн доменной печи на заводе «Запорожсталь». — В кн.: «Исследование шихтовых материалов и процессов доменной плавки». Труды 2-й научно-технической конференции молодых исследователей черной металлургии. Т. XXXIII. — М.: Металлургия, 1971.
14. Рамм А.Н. Определение технических показателей доменной плавки. Методическое руководство. — Л.: Ленинградский политехнический институт, 1971.
15. Рамм А.Н. Современный доменный процесс. — М.: Металлургия, 1980. — 304 с.
16. Китаев Б.И. Теплообмен в доменной печи. — М.: Металлургия, 1966.
17. 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.
18. Производство комплексного флюса и использование его для выплавки стали в кислородном конвертере / В.П.Хайдуков, М.А.Вайнштейн, А.Г.Зубарев и др // Бюллетень ЧМ, 1983. — № 1 — 933 с.
19. Kolb G., Lungen H.B. Current Status and Future Aspects of Hot Metal Production in Western Europe: 2nd Int. Conference on the Science and Technology of Ironmaking and 57th Ironmaking Conference Proceedings. — Toronto, 1998. — P. 75–84.
20. 4th European Coke and Ironmaking Congress, Paris, 2000. — Vol. 1.

© Ярошевский С.Л., Ковалев А.И., Кузнецов А.М.,
Красавцев А.И., Кузин А.В., 2001