

В. С. Бойко, С. А. Матвиенков, С. Л. Ярошевский*, А. В. Кузин*, В. В. Климанчук, В. А. Струтинский

ПАО «Мариупольский металлургический комбинат им. Ильича», Группа Метинвест

*Донецкий национальный технический университет», Донецк

Расчет и оценка эффективности технологии доменной плавки с применением пылеугольного топлива в условиях ПАО «ММК им. Ильича»

Расчетным путем был определен оптимальный расход пылеугольного топлива в условиях ПАО «ММК им. Ильича». Показано, что при применении научного принципа полной и комплексной компенсации уровень расхода пылеугольного топлива повысился от 40 до 110-120 кг/т чугуна.

Ключевые слова: доменная печь, кокс, пылеугольное топливо, технологический режим, компенсирующие мероприятия

История применения пылеугольного топлива (ПУТ) в доменной плавке насчитывает более 200 лет, но только в последние 30 лет она получила массовое промышленное развитие. Причин этому много: возросшие требования к охране окружающей среды, острейший дефицит марок коксующегося угля, высокая эффективность ПУТ по замене кокса, оказавшаяся в 2-3 раза большей, чем у природного газа (ПГ), и другое.

В 2004 г. около половины производимого в мире чугуна выплавлялось с применением ПУТ с расходом кокса 250-350 кг/т чугуна. Это около 30 стран мира, более 120 современных доменных печей с расходом ПУТ от 100 до 250 кг/т чугуна и долей замены кокса углем от 20 до 50 % [1-3]. Уже более 20 лет за рубежом все новые или реконструируемые печи оснащаются пылекомплексными (в Испании, Ю. Корею, Турцию, Румынии, Польше и других странах).

Еще 35-40 лет назад теория доказывала, что ПУТ можно заменить до 10-20 % кокса и снизить его расход до 400 кг/т чугуна, но сегодня разговор идет уже о 60-70 % замены кокса и его расходе 200 кг и менее на 1 т чугуна [4].

Очевидно, что в перспективе ближайших 20-30 лет основой дальнейшего развития и повышения эффективности доменной технологии будет применение ПУТ в количестве 200 и более кг/т чугуна.

Но несомненно и то, что одной из важнейших причин медленного развития ПУТ-технологии является отсутствие научных основ данной технологии. Данная технология развивалась методом проб и ошибок, поэтому, например, в Голландии, Франции, Китае и других странах шли к современным расходам ПУТ по 10-20 (!) лет [5].

В настоящее время на базе более чем 30-летнего опыта сформулированы основные научные принципы данной технологии, позволившие строго рассчитывать и прогнозировать оптимальные режимы с повышенным расходом ПУТ. Сейчас этих принципов последовательно придерживаются и в Китае, и в Нидерландах.

На них же полностью опирается и технология на ПАО «Донецксталь» – металлургический завод»

(ПАО «ДМЗ»), успехи которого в 2005-2010 гг. не вызывают сомнений. Так, например, за 9 месяцев 2006 г. средний расход кокса на весь выплавленный на ДП № 2 чугун составил примерно 400 кг/т чугуна при вдувании ПУТ около 170 кг/т чугуна при полном выводе из состава дутья ПГ [5].

Основой данной теории является компенсация, по мере повышения расхода ПУТ, нарушений технологии, определяемых горением ПУТ и снижением доли кокса в шихте. Очевидно, что повышение расхода ПУТ определяет снижение температуры горения, ухудшает газодинамический режим, условия сгорания ПУТ, расхода шихты и т. д. – то есть вызывает нарушение оптимального технологического режима.

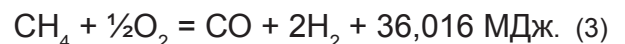
Восстановление и стабилизация базового оптимального режима при вдувании ПУТ является главной задачей полной и комплексной компенсации, это единственное, что может обеспечить повышение расхода и сохранение эффективности применения ПУТ.

Для оценки эффективности компенсирующих мероприятий использовали понятие суммарного коэффициента замены ($\sum K_3$) кокса дополнительным топливом

$$\sum K_3 = \frac{\Delta Q_{\text{КДТ}} + \Delta Q_{\text{ККМ}}}{\Delta Q_{\text{ДТ}}}, \quad (1)$$

где $\Delta Q_{\text{КДТ}}$ и $\Delta Q_{\text{ККМ}}$ – экономия кокса за счет повышения расхода дополнительного топлива и реализованных компенсирующих мероприятий, кг/т чугуна; $\Delta Q_{\text{ДТ}}$ – прирост расхода дополнительного топлива, кг/т чугуна.

Одним из основных компенсирующих мероприятий является снижение расхода ПГ. Это следует из реакций горения в фурменной зоне углерода (С) и метана (СН₄)



Количество тепла на единицу получаемого восстановительного газа по реакции (3) в 9 раз ниже, чем по реакции (2), а выход восстановительного газа в 3 раза выше. Соответственно, снижение теоретической

температуры горения на единицу вдуваемого ПУТ – в 2,5-3,0 раза меньше, чем при вдувании ПГ.

Повышению $\sum K_3$ будут способствовать также снижение расхода известняка и выхода шлака, повышение температуры дутья, улучшение прочности и фракционного состава железорудной шихты, качества кокса, ПУТ, улучшение организации сжигания ПУТ и распределение его по фурмам и другие мероприятия.

С целью повышения достоверности расчета технологических режимов предложены параметры, превышение определенного уровня которых невозможно в реальных сложившихся условиях. Данные параметры назвали определяющими. К ним отнесены [3]: рудная нагрузка, кг/т кокса; количество мелочи 5-0 мм в железорудной шихте, кг/т кокса; выход шлака, кг/т кокса; выход горнового газа, м³/т кокса; скорость газа в зоне пластического состояния шихтовых материалов, м/с;

Указанные значения определяющих параметров авторы рассматривали как граничные, предельные, разделяющие области реально достижимых и маловероятных режимов доменной плавки с применением ПУТ.

Цель работы – определение оптимальных режимов доменной плавки с применением ПУТ в условиях ПАО «ММК им. Ильича» на основе принципа полной и комплексной компенсации.

С учетом опыта освоения пылеугольной технологии на ПрАО «ДМЗ», ПАО «Алчевский металлургический комбинат» («АМК») и ОАО «МК Запорожсталь», опыта пылевдувания в странах Европы и Азии, разработки технологических заданий для 5 металлургических предприятий (в т. ч. ПАО «МК «Азовсталь», ПАО «Енакиевский металлургический завод»), для условий ММК им. Ильича предложены средства компенсации, необходимые для освоения технологии доменной плавки с вдуванием на 1 т чугуна ПУТ с расходом, кг/т чугуна: 50-100 (базовый этап), 101-150 (первый этап) и 151-200 (второй этап).

Базовый этап освоения технологии вдувания ПУТ с расходом 50-100 кг/т чугуна основан на компенсации за счет соответственного снижения расхода ПГ. Если доводка и освоение стабильной работы оборудования ПУТ-комплекса обычно занимают как минимум 3-6 месяцев, можно предположить, что период освоения данного этапа продлится не менее 6-12 месяцев с момента ввода ПУТ-комплекса в эксплуатацию.

Для реализации *первого этапа* ПУТ-технологии, базирующейся на основе компенсирующих мероприятий, которые не требуют для внедрения значительных времени и средств, также необходимо как минимум 3-6 месяцев, при условии, что освоение базового этапа будет завершено внедрением комплекса из 14 компенсирующих мероприятий. В качестве основ-

ных мероприятий предложено: использование кокса с содержанием фракции +80 мм не более 5 %, отсева мелочи до 35-40 мм, производство коксового орешка 10-35/40 мм и загрузка его в печь в смеси с агломератом в количестве 20-50 кг/т чугуна; снижение выхода шлака на 1 т чугуна до 350-400 кг за счет повышения содержания железа в агломерате; повышение температуры дутья доменных печей до 1100-1150 °С и содержания в нем кислорода до 25 %; выбор и использование для приготовления ПУТ наиболее эффективных отечественных и импортных углей с содержанием (%) до 10 золы и 1,0 серы; оптимизация технологии доменной плавки на основе статистического исследования первичных данных и др.

Указанные мероприятия испытаны в режиме опытной и промышленной эксплуатации как на отечественных, так и зарубежных предприятиях: их эффективность, как правило, подтверждена в сочетании с применением ПУТ.

Представляется, что в ходе освоения первого этапа ПУТ-технологии внедрение всех 14 компенсирующих мероприятий крайне необходимо и возможно – с учетом минимальных капитальных затрат и наличия 1,0-1,5 лет для внедрения.

Исследования показывают, что освоение *второго этапа* ПУТ-технологии с расходом ПУТ 151-200 кг/т чугуна как в условиях доменного цеха ПАО «ММК им. Ильича», так и других металлургических предприятий Украины пока не готово к массовому промышленному внедрению, в основном, из-за недостаточной базы компенсации: качество железорудного сырья, кокса, температуры дутья и др.

С использованием методики проф. А. Н. Рамма были выполнены расчеты с вдуванием ПУТ на 1 т чугуна до 200 кг и замены им ПГ и части кокса [6] (погрешность расчетов $\pm 5\%$). Корректность рассчитанных технологических режимов характеризовалась определяющими показателями [3]. Предельные значения основных определяющих показателей составили: для выхода шлака – 1000 кг/т кокса; скорость газа в распаре – 20 м/с. В качестве базы принимали опыт работы доменной печи № 5 (за период с ноября 2010 по март 2011 г.). В расчетах для приготовления ПУТ использовали угли марок А, Т и Г (табл. 1). Из рассмотренных углей при малых расходах ПУТ наиболее предпочтительными являются угли марок А и Т, а при высоких расходах ПУТ – смесь углей Т и Г. Коэффициент компенсации ПУТ за счет снижения расхода ПГ (K_K) изменялся в пределах от 0,3 до 0,6 м³/кг.

Режим с вдуванием на 1 т чугуна 50-100 кг ПУТ. Данный расчет выполнен для шихтовых и технологических условий, типичных для работы доменного цеха в 2011 г. (табл. 2, режим 1). Анализ показывает, что при современных ценах на ПГ и кокс более

Таблица 1

Химический состав пылеугольного топлива, приготовленного из различных марок угля

Марка угля	Химический состав ПУТ, %							Содержание в золе, %	
	C ^p	H ^p	O ^p	N ^p	S ^p	W ^p	A ^p	CaO	SiO ₂
А	85,0	1,0	1,5	0,5	1,0	1,0	10,0	3,8	51,4
Т	82,4	3,5	1,1	1,0	1,0	1,0	10,0	4,0	49,9
Г	70,6	5,2	9,0	2,5	0,4	1,0	11,3	7,8	52,0

Расчет максимально возможного расхода ПУТ для условий ДП 5 ПАО «ММК им. Ильича» (база – ноябрь 2010 – март 2011)

Параметры	База	ПУТ, приготовленное из угля марки									
		A	T	50 % Г + 50 % Т							
		Применение базового агломерата с содержанием железа 52,85 %	Применение агломерата с содержанием железа 54,6 %	Применение перспективного агломерата с содержанием железа 56,8 % с различной долей окатышей в шихте				Применение перспективного высокоосновного агломерата с содержанием железа 55,3 %			
				100 кг/т чугуна		200 кг/т чугуна					
Режим	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Производительность, %	100,0	101,0	100,7	104,4	106,0	106,5	107,8	106,4	107,7	108,0	109,3
Производительность, т/сутки	4014	4054	4042	4189	4254	4276	4328	4272	4323	4335	4387
Кокс сухой скиповой, кг/т чугуна	476,0	449,3	450,5	458,9	415,1	452,9	399,1	453,3	399,5	447,5	393,7
Агломерат базовый, кг/т чугуна	1589	1589	1589	–	–	–	–	–	–	–	–
Агломерат улучшенного качества, кг/т чугуна	–	–	–	1481	1481	1534	1534	1424	1424	1294	1294
Окатыши СевГОК, кг/т чугуна	150	150	150	200	200	100	100	200	200	350	350
Известняк обычный, кг/т чугуна	41	42	42	39	46	27	34	39	46	3	10
Расход сухого дутья, м ³ /т чугуна	1281	1250	1256	1224	1162	1204	1142	1205	1143	1186	1124
Температура дутья, С	1099	1099	1099	1099	1099	1099	1099	1099	1099	1099	1099
Расход природного газа, м ³ /т чугуна	79	55	55	79	–	79	–	79	–	79	–
ПУТ, кг/т чугуна	–	40	40	–	110	–	120	–	120	–	120
Содержание кислорода в дутье, %	23,1	23,1	23,1	23,1	23,1	23,1	23,1	23,1	23,1	23,1	23,1
Выход сухого колошникового газа, м ³ /т чугуна	1831	1794	1805	1755	1671	1726	1643	1730	1647	1696	1614
Степень использования СО, доли	0,393	0,410	0,407	0,407	0,447	0,409	0,450	0,412	0,454	0,413	0,456
Степень прямого восстановления, доли	0,293	0,316	0,309	0,293	0,355	0,293	0,349	0,293	0,349	0,293	0,349
Выход горновых газов, м ³ /т чугуна	1779	1697	1715	1707	1531	1681	1511	1683	1512	1659	1488
Выход восстановительных газов, м ³ /т чугуна	792	734	748	764	635	754	631	755	632	745	622
Выход шлака, кг/т чугуна	478	479	479	394	405	371	381	367	377	363	373
Приход серы с шихтой, кг/т чугуна	7,3	7,3	7,3	7,0	7,2	6,9	7,1	6,9	7,0	6,8	6,9
Содержание MgO в шлаке, %	4,75	4,75	4,75	6,10	6,10	6,38	6,38	6,28	6,28	6,19	6,19
Основность CaO/SiO ₂	1,206	1,206	1,206	1,206	1,206	1,206	1,206	1,206	1,206	1,206	1,206
Основность (CaO + MgO)/SiO ₂	1,326	1,326	1,326	1,364	1,364	1,373	1,373	1,370	1,370	1,367	1,367
Теоретическая температура горения, С	2028	2084	2068	2014	2169	2008	2148	2009	2149	2003	2145
Расход условного топлива, кг/т чугуна	567	552,90	556,45	550	527	544	521	544	521	538	515
Ожидаемое изменение себестоимости чугуна с выпуска, грн./т	–	–92,0	–100,1	–165,9	–366,0	17,4	–196,6	22,8	–191,3	15,8	–198,4
Определяющие показатели:											
– рудная нагрузка, т/т кокса	3,76	3,98	3,97	3,77	4,17	3,72	4,22	3,69	4,19	3,79	4,30
– выход шлака, кг/т кокса	1003	1066	1064	859	975	819	956	809	944	811	947
– выход горнового газа, м ³ /т кокса	3737	3776	3807	3719	3688	3712	3786	3713	3786	3706	3780
– приход мелочи (0-5 мм) с шихтой, кг/т кокса	500	529	528	296	327	301	341	290	329	284	322
– скорость газа в расплаве, м/с	14,50	18,70	18,37	12,06	18,74	11,63	19,64	11,46	19,04	11,62	19,90

рационально заменять пылеугольным топливом ПГ, а не кокс, поэтому рекомендуется коэффициент компенсации K_k принимать равным 0,6 м³/кг. Это дает больший эффект и позволяет быстрее вывести ПГ из состава дутья.

Из результатов расчета следует, что согласно определяющим показателям корректными в базовых технологических условиях, в основном, являются режимы с вдуванием ПУТ в количестве 40 кг/т чугуна. Сопоставление режимов 1 с 2 и 3 (табл. 2) показывает, что вдувание в горн ПУТ с компенсацией снижением расхода ПГ (-24 м³/т чугуна) обеспечило уменьшение расхода кокса на 25,5-26,7 кг/т чугуна (5,4-5,6 %), прирост производства на 0,7-1,0 % и снижение себестоимости чугуна на 92,0-100,1 грн./т чугуна.

Режим с вдуванием на 1 т чугуна 101-150 кг ПУТ. Данный расчет выполнен при улучшении шихтовых и технологических условий. Коэффициент K_k принимали максимальным (0,6 м³/кг). В качестве основных компенсирующих мероприятий использовали: снижение расхода ПГ вплоть до полного вывода из состава дутья; повышение содержания Fe и основности в агломерате; замену части агломерата окатышами СевГОК.

Для выполнения расчетов специалистами ПАО «ММК им. Ильича» было предложено 10 вариантов агломератов (табл. 3). Технологический

(табл. 2, режимы 8 и 9). Из табл. 2 следует, что в режиме 9 по сравнению с режимом 8 снижение расхода кокса составило 53,8 кг/т чугуна (11,9 %), обеспечено полное выведение из состава дутья природного газа, снижение расхода условного топлива на 23 кг/т чугуна (4,2 %), себестоимости – 191,3 грн./т чугуна и прирост производства – 1,3 %.

Применение в ММК им. Ильича перспективного агломерата с содержанием 55,3 % и основностью (CaO/SiO₂) 1,55 невозможно без повышения до 25 % доли окатышей СевГОК в шихте. Данное мероприятие позволило снизить выход шлака (на т чугуна) до 373 кг, что при вдувании 120 кг ПУТ обеспечило снижение расхода кокса до 393,7 кг (на 53,8 кг; 12,0 %), полное выведение природного газа (79 м³), снижение себестоимости чугуна до 198,4 грн. (табл. 2, режимы 10 и 11).

Сопоставление режимов 1, 4 и 8 (табл. 2) с компенсацией как снижением расхода ПГ, так и обогащением железорудной шихты позволило существенно улучшить газодинамические условия процесса: снизить выход шлака на 84-111 кг/т чугуна (17,5-23,2 %), горновых газов – 72-96 м³/т чугуна (4-5,6 %) и сбавить скорость газа в распаре, что обеспечило прирост производства на 4,4 и 6,4 %.

Следовательно, усиление компенсации в режимах 5 и 9 по сравнению с режимом 2 позволило повысить расход ПУТ от 40 до 110-120 кг/т чугуна (в 2,75 и 3,0 раза), увеличив снижение расхода ПГ с 24

Таблица 3

Химический состав агломератов, предложенных для расчета

Показатели	Значения показателей, %										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Fe _{общ}	54,40	53,70	53,0	54,30	54,70	53,90	53,90	54,60	56,80	55,30	
SiO ₂	8,54	8,88	9,17	8,40	8,40	8,75	9,05	8,27	7,80	7,72	
CaO	10,75	11,20	11,59	10,60	10,59	11,03	11,37	10,43	9,85	11,99	
MnO	0,18	0,19	0,16	0,19	0,11	0,12	0,09	0,12	0,16	0,16	
MgO	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,44	1,45	
Основность CaO/SiO ₂	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,55	

расчет вдувания ПУТ был выполнен для агломератов с наиболее высоким содержанием железа и минимальным содержанием кремнезема при повышении расхода окатышей до 100-200 кг/т чугуна.

Применение агломерата с содержанием железа 54,6 % и основностью (CaO/SiO₂) 1,26 и окатышей СевГОК в количестве – на т чугуна – 200 кг обеспечило снижение расхода кокса до 458,9 кг (на 17,1 кг; 3,6 %), повышение производительности на 4,4 %, снижение себестоимости на 165,9 грн. (табл. 2, режимы 1 и 4). При оптимальном расходе ПУТ (на т чугуна) 110 кг было обеспечено дополнительное снижение расхода кокса до 415,1 кг (на 43,8 кг; 9,5 %), вывод из состава дутья ПГ (79 м³), снижение себестоимости чугуна примерно на 200 грн., прирост производства на 1,6 % (табл. 2, режимы 4 и 5).

Повышение оптимального расхода ПУТ до 120 кг/т чугуна было получено при применении агломерата с содержанием железа 56,8 % и основностью (CaO/SiO₂) 1,26 с расходом окатышей СевГОК до 200 кг/т чугуна

до 79 м³/т чугуна (то есть более чем в 3 раза), расхода кокса – в 1,6-2,0 раза при повышении производительности печи.

Выводы

Для условий ПАО «ММК им. Ильича» возможна реализация первого этапа пылеугольной технологии с расходом ПУТ до 120 кг/т чугуна при внедрении ряда компенсирующих мероприятий, не требующих значительных капитальных затрат и времени.

Рассчитаны варианты эффективности применения ПУТ для существующих и перспективных технологических условий ММК им. Ильича. Лучшие результаты получены для агломерата с содержанием железа 56,8 % и основностью (CaO/SiO₂) 1,26 при использовании до 200 кг/т окатышей СевГОК: вдувание в данных условиях на 1 т чугуна 120 кг ПУТ обеспечит снижение расхода кокса на 53,8 кг/т чугуна, вывод из состава дутья природного газа, снижение расхода условного топлива на 23 кг/т чугуна (4,3 %),

себестоимости – 191,3 грн./т чугуна и прирост производства – 1,3 %.

Дальнейшее повышение расхода ПУТ и снижение расхода кокса до 300-350 кг/т чугуна возможны на основе принципа полной и комплексной компенсации,

что, прежде всего, предопределяет необходимость снижения выхода шлака до 300-350 кг/т чугуна, повышение температуры дутья и содержания в нем кислорода, дальнейшее улучшение качества кокса, ПУТ и железорудной шихты.



ЛИТЕРАТУРА

1. Савчук Н. А., Курунов И. Ф. Доменное производство на рубеже XXI века // Новости черной металлургии за рубежом. – 2000. – Ч. 2. – Приложение 5. – М.: Черметинформация. – 42 с.
2. Перспективные режимы доменной плавки с применением пылеугольного топлива для технологических условий доменных цехов Украины / С. Л. Ярошевский, А. И. Ковалев, А. М. Кузнецов и др. // Наукові праці Донецького державного технічного університету. – Серія: Металургія. – Вип. 31. – Донецьк: ДонНТУ, 2001. – С. 33-43.
3. Ярошевский С. Л. Перспективность и эффективность доменной технологии определяется степенью замены кокса пылеугольным топливом // Доклад на конференции «Пылеугольное топливо – альтернатива природному газу при выплавке чугуна», Донецк, 18-21 декабря 2006 г. – Донецк: Норд компьютер, 2007. – 21 с.
4. Перспективы и эффективность технологии выплавки чугуна в доменных печах / Л. С. Ярошевский, З. К. Афанасьева, А. В. Кузин и др. // Новини науки Придніпров'я: Інженерні дисципліни – 2010. – № 5 – С. 25-31.
5. Рамм А. Н. Современный доменный процесс. – Металлургия, 1980. – 304 с.

Анотація

Бойко В. С., Матвієнков С. А., Ярошевський С. Л., Кузін А. В., Климанчук В. В., Струтинський В. А.

Розрахунок та оцінка ефективності технології доменної плавки із застосуванням пиловугільного палива в умовах ПАТ «ММК ім. Ілліча»

Розрахунковим шляхом було визначено оптимальні витрати пиловугільного палива в умовах ПАТ «ММК ім. Ілліча». Показано, що при застосуванні наукового принципу повної та комплексної компенсації рівень витрати пиловугільного палива підвищився з 40 до 110-120 кг/т чавуну.

Ключові слова

доменна піч, пиловугільне паливо, технологічний режим, компенсуючі заходи

Summary

Boyko V., Matviyenko S., Yaroshevskiy S., Kuzin A., Klimanchuk V., Strutinskiy V.
Calculation and evaluation of blast furnace operation practice efficiency with application of pulverized coal at «Ilyich iron and steel works» PJSC

here was calculated the optimal consumption rate of pulverized coal at «Ilyich Iron and Steel Works» PJSC. It is shown that application of scientific principle of full and complex compensation raised the consumption rate of pulverized coal from 40 to 110-120 kg/t of pig iron.

Keywords

blast furnace, pulverized coal, operating practices, compensating activities