

В. В. Климанчук, Н. В. Косолап, И. А. Лукьяненко, В. А. Струтинский, С. Л. Ярошевский*, Т. А. Ивлева*

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

*Донецкий национальный технический университет, Донецк

Технология и эффективность замены природного газа и части кокса пылеугольным топливом на ПАО «ММК им. Ильича»

Построен и введен в эксплуатацию пылеугольный комплекс мощностью по пылеугольному топливу (ПУТ) 1 млн. т/год на ПАО «ММК им. Ильича». Освоена технология доменной плавки с вдуванием ПУТ в количестве 150-170 кг/т чугуна, позволившая полностью вывести из состава дутья ПГ, снизить расход кокса на 109-155 кг/т чугуна (21,0-29,9 %), повысить производительность доменных печей. Успешному освоению ПУТ-технологии способствовали следующие компенсирующие мероприятия: повышение содержания кислорода в дутье на 1,57-2,28 %; вывод из состава дутья природного газа (ПГ); улучшение качества кокса и агломерата, высокое качество ПУТ и др. Ведется работа по совершенствованию пылеугольной технологии.

Ключевые слова: пылеугольное топливо, расход кокса, компенсирующие мероприятия, производительность печи

Решающее влияние на экономику доменной плавки оказывает расход энергоносителей, в первую очередь ПГ и кокса, стоимость которых близка к стоимости чугуна. Поэтому за последние 35-40 лет минимальный расход кокса снижен практически вдвое (до 240 кг/т чугуна) [1-3]. Одним из наиболее эффективных заменителей кокса является ПУТ, промышленное внедрение которого началось в 80-х годах прошлого века: США (металлургический завод в Эшленде), СССР (Донецкий металлургический завод), Китай [1, 4, 5].

В настоящее время ПУТ применяют более чем в 30 странах, с его применением в мире ежегодно выплавляется свыше 600 млн. т чугуна. Доля замены кокса ПУТ выросла до 40-50 %, ведутся научно-исследовательские работы по повышению данного показателя до 60-80 % [1, 2, 6, 7].

В Украине в 2009-2012 гг. ПУТ-установки появились как на ПАО «Донецксталь» – металлургический завод (г. Донецк), так и ПАО «Алчевский металлургический комбинат» (г. Алчевск), ОАО «Запорожсталь» (г. Запорожье) и ПАО «ММК им. Ильича» (г. Мариуполь). Таким образом, в Украине доля чугуна, выплавленного с применением ПУТ, увеличилась до 44 %, что обеспечило снижение расхода кокса на 10-20 % и вывод из состава дутья ПГ в количестве 2,5-3,0 млрд. м³/год. Полным ходом идет строительство ПУТ-комплекса на ПАО «Енакиевский металлургический завод» (г. Енакиеве).

Пылеугольный комплекс на ПАО «ММК им. Ильича», введенный в эксплуатацию в сентябре 2012 г. мощностью (по ПУТ) до 1 млн. т/год, построен по проекту фирмы «Minmetals» (Китай) и является одним из однотипных ПУТ-комплексов, производимых ведущими фирмами мира Küttner, Paul Wurth и другими.

В 2013 г. с использованием данного комплекса расход ПУТ на доменных печах № 1-5 вырос до 150-170 кг/т чугуна, что позволило исключить вдувание в горн ПГ, снизить расход кокса с 500-520 до 360-380 кг/т чугуна и повысить производительность печей.

Принцип полной и комплексной компенсации. Поскольку последствия вдувания дополнительного топлива можно рассчитать, очевидно, что одновременно с увеличением расхода топлива необходимо применять соответствующие изменения, так называемые «компенсирующие мероприятия», которые должны нейтрализовать негативное влияние комбинированного дутья на технологический режим.

Для характеристики теплового режима горна приняли полученное из выражения теплового баланса для нижней зоны теплообмена [5] уравнение необходимой теоретической температуры горения (для исходных – индекс «0», для новых технологических условий – «1»):

$$t_1 = t_H \left(1 - 0,7 \cdot \frac{r_{d0} - r_{d1}}{r_{d0}} \right) \cdot \frac{K_0}{K_1} \cdot \frac{V_0}{V_1} \cdot (t_0 - t_H), \quad (1)$$

где t_0 и t_1 – необходимая теоретическая температура горения, при которой обеспечивается сохранение базовой температуры продуктов плавки, С; r_{d0} и r_{d1} – степень прямого восстановления, в долях единицы; V_0 и V_1 – выход горновых газов, м³/т кокса; K_0 и K_1 – расход кокса, кг/т чугуна; t_H – температура в зоне замедленного теплообмена, °С.

Для характеристики газодинамического режима использовали уравнение:

$$P_1 = P_0 \cdot \frac{V_{Г0}}{V_{Г1}} \cdot \left(\frac{\gamma_0 \cdot \Theta_0 \cdot d_0}{\gamma_1 \cdot \Theta_1 \cdot d_1} \right)^{0,5}, \quad (2)$$

где P_1 и P_0 – производительность доменной печи, %; $V_{Г0}$ и $V_{Г1}$ – выход газов, м³/т чугуна; Θ_0 и Θ_1 – средняя температура газов, К; γ_0 и γ_1 – средняя плотность газов, кг/м³; d_0 и d_1 – показатель газопроницаемости шихты, %.

Ход восстановительных процессов, время сгорания ПУТ в фурменных зонах и производительность

печи, оценивали по методикам Китаева Б. И., Бабия В. И. и Рамма А. Н. [8-10].

Для оценки эффективности компенсирующих мероприятий использовали понятие суммарного коэффициента (ΣK_3) замены кокса дополнительным топливом [5, 11]:

$$\Sigma K_3 = \frac{\Delta Q_{\text{ккм}} + \Delta Q_{\text{кдт}}}{\Delta Q_{\text{дт}}}, \quad (3)$$

где $\Delta Q_{\text{ккм}}$ и $\Delta Q_{\text{кдт}}$ – экономия кокса за счет компенсирующих мероприятий и повышения расхода дополнительного топлива, кг; $\Delta Q_{\text{дт}}$ – прирост расхода дополнительного топлива, кг.

Из выполненных расчетов, анализа результатов опытных и промышленных плавов, проведенных в Украине и за рубежом, следует, что при величине $\Sigma K_3 \geq 1,0$ кг/кг повышение расхода ПУТ не вызывает ухудшения базовых технологических условий: выход восстановительных газов от 1 кг ПУТ и кокса примерно равны; по мере увеличения расхода дополнительного топлива не должно происходить негативных изменений в состоянии технологического режима, которые бы снижали эффективность применения дополнительного топлива и ограничивали величину его оптимального расхода.

Из вышесказанного можно сделать вывод, что при величине $\Sigma K_3 \cong 1$, технологический режим обеспечен полной и комплексной компенсацией. Одним из основных компенсирующих мероприятий может быть уменьшение расхода ПГ. Падение теоретической температуры горения на единицу вдуваемого ПУТ в 2,5-3,0 раза меньше, чем при вдувании ПГ. Расчеты показывают, что ΣK_3 , обеспечивающий полную и комплексную компенсацию, для ПГ в 2-3 раза больше, чем для ПУТ. Повышению ΣK_3 будут способствовать также снижение на 1 т чугуна расхода известняка и выхода шлака, повышение температуры дутья, улучшение прочности и фракционного состава железорудной шихты, качества кокса, ПУТ и другие мероприятия.

С целью повышения достоверности расчета технологических режимов предложены параметры, превышение определенного уровня которых маловероятно в реальных сложившихся условиях. Данные параметры назвали определяющими. К ним отнесены: рудная нагрузка, т/т кокса (6,0); количество мелочи 5-0 мм в железорудной шихте, кг/т кокса (400); выход шлака, кг/т кокса (1000); выход горнового газа, м³/т кокса (5000); теоретическая температура горе-

ния кокса, °С (2100-2300); скорость газа в зоне пластического состояния шихтовых материалов, м/с (20). Указанные значения определяющих параметров рассматривались нами как граничные предельные, разделяющие области реально достижимых и маловероятных режимов доменной плавки с применением ПУТ.

Доменные печи, шихтовые и технологические условия. Типовые доменные печи № 1-5 ПАО «ММК им. Ильича» имеют полезный объем 1033, 1300, 2000, 2002 и 2300 м³ соответственно, выплавляют малосернистый (0,020 %) и низкомарганцевый передельный чугун, поставляемый на внедоменную десульфурацию (до 0,005 %) и далее в конвертерный цех [12].

В качестве основного железорудного материала используется свой офлюсованный агломерат с содержанием мелочи 5-0 мм в скиповом до 9 % (табл. 1).

Основным поставщиком металлургического кокса является ПАО «Авдеевский коксохимический завод» (г. Авдеевка) (табл. 2). Подготовка металлургического кокса к доменной плавке в цехе является типовой. При этом перед освоением технологии пылевдувания на нижних коксовых грохотах размер ячеек был увеличен до 28-32 мм.

Для производства ПУТ используется уголь марки СС с содержанием золы до 8 % и серы < 0,5 % (табл. 3).

Таблица 1

Качество агломерата ПАО «ММК им. Ильича» (по данным агрофабрики), %

Показатели качества агломерата	2012 г.		2013 г.	
	июль-август	февраль-март	апрель-май	июнь
Fe _{общ}	53,08	54,63	54,78	54,21
FeO	12,63	12,72	12,26	12,39
CaO	12,97	11,67	11,64	11,95
MgO	1,31	1,21	1,08	1,08
SiO ₂	9,22	9,33	9,39	9,66
Al ₂ O ₃	1,09	0,87	0,85	0,81
P	0,04	0,05	0,04	0,038
Zn	0,04	0,06	0,06	0,07
Основность CaO/SiO ₂	1,41	1,25	1,24	1,24
Барабанная проба,	64,84	67,42	73,58	72,47
Содержание фракции 5-0 мм*	13,48	13,59	12,49	13,07

*содержание мелочи 5-0 мм в скиповом агломерате после его грохочения в доменном цехе составляет около 9 %

Таблица 2

Качество кокса ПАО «Авдеевский КХЗ», %

Показатели качества кокса	2012 г.		2013 г.	
	июль-август	февраль-март	апрель-май	июнь
Зола	11,58	11,01	11,18	11,21
Сера	0,99	0,77	0,75	0,75
M25	88,32	89,30	89,44	89,36
M10	7,61	6,85	6,83	6,99
Содержание фракции >80 мм	12,45	6,34	6,34	6,61
CSR	нд	51,23	53,42	52,40
CRI	нд	33,30	32,85	33,36

Оценку эффективности использования ПУТ выполнили на примере доменной печи № 5. Основные данные по технологии с применением ПУТ приведены в табл. 4 и на рисунке.

Из приведенных данных видно, что на ПАО «ММК им. Ильича» для подготовки к освоению технологии пылевдувания приняты следующие мероприятия, компенсирующие его негативное влияние на технологию (табл. 1-4): повышены в агломерате

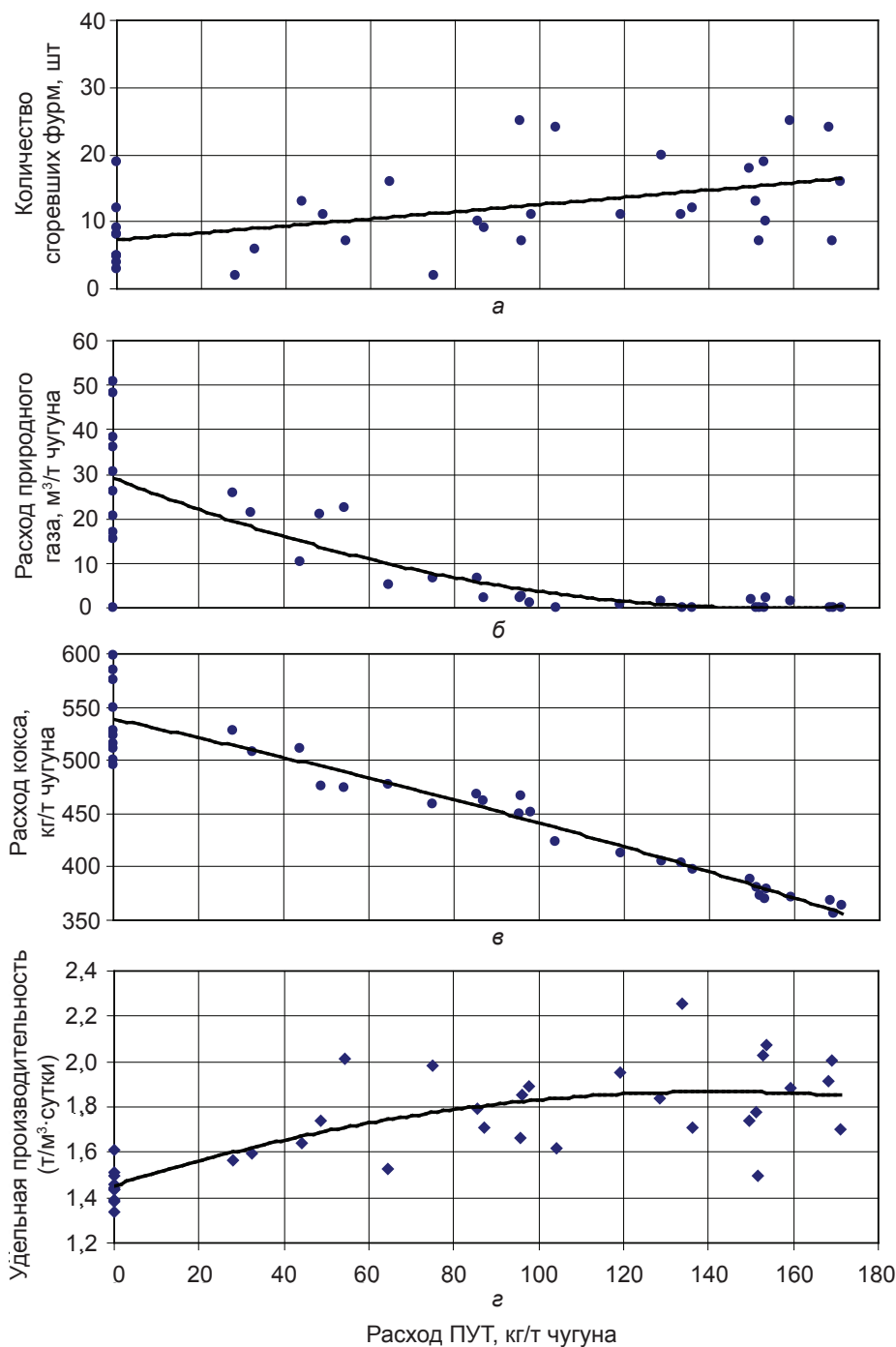
Таблица 3
Качество пылеугольного топлива, используемого на ПАО «ММК им. Ильича», %

Показатели качества ПУТ	2013 г.		
	февраль-март	апрель-май	июнь
Влага	0,99	1,02	0,95
Зола	7,10	7,78	7,47
Сера	0,52	0,32	0,27
Летучие	14,40	19,80	20,70

Таблица 4

Показатели работы доменной печи № 5 ПАО «ММК им. Ильича» в 2012-2013 гг.

Показатели	2012 г.	2013 г.		
	июль-август	февраль-март	апрель-май	июнь
Производство среднесуточное, т/сутки	3274	3827	4044	3910
Удельная производительность, т/(м ³ ·сутки)	1,42	1,66	1,76	1,7
Производство приведенное (без учета ПГ и ПУТ), т/сутки	3274	–	–	3459
Расход сухого скипового кокса, кг/т чугуна	519	410	384	364
Расход кокса приведенный (без учета ПГ и ПУТ), кг/т чугуна	519	–	–	485
Расход шихтовых материалов, кг/т чугуна:				
агломерат ММК им. Ильича	1594	1668	1642	1732
окатыши СевГОК	117	9	0	4
руда железная	30	25	37	32
руда ильменитовая	4	0	17	1
брикеты	0	5	0	8
сварочный шлак	2	0	0	1
МОС-2	37	32	38	22
скрап	0	0	1	3
стружка	0	0	12	5
известняк обычный	4	4	2	2
Дутье:				
расход, м ³ /мин	3739	4089	4133	3854
давление горячего дутья, кПа	207	252	213	224
температура дутья, °С	1056	1041	987	1064
кислород в дутье, %	20,8	22,37	23,08	23,12
расход ПУТ, кг/т чугуна	0	120	150	171,3
расход ПГ, м ³ /т чугуна	37	0	1	0
Колошниковый газ:				
давление, кПа	74	120	72	80
температура, °С	284	335	331	344
состав, %: СО	23,5	23,95	25,09	25,2
Н ₂	5,42	5,14	4,45	5,75
Вынос колошниковой пыли, кг/т чугуна	29,49	22,98	21,26	29,52
Химический состав чугуна, % Si	0,77	0,68	0,65	0,7
Mn	0,16	0,19	0,17	0,14
S	0,017	0,018	0,021	0,02
Химический состав шлака, %				
Al ₂ O ₃	7,73	6,96	7,02	6,67
MgO	5,43	5,29	4,96	4,59
MnO	0,18	0,23	0,24	0,21
FeO	0,34	0,32	0,3	0,3
S	1,35	1,11	1,05	0,96
Основность шлака CaO/SiO ₂	1,22	1,19	1,18	1,16
Основность шлака (CaO+MgO)/SiO ₂	1,36	1,33	1,31	1,28
Интенсивность плавки по суммарному углероду, т/(м ³ ·сутки)	0,78	0,882	0,94	0,909
Температура чугуна, °С	1473	1464	1466	1454



Зависимость показателей доменной плавки от расхода ПУТ в условиях ПАО «ММК им. Ильича» (период сентябрь 2012 – июнь 2013 г., построен по среднемесячным данным работы доменных печей № 1, 3 и 5): а – количество сгоревших фурм, шт; б – расход природного газа, м³/т чугуна; в – расход кокса, кг/т чугуна; г – удельная производительность, т/(м³ · сутки)

содержание железа на 1,13-1,70 % и барабанная прочность – на 2,58-8,74 %, опробовано введение в шихту окатышей (до 200 кг/т чугуна), что обеспечило снижение выхода шлака до 418-448 кг/т чугуна, то есть на 60-80 кг по сравнению с периодом 2008-2009 гг.; снижена основность шлака (CaO/SiO₂) на 0,03-0,06 единиц, что способствовало снижению выхода шлака и улучшению его физических свойств; использовано высококачественное ПУТ по содержанию золы и серы, что также способствовало соответственному снижению выхода шлака и расходу известняка; улучшено качества кокса, прежде всего по показателям M10 на 0,62-0,78 % и CSR до 51,23-53,42 %, снижено

содержание фракции >80 мм почти в два раза; выведен из состава дутья ПГ и повышено содержание в нем кислорода, что обеспечило повышение теоретической температуры горения и снижение выхода горновых и колошниковых газов.

Из рисунка также видно, что указанных средств оказалось достаточно для обеспечения эффективной работы доменных печей при вдувании ПУТ в горн до 150-170 кг/т чугуна.

Эффективность применения ПУТ. В целом период освоения с сентября 2012 г. по июнь 2013 г. пылеугольной технологии на ПАО «ММК им. Ильича» является успешным: существенно снижены расход энергоносителей и себестоимость чугуна, повышена производительность доменных печей.

Расход кокса и энергоресурсов. В анализируемых периодах выведение из состава дутья ПГ в количестве 37 м³/т чугуна обеспечило рост теоретической температуры горения на 153 °С и снижение выхода горновых газов на 57 м³/т чугуна. Расход кокса в анализируемых периодах снижен на 109-155 кг/т чугуна (21,0-29,9 %), что определило снижение его объемной доли в шихте на 5,5-9,4 % (табл. 4 и 5).

Из рисунка следует, что суммарный коэффициент замены ΣK_3 при изменении расхода ПУТ от 0 до 170 кг/т чугуна составил 1,04 кг/кг, что соответствует основному требованию принципа полной и комплексной компенсации [2, 5].

Корректность полученных данных подтверждается расчетом расхода кокса, выполненного по методике проф. А. Н. Рамма [10]. Из табл. 6 следует, что экспериментальные значения совпали с расчетными (погрешность $\pm 1,6$ %).

Это свидетельствует о полном сгорании ПУТ в печи и высокой, близкой к коксу, эффективности его использования в печи.

Из табл. 4 следует, что эффективность компенсирующих мероприятий без вдувания ПУТ (июль-август 2012 г.) и с вдуванием (июнь 2013 г.) составила 34 кг/т чугуна (0,2 кг/кг). Следовательно, коэффициент замены кокса только ПУТ составил 0,8 кг/кг, что соответствует справочным данным [13]. Коэффициент замены углерода кокса углеродом ПУТ несколько выше и составляет 0,983-0,993 кг/кг (табл. 5).

Освоение ПУТ-технологии сопровождалось также снижением расхода условного топлива на 21-26 кг/т

Расчетные показатели работы доменной печи № 5 ПАО «ММК им. Ильича»

Показатели	2012 г.	2013 г.		
	июль-август	февраль-март	апрель-май	июнь
Объемная доля кокса в шихте, %	52,4	46,9	45,2	43
Расход условного топлива, кг/т чугуна	565	539	542	544
Интенсивность плавки по коксу, т/(м ³ ·сутки)	739	682	675	619
Расход дутья, м ³ /т чугуна	1322	1138	1126	1075
Выход колошникового газа, м ³ /т чугуна	1956	1755	1730	1704
Выход горновых газов, м ³ /т чугуна	1711	1502	1528	1481
Степень использования СО, %	41,6	45,3	43,2	43,2
Выход шлака, кг/т чугуна	456	427	418	448
Степень использования обессеривающей способности шлака, %	88,7	77,9	74,7	72
Приход серы с шихтой, кг/т чугуна	6,8	4,9	4,6	4,5
Выход горновых газов, м ³ /т чугуна	1711	1502	1528	1481
Выход газов-восстановителей, м ³ /т чугуна	665	620	657	649
Теоретическая температура горения, °С	2076	2060	≈2100	
Необходимая теоретическая температура горения, °С	2076	2208	2099	2178
Степень прямого восстановления FeO, %	50,8	49,1	44,3	46,4
Приход тепла, кДж/кг чугуна	10086	9618	9630	9479
Коэффициент полезного действия тепла, %	87	89,5	89,1	90,4
Общие потери тепла, кДж/кг чугуна	1308	1013	1051	913
Время пребывания газов в печи, с	3,5	2,7	2,1	2,4
Время пребывания материалов в печи, ч: мин	9:20	9:02	8:49	9:09
Коэффициент замены углерода кокса углеродом ПУТ, кг/кг	–	0,973	0,983	0,993
Снижение стоимости затрат на энергоресурсы, грн/т чугуна	–	157	179	186
<i>Определяющие показатели:</i>				
Рудная нагрузка, т/т	3,44	4,25	4,55	4,97
Выход шлака, кг/т кокса	878	1040	1089	1231
Выход горновых газов, м ³ /т кокса	3300	3684	3997	4069
Приход мелочи 5-0 мм с шихтой, кг/т кокса	300	382	414	448
Скорость газа в распаре, м/с	7,9	11,7	16,8	17,2

чугуна (3,72-4,6 %) и стоимости энергоресурсов на 157-186 грн (табл. 5).

Производительность печей. Производительность печей при вдувании ПУТ существенно повысилась, что является прямым следствием увеличения содержания кислорода в дутье на 1,57-2,28 %, снижение выхода шлака, улучшение качества кокса и ПУТ (табл. 4, рисунок). Суммарным показателем указанных изменений, является снижение выхода горновых газов на 10,7-13,4 % на 1 т чугуна, что при прочих равных условиях предопределяет аналогичное повышение производительности печи. Столь существенному приросту производительности способствовал, несомненно, низкий базовый уровень производства – 1,42 т/(м³·сутки). Вдувание ПУТ предопределяет снижение производительности доменных печей за счет ухудшения таких определяющих показателей как выход шлака (1040-1231 кг/т кокса) и приход содержания мелочи 5-0 мм с железорудной шихтой (382-448 кг/т кокса). Определяющие показатели значительно превосходят предельно-допустимый уровень [11].

Тем не менее, производительность в опытных периодах существенно возросла. Объяснить это можно интенсивной компенсацией данных показателей скоростью газа в распаре (11,7-17,2 м/с) и выходом горновых газов (3684-4069 м³/т кокса), значения которых при вдувании ПУТ в условиях ПАО «ММК им. Ильича» существенно ниже критического уровня.

При развитии ПУТ-технологии в условиях ПАО «ММК им. Ильича» необходимо, прежде всего, обеспечить снижение уровня выхода шлака и мелочи 5-0 мм в железорудной шихте до базового уровня с тем, чтобы сохранить возможность повышения производительности печей (табл. 5).

Температурный режим печи. Согласно профессору А. Н. Рамму и других вдувание в горн дополнительного топлива должно сопровождаться сохранением на базовом уровне теоретической температуры горения [10, 14]. Указанные условия длительное время успешно использовались при освоении выплавки чугуна с ПГ.

С применением ПУТ корректность использования данного принципа становится спорной, поскольку

Таблица 6

**Оценка фактического и расчетного расхода
кокса при работе доменной печи № 5
ПАО «ММК им. Ильича»**

Показатели	2012 г.	2013 г.			
	июль-август	февраль-март	апрель-май	июнь	
Фактический расход кокса, кг/т чугуна	519,0	410,0	384,0	364,0	
Расчетный расход кокса, кг/т чугуна	–	405,0	390,0	359,0	
Отклонение	кг/т чугуна	–	+5,0	-6,0	+5,0
	%	–	+1,2	-1,6	+1,4

при снижении расхода кокса на 30-50 % качественно изменяются все основные параметры технологии, в том числе и теоретическая температура горения. Практика доменных печей Европы показывает, что при вдувании ПУТ в количестве 150-200 кг/т чугуна повышение теоретической температуры горения равнялась 2150-2200 °С и выше [15].

Согласно принципу полной и комплексной компенсации теоретическая температура горения при вдувании в горн ПУТ сохраняется на базовом уровне или повышается в зависимости от уровня и эффективности компенсирующих мероприятий [2, 5].

На Донецком металлургическом заводе при использовании кокса улучшенного качества и выводе из дутья ПГ при вдувании в горн 170 кг/т чугуна ПУТ теоретическая температура горения была повышена до 2170 °С (на 100-120 °С). Обеспечение при этом полной и комплексной компенсации позволило сохранить ровный и форсированный ход печей, высокую температуру чугуна на выпуске, полноту сгорания ПУТ и др. [16].

На первом этапе освоения ПУТ-технологии на ПАО «ММК им. Ильича» теоретическая температура горения, в основном, сохранилась на базовом уровне или незначительно повысилась, что привело к снижению температуры чугуна на 7-19 °С и эффективности его десульфурации (табл. 4 и 5). Возможно, что повышение количества прогаров воздушных фурм при вдувании ПУТ является следствием данного несоответствия (рисунок).

На комбинате проводится работа по аналитической и экспериментальной оценке оптимального уровня теоретической температуры горения при вдувании ПУТ, реализации мероприятий по поддержанию данного уровня при работе доменных печей.

Десульфурация чугуна. ПАО «ММК им. Ильича» традиционно выплавляет чугун с содержанием серы (0,020 % и ниже) при высоких показателях эффективности процесса десульфурации [12]. В базовом периоде коэффициент использования обессеривающей способности шлака составил 88,7 %, что значительно превышает уровень отечественных предприятий.

Вдувание ПУТ за счет высокого его качества и кокса, эффективности их применения позволило существенно снизить приход серы с шихтой с 6,8 до 4,9-4,5 кг/т чугуна (27,9-33,8 %). Это позволило сохранить базовое качество чугуна по содержанию се-

ры, несмотря на снижение выхода шлака и его основности. Снижение эффективности использования обессеривающей способности шлака на 10,4-16,7 % (абс.) является, прежде всего, следствием снижения температурного уровня горна и чугуна на выпуске (табл. 4 и 5).

Особенности материально-тепловых балансов при вдувании ПУТ. Анализ выполненных материально-тепловых балансов подтверждает положительные изменения в технологии доменной плавки при вдувании в горн ПУТ. Прежде всего, это комплексные компенсирующие факторы: снижение расхода дутья на 184-247 м³/т чугуна (13,9-18,7 %), выхода горновых газов на 183-230 м³/т чугуна (10,7-13,4 %), выхода колошниковых газов на 201-252 м³/т чугуна (10,3-12,9 %), выхода шлака на 8-38 кг/т чугуна, прихода серы с шихтой на 27,9-33,8 %, степени прямого восстановления FeO на 5,5-9,4 % (абс.) и др. (табл. 5).

Итогом указанных изменений, естественно, стали снижение потребности тепла при выплавке чугуна на 456-607 кДж/кг (4,5-6,0 %) и общих потерь тепла на 257-395 кДж/кг (19,6-30,2 %), что определило улучшение коэффициента полезного действия тепла с 87,0 до 89,1-90,4 %. Благоприятные изменения технологии подтверждаются также уровнем определяющих показателей, таких как выход горновых газов 3684-4069 м³/т кокса и скоростью газа в распаре 11,7-17,2 м/с, не превышающих уровень их предельных значений (табл. 5).

Узким звеном технологии является газодинамика печи, определяющая относительно низкий её уровень производительности 1,66-1,76 т/(м³·сутки). Количественно характеризуют ситуацию определяющие показатели: приход мелочи 5-0 мм с железорудной шихты (382-448 кг/т кокса) и выход шлака (1040-1231 кг/т кокса). При вдувании ПУТ уровень этих показателей существенно превысил их предельные значения. Очевидно, что при дальнейшем повышении расхода ПУТ именно проблемы газодинамики и неизбежное снижение производительности печей будут препятствовать освоению более эффективных технологических режимов.

Перспективы ПУТ-технологии. Высокий уровень стоимости реализации ПУТ-технологии является основной причиной интенсификации ее развития и повышения эффективности. В настоящее время в зарубежной практике расход ПУТ составляет 160-270 кг/т чугуна, при этом расход кокса снижен до 240-300 кг/т чугуна при высоком уровне (> 2,0 т/(м³·сутки)) производительности доменных печей [1-3].

Для повышения расхода ПУТ и дальнейшего снижения расхода кокса необходимо, прежде всего, внедрение в практику наиболее эффективных компенсирующих мероприятий. Традиционно к ним относятся: повышение температуры дутья до 1150-1200 °С и выше, повышение содержания в дутье кислорода до 25-30 % и выше, мероприятия по снижению выхода шлака до 300-350 кг/т чугуна, снижение содержания мелочи 5-0 мм в агломерате до 5 % и ниже, улучшение качества кокса и ПУТ и др.

Перспективными и эффективными компенсирующими мероприятиями являются:

– подготовка кокса к доменной плавке по фракционному составу: повышение содержания в скиповом коксе наиболее эффективных фракций 40-80 мм до 90 % и выше; производство и загрузка в смеси с железорудной шихтой коксового орешка крупностью 10-40 мм в количестве 40-150 кг/т чугуна. Подготовка кокса к доменной плавке по фракционному составу само по себе способствует снижению расхода кокса до 5 %, а также создает условие для повышения расхода ПУТ на 20-30 %. За рубежом данное мероприятие в промышленном масштабе внедрено одновременно с освоением пылеугольной технологии, что обеспечило, как минимум, сохранение производительности печей на базовом уровне при значительном снижении расхода кокса [17-20];

– использование ПУТ с зольностью 3-5 %, приготовленного из отечественных углей, позволит повысить его расход и эффективность использования. В Украине в связи со снижением добычи угля по сравнению с 1991 г. сложились благоприятные предпосылки для реализации данного мероприятия. Кроме этого, значительный эффект возможен при замене низкосольным концентратом импортных углей, используемых для производства ПУТ;

– замена части кокса и ПУТ восстановительными газами, полученными из угля в агрегатах для производства чугуна типа Corex, Romelt и др. Показано, что при вдувании до 500 м³/т чугуна такого газа, коэффициент замены кокса газом составил 0,2-0,3 кг/м³ [21].

Имеется длительный промышленный опыт реализации подобного мероприятия за рубежом [22].

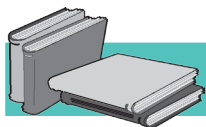
Выводы

На ПАО «ММК им. Ильича» построен и введен в эксплуатацию пылеугольный комплекс мощностью по ПУТ 1 млн. т/год.

Освоена технология доменной плавки с вдуванием на 1 т чугуна ПУТ в количестве 120-170 кг, позволившая полностью вывести из состава дутья ПГ, снизить расход кокса на 109-155 кг/т чугуна (21,0-29,9 %), затраты на энергоресурсы – на 157-186 грн, повысить производительность доменных печей.

Успешному освоению ПУТ-технологии способствовали в соответствии с теорией полной и комплексной компенсацией реализация следующих мероприятий: повышение содержания кислорода в дутье на 1,57-2,28 %; вывод из состава дутья ПГ; улучшение качества кокса: повышение CSR до 51,23-53,4 %, снижение фракции >80 мм с 12,45 до 6,34-6,61%, улучшение показателя M10 – менее 7 %; улучшение качества агломерата: повышение содержания железа на 1,13-1,7 % и барабанной прочности на 2,58-8,74 %; применение для приготовления ПУТ высококачественных углей зольностью не более 8 % и серы < 0,5 %.

Ведется работа по дальнейшему повышению оптимального расхода ПУТ и эффективности его применения.



ЛИТЕРАТУРА

1. Савчук Н. А., Курунов И. Ф. Доменное производство на рубеже XXI века // Новости черной металлургии за рубежом. – 2000. – Часть II. – Приложение 5. – М.: АО Черметинформация. – 42 с.
2. Ярошевский С. Л., Афанасьева З. К., Кузин А. В. Основные принципы расчета и организации технологии плавки при замене дополнительными видами топлива 30-60 % кокса (отечественный и зарубежный опыт) // Труды Международной научно-практической конференции «Творческое наследие Б. И. Китаева», 11-13 февраля 2009, г. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009. – С. 138-148.
3. Курунов И. Ф. Доменное производство Китая, Японии, Северной Америки, Западной Европы и России // Металлург. – 2010. – № 2. – С. 69-77.
4. Bell S. A. Coal injection – Bellefonte furnace // Metals. – 1968. – Vol. 20. – № 4. – P. 85-88.
5. Ярошевский С. Л. Выплавка чугуна с применением пылеугольного топлива. – М.: Металлургия, 1988. – 176 с.
6. Снижение расхода и дефицитности потребляемых энергоресурсов на производство чугуна – основной резерв качественного повышения рентабельности металлургии Украины / А. А. Минаев, С. Л. Ярошевский, З. К. Афанасьева и др. // Материалы VII Международной научно-технической конференции «Тепло- и массообменные процессы в металлургических системах», г. Мариуполь, 7-9 сентября 2010 г. – Мариуполь: ПГТУ, 2010. – С. 19-27.
7. Основной ресурс повышения эффективности доменной технологии – снижение расхода кокса до 100-200 кг/т чугуна / С. Л. Ярошевский, А. А. Минаев, И. В. Мишин и др. // V Международный Конгресс по агло-кокса-доменному производству «Проблемы доменного и смежных производств в современных экономических условиях работы горно-металлургического и топливно-энергетического комплексов», Ялта (Украина), 21-25 мая 2012 г. – С. 35-45.
8. Китаев Б. И., Ярошенко Ю. Г., Лазарев Б. Л. Теплообмен в доменной печи. – М.: Металлургия, 1966. – 355 с.
9. Бабий В. И., Иванова И. П. Длительность воспламенения и горения частиц пыли различных марок углей // Материалы III Всесоюзной конференции по теории горения твердого топлива «Горение твердого топлива» – Новосибирск: Наука, 1969. – С. 82-92.
10. Рамм А. Н. Современный доменный процесс. – М.: Металлургия, 1980. – 304 с.
11. 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», г. Донецк, 18-21 декабря 2006 г. – Донецк, Норд компьютер, 2007. – 21 с.
12. Выплавка низкосернистого передельного чугуна при работе доменной печи на сернистом коксе / В. В. Климанчук, В. А. Струтинский, Н. В. Косолап и др. // Металл и литье Украины – 2007. – № 4. – С. 3-7.

13. Волков Ю. П., Шпарбер Л. Я., Гусаров А. К. Технолог-доменщик: Справ. и метод. руководство. – М.: Metallurgiya, 1986. – 261 с.
14. Рамм А. Н. Применение комбинированного дутья в доменной плавке // Современные проблемы металлургии. – М.: АН СССР, 1958. – С. 61-104.
15. Современный уровень доменной технологии / С. Л. Ярошевский, В. П. Терещенко, А. И. Бабиш, З. К. Афанасьева // Металл и литье Украины. – 2006. – № 6. – С.14-19.
16. Эффективность применения кокса улучшенного качества («Премиум») при работе доменных печей с применением пылеугольного топлива (ПУТ) / Ю. В. Филатов, А. Н. Рыженков, А. В. Демченко и др. // Бюллетень «Черная металлургия». – 2011. – № 1. – С. 30-40.
17. Опыты по применению кокса различной крупности в доменных печах / В. Айзенхут, К. Энгель, В. Крафт и др. // Черные металлы. – 1979. – № 2. – С. 25-30.
18. Теоретические и экспериментальные основы подготовки кокса к доменной плавке / А. Л. Подкорытов, А. М. Кузнецов, Е. Н. Дымченко и др. // Металлург. – 2009. – № 6. – С. 34-37.
19. Технология и эффективность подготовки кокса к доменной плавке / А. Л. Подкорытов, А. М. Кузнецов, Е. Н. Дымченко и др. // Металлург. – 2009. – № 8. – С. 32-37.
20. Теория и практика подготовки металлургического кокса к доменной плавке / В. Г. Гусак, А. М. Кузнецов, А. В. Емченко и др. – К.: Наукова думка, 2011. – 216 с.
21. Пат. № 76637 МПК, (2012.01) C21B 5/00. Спосіб роботи групи доменних печей / С. Л. Ярошевський, О. А. Мінаєв, А. В. Ємченко та ін. – Опубл. 10.01.2013, Бюл. № 1.
22. Курунов И. Ф., Савчук Н. А. Состояние и перспективы бездоменной металлургии железа. – М.: ОАО «Черметинформация», 2002. – 198 с.

Анотація

Кліманчук В. В., Косолап М. В., Лук'яненко І. А., Струтинський В. А., Ярошевський С. Л., Івлєва Т. О.

Технологія та ефективність заміни природного газу і частини коксу пиловугільним паливом на ПАТ «ММК ім. Ілліча»

Побудовано і введено в експлуатацію пиловугільний комплекс потужністю за пиловугільним паливом (ПВП) 1 млн. т/рік на ПАТ «ММК ім. Ілліча». Освоєна технологія доменної плавки з вдуванням ПВП в кількості 150-170 кг/т чавуну, що дозволило повністю вивести зі складу дуття природний газ (ПГ), понизити витрати коксу на 109-155 кг/т чавуну (21,0-29,9 %), підвищити продуктивність доменних печей. Успішному освоєнню ПВП-технології сприяли наступні компенсуючі заходи: підвищення вмісту кисню в дутті на 1,57-2,28 %; вивід зі складу дуття ПГ; поліпшення якості коксу і агломерату, висока якість ПВП та ін. Ведеться робота по вдосконаленню пиловугільної технології.

Ключові слова

пиловугільне паливо, витрата коксу, компенсуючі заходи, продуктивність печей

Summary

Klimanchuk V. V., Kosolap N. V., Lulyanenko I. A., Strutinskiy V. A., Yaroshevskiy S. L., Ivleva T. A.

Technology and efficiency of replacement of natural gas and part of coke by a pulverized coal on Ilyich Iron and Steel Works of Mariupol

The complex for pulverized coal injection by power 1 million ton per year was built and put into operation on Ilyich Iron and Steel Works of Mariupol. Technology of the blast-furnace melting with pulverized coal injection 150-170 kg/t cast-iron, allowing fully to show out of natural gas, to reduce coke rate on 109-155 kg/t cast-iron (21,0-29,9 %), to increase the blast furnace productivity. Following compensating measures were use: increase of maintenance of oxygen in blast on 1,57-2,28 %; show out of natural gas; improvement of quality of coke and agglomerate, high quality of pulverized coal and other. Work for improvement pulverized coal technology is conducted.

Keywords

pulverized coal, coke rate, compensating measures, productivity of furnaces

Поступила 07.10.13