

ПЕРСПЕКТИВЫ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В ДОМЕННЫХ ЦЕХАХ УКРАИНЫ

С.Л.Ярошевский (ДонНТУ, г. Донецк)

Технология доменной плавки с вдуванием в горн ПГ, требующая ежегодно на ее реализацию около 2,5 млрд.м³ ПГ, в сложившихся технологических условиях менее эффективна по сравнению с вдуванием ПУТ. В настоящее время в Украине созданы необходимые предпосылки для быстрого и эффективного внедрения доменной технологии с использованием ПУТ.

В 2004 г. около половины производимого в мире чугуна (300 млн. т в год), выплавлялось с применением пылеугольного топлива (ПУТ) и расходом кокса 250-350 кг/т чугуна. Это 25 стран мира, более 120 современных доменных печей, с расходом ПУТ от 100 до 250 кг/т чугуна, при производительности от 2,1 до 3,2 т/ч в сутки, доле замены кокса углем от 20 до 50 % .[1-5].

Близкие к мировому уровню показатели эффективности использования ПУТ достигнуты в 2005 – 2006 г.г. в Украине на промышленной установке ОАО «Донецкий металлургический завод» [6-7].

Истории применения ПУТ в доменной плавке - более 200 лет, но только в последние 25 лет она получила массовое промышленное развитие. Причин этому много: это и возросшие требования к охране окружающей среды, и острейший дефицит коксующихся углей, и кажущееся простым и дешевым применение природного газа (ПГ), и другое.

Но, несомненно, и то, что одной из важнейших причин медленного развития ПУТ-технологии является отсутствие ее научных основ. Данная технология развивалась согласно принципу «проб и ошибок», поэтому и Нидерланды, и Франция, и Китай, и ДМЗ шли к современным расходам ПУТ - 170-250 кг/т - по 10-20 лет! [8-10].

Только сейчас, на базе более чем 30-летнего опыта, сформулированы основные научные принципы данной технологии, позволившие строго рассчитывать и прогнозировать оптимальные режимы с повышенным расходом ПУТ.[8-11]. Сейчас этих принципов последовательно придерживаются и в Китае, и в Нидерландах; на них же полностью опирается и технология на ОАО «ДМЗ», успехи которого в 2005-2006 г.г. не вызывают сомнений: за 9 месяцев 2006 г. средний расход кокса на весь выплавленный на ДП № 2 чугун составил 403,6 кг/т чугуна при закрытом ПГ и 167,5 кг/т ПУТ; за тот же период в доменных цехах Украины расход кокса составил 496,5 кг/т

и более 80 м³/т чугуна ПГ.[7].

Эффективность применения комбинированного дутья на ОАО «ДМЗ», по сравнению со всеми остальными печами Украины, увеличена более чем вдвое.

1. Теория и методика полной и комплексной компенсации

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., т.е. вызывает нарушение оптимального технологического режима*1.

Восстановление и стабилизация базового оптимального режима при вдувании ПУТ и является главной задачей полной и комплексной компенсации.

Для обоснования необходимости полной и комплексной компенсации выполнен анализ особенностей восстановления вюстита в зависимости от времени его взаимодействия с восстановительным газом (рис.1).

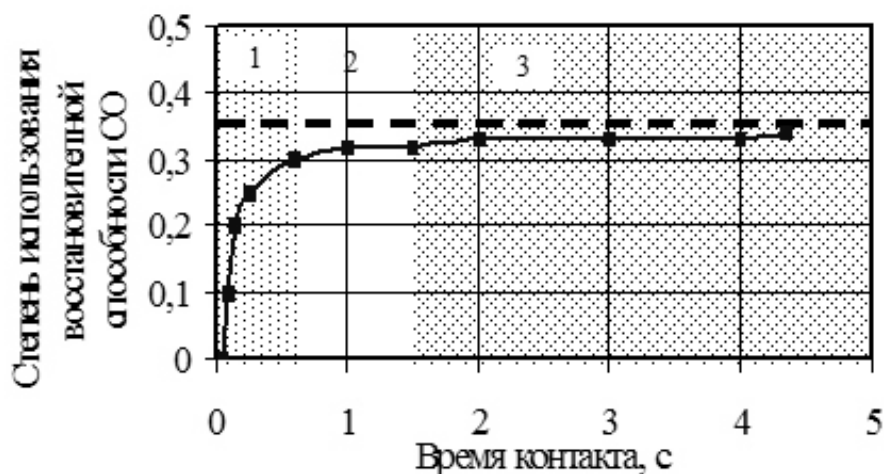


Рисунок 1 – Зависимость степени использования восстановительной способности СО от времени взаимодействия с вюститом: 1 - режим с низкой величиной τ_K , высокими расходами кокса и выхода газа-восстановителя; 2 - оптимальный режим восстановления вюстита; 3 - режим с высоким значением τ_K , низкими расходами кокса и выхода газа-восстановителя; _ _ _ _ - равновесная степень использования восстановительной способности СО в газовой фазе для реакции $FeO+CO$ при температуре 800 °С

Выполненные расчеты, анализ технической литературы показали,

1 *В работе принимали участие Афанасьева З.К., Кузин А.В., Хлапонин Н.С., Кочура В.В., Шалавин В.О. (все - ДонНТУ); Кузнецов А.М., Падалка В.П. (ОАО «ЕМЗ»).

что режим 1 (рис. 1) характеризуется величиной времени контакта восстановительных газов и вюстита менее 0,7 с, повышенными расходом кокса и выходом восстановительных газов на 1 т чугуна (800-1200 м³) [8]. Время контакта $\tau_k \sim 0,7-1,5$ с и выход восстановительных газов 750-800 м³/т чугуна отвечают оптимальному режиму, обеспечивающему минимизацию степени прямого восстановления вюстита (r_d) и затрат тепла на восстановительный процесс. В 1-м и 2-м режимах эффективное использование дополнительного топлива возможно лишь при условии сохранения на базовом уровне или повышении времени контакта и, соответственно, сохранении или снижении выхода восстановительных газов на 1 т чугуна.

Поэтому в 1-м режиме наиболее эффективно использование высокоуглеродистого ПУТ: применение ПУТ обеспечит увеличение времени контакта и, следовательно, улучшение степени использования восстановительной энергии горновых газов, снижение степени прямого восстановления вюстита и др.

Условия режима 1, в основном, соответствуют современным технологическим условиям доменных цехов Украины.

Поскольку последствия вдувания дополнительных топлив можно рассчитать, то, очевидно, что одновременно с увеличением расхода топлива необходимо применять соответствующие изменения, т.н. «компенсирующие мероприятия», которые должны нейтрализовать негативное влияние комбинированного дутья на технологический режим.

Для характеристики теплового режима горна приняли полученное из уравнения баланса тепла для нижней зоны теплообмена уравнение необходимой теоретической температуры горения (индекс «0» для исходных, индекс «1»- для новых технологических условий) [11]:

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

где t_0 и t_1 – необходимая теоретическая температура горения при которой обеспечивается сохранение базовой температуры продуктов плавки, °К; 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_n – температура в зоне замедленного теплообмена, °С.

Изменение газодинамических условий процесса, время сгорания ПУТ в фурменных зонах и ход восстановительных процессов оценивали по методикам Рамма А.Н., Китаева Б.И. и Бабия В.И. [12, 13, 14].

Для оценки эффективности компенсирующих мероприятий использовали понятие суммарного коэффициента замены (ΣK_3) кокса дополнительным топливом:

$$\sum K_3 = \frac{\Delta Q_{\text{ККМ}} + \Delta Q_{\text{КДТ}}}{Q_{\text{ДТ}}}, \quad (2)$$

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

Из расчетов, выполненных по приведенным уравнениям, анализа результатов опытных и промышленных плавов, проведенных в Украине и за рубежом, следует, что при величине ΣK_3 1,0 кг/кг и более повышение расхода ПУТ не вызывает ухудшения базовых технологических условий. Следовательно, при величине ΣK_3 1,0 кг/кг и более:

выход восстановительных газов от 1 кг ПУТ и 1 кг 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.

В соответствии с изложенным, принимаем, что при величине ΣK_3 равной или близкой 1, технологический режим обеспечен полной и комплексной компенсацией.

Расчеты технологических режимов применения ПУТ выполнялись по методике профессора А.Н.Рамма. [12]

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:

1. Рудная нагрузка, кг/т кокса.
2. Количество мелочи 5-0 мм в железорудной шихте, кг/т кокса.
3. Выход шлака, кг/т кокса.
4. Выход горнового газа, м³/т кокса.
5. Скорость газа в зоне пластического состояния шихтовых материалов, м/с.

Для характеристики данных параметров обработали среднегодовые данные по 105 доменным печам бывшего СССР и 57 доменным печам Европы за 2002 и 2004 г.г. Результаты исследований приведены на рис. 2: очевидно, что при достигнутых уровне качества кокса, железорудного сырья, параметрах температурно-дутьевого режима, в диапазоне расхода кокса от 250 до 600 кг/т чугуна маловероятна возможность достижения скорости газа в распаре выше 20 м/с, р/н - выше 6,0 т/т кокса, выхода горнового газа – выше 4,5 тыс. м³/т кокса, количества мелочи 5-0 мм в железорудной шихте – выше 400 кг/т кокса, выхода шлака – выше 1100 кг/кокса.

Указанные значения определяющих параметров рассматривались

нами как граничные, предельные, разделяющие области реально достижимых и маловероятных режимов доменной плавки с применением ПУТ.

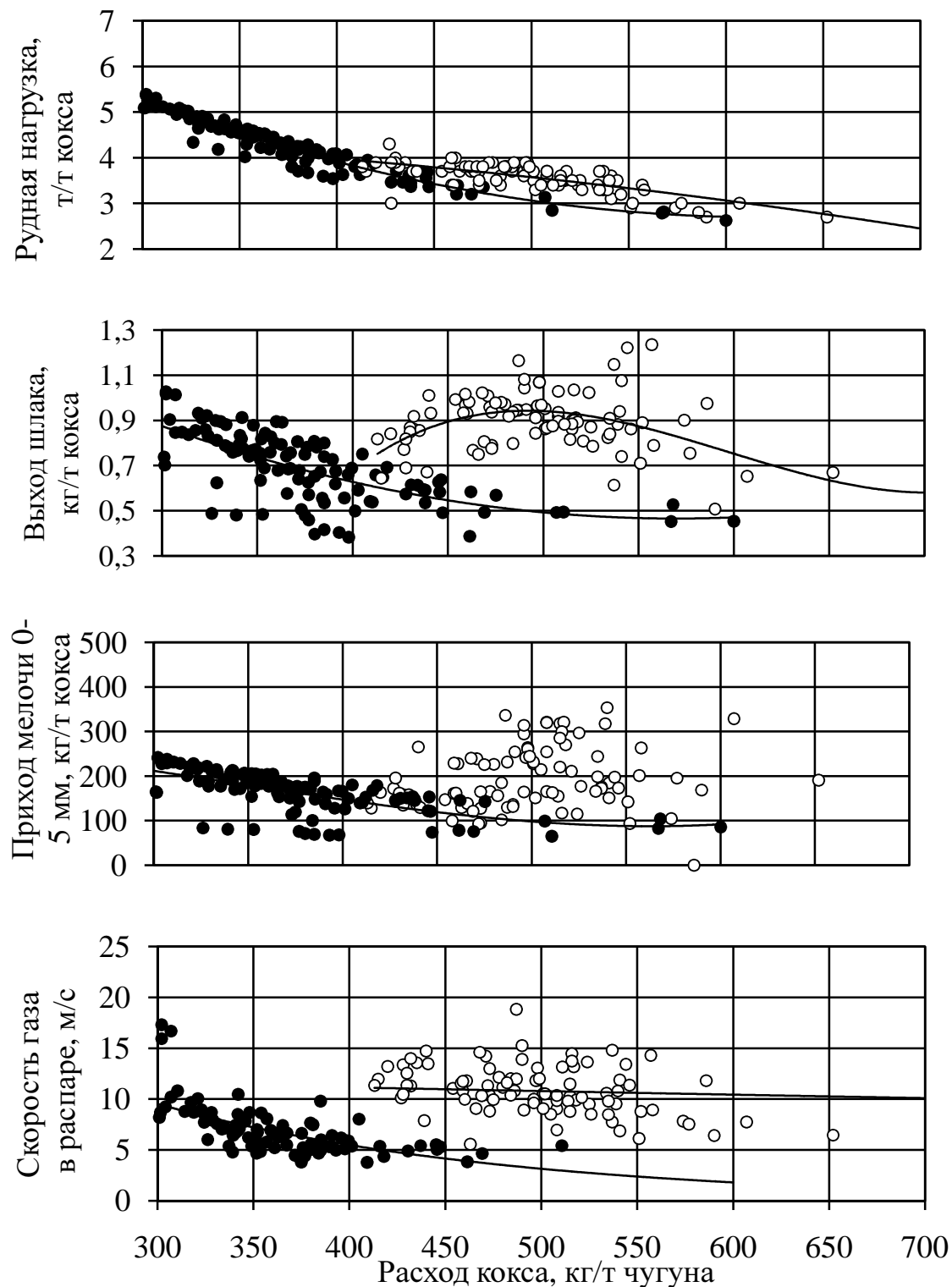
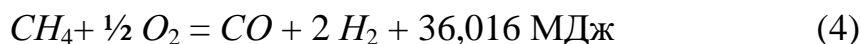


Рисунок 2 – Параметры, определяющие возможность реализации расчетных режимов: ● - Европа; ○ - СССР; ----- - предельное значение показателя

2. Компенсирующие мероприятия

Рассмотрим реакции газификации в фурменной зоне углерода и метана:



Количество тепла на единицу получаемого восстановительного газа по реакции (4) в 9 раз ниже, чем по реакции (3), а выход восстановительного газа от сжигания единицы метана в 3 раза выше, чем от сжигания углерода. Соответственно, снижение теоретической температуры горения при вдувании единицы *ПГ* - в 2,5-3,0 раза больше, чем при вдувании единицы *ПУТ*.

Расчеты, выполненные исходя из условия сохранения на базовом уровне выхода восстановительных газов на 1 т чугуна показывают, что в технологических условиях доменных цехов Украины (табл. 1) [8]:

– наиболее значительны компенсирующие ресурсы таких мероприятий: повышение температуры дутья, вывод из шихты известняка, снижение выхода шлака и содержания мелочи 5-0 мм в железорудной шихте, подготовка кокса к плавке и использование коксового орешка, частичная металлизация шихты и др.;

– ряд указанных мероприятий оказывают комплексное компенсирующее влияние на технологию: так, повышение температуры дутья, обеспечивая снижение расхода кокса, выхода восстановительных газов и повышение температуры горения, улучшает условия газодинамики, газификации дополнительных топлив, сохранения условий нагрева шихты и др.;

– наиболее эффективно обеспечение компенсации за счет благоприятного изменения нескольких факторов с тем, чтобы создать как максимальный уровень и запас компенсации, так и ее комплексность, т.е. благоприятное воздействие на все основные технологические параметры плавки. При таком варианте компенсации обеспечивается как достижение высокого уровня расхода дополнительного топлива, так и сохранение базовой эффективности его применения.

Из изложенного следует, что для технологических условий с повышенным выходом газов-восстановителей, ΣK_3 , обеспечивающий полную и комплексную компенсацию, для *ПГ* в 2-3 раза превышает данный показатель для *ПУТ*.

Следовательно, в реальных технологических условиях доменных цехов Украины вдувание качественного *ПУТ* может быть компенсирующим фактором, обеспечивающим за счет соответственного снижения расхода *ПГ* повышение суммарного расхода дополнительного топлива (*ПГ+ПУТ*) и снижение расхода кокса.

3. Эффективность использования ПУТ в технологических условиях доменных цехов Украины

С учетом указанных выше определяющих параметров были определены, как реальные, расчетные режимы для строящейся ДП № 5 ОАО "ЕМЗ" с вдуванием на 1 т чугуна 100 и 180 кг ПУТ: в качестве базового режима рассматривали показатели работы ДП № 1 в реальных технологических условиях доменного цеха в 2005 г. В качестве компенсирующих факторов приняты: повышение содержания железа в агломерате до 57 % и отсев из него мелочи 5-0 мм; повышение температуры дутья до 1200 °С, содержания кислорода в нем до 28,0 % (все это - согласно проектным данным для ДП № 5), сокращение и вывод из состава дутья ПГ. Для производства ПУТ использованы антрацит (Донбасс) и смесь антрацита (70 %) и малосернистого газового угля (30 %) из Кузбасса (Россия). [8].

Выполненным расчетом показано, что применение ПУТ в сочетании с комплексом компенсирующих мероприятий позволит в технологических условиях ОАО «ЕМЗ» снизить расход кокса до 319,3-384,2 кг/т чугуна, повысить долю замены кокса дополнительными топливами до 23,8-36,6 %, что в 1,9-2,6 раза больше, чем при вдувании в горн ПГ+O₂. Все рассмотренные и обеспеченные полной и комплексной компенсацией варианты технологии с применением ПУТ высокоэффективны: их реализация обеспечивает на протяжении 2 лет окупаемость капитальных вложений, необходимых на строительство пылеугольного комплекса и реализацию компенсационных мероприятий (табл. 2).

Аналогичные расчеты выполнены и для ОАО «ДМЗ»: дальнейшее развитие и усиление уже задействованных компенсирующих факторов: повышение доли окатышей в шихте, температуры дутья, эффективности подготовки кокса к плавке, снижение основности шлака, улучшение качества ПУТ и оптимизация технологического режима определяют возможность повышения расхода ПУТ до 200-220 кг/т чугуна и снижения расхода кокса до 340-350 кг/т чугуна; т.е. до современного технического уровня.

Из изложенного следует, что освоение первого этапа ПУТ-технологии - до 100-150 кг/т чугуна - и снижение расхода кокса до 380-400 кг/т чугуна для условий доменных печей Украины не является проблемой и не содержит новизны: для решения данной задачи достаточно, опираясь на отечественный и зарубежный опыт и производную данного опыта - теорию полной и комплексной компенсации, рассчитывать технологические режимы с вдуванием ПУТ на основе имеющихся или создаваемых в цехе компенсирующих ресурсов.

Таблица 1 – Эффективность различных компенсирующих мероприятий при вдувании дополнительных видов топлив ва в доменную печь (базовый период: д.п. 2 ЗАО «Донецксталь - металлургический завод», 20.12.02-01.01.03)

Номер показателя	Расчетные показатели	Ход расчета показан манипуляцией показателей, записанных в скобках	Компенсирующие мероприятия						
			Расход флюса, кг/т чугуна	Выход шлака, кг/т чугуна	Расход ПГ, м ³ /т чугуна	Температура дутья, °С	Процент мелочи в шихте	Расход коксового орешка, кг/т чугуна	Введение металлизированной шихты, кг/т
1	Единица показателя компенсации (в дальнейшем – ПК)	–	–10	–10	–10	+10	–1	+10	+10
2	Экономия кокса за счет данного ПК, кг/т чугуна [16, 17]	–	–1,68	–1,68	+8	–1,57	–2,83	–2,26	–2,26
3	Снижение выхода восстановительных газов на ПК, м ³ /т	[2] x 1,52 ^{*1}	–2,55	–2,55	–18	–2,38	–4,30	–3,44	–3,44
4	Повышение расхода ПУТ на ПК, кг/т чугуна	[3] : 1,41 ^{*2}	+1,81	+1,81	+12,8	+1,69	+3,05	+2,44	+2,44
5	Количество кокса, сэкономленного за счет вдувания ПУТ (Кз 0,9 кг/кг)	[4] x 0,9	–1,63	–1,63	–11,5	–1,52	–2,74	–2,30	–2,30
6	Суммарная экономия кокса за счет компенсирующего мероприятия и ПУТ	[2]+[5]	–3,31	–3,31	–3,50	–3,09	–5,57	–4,56	–4,56
7	Экономия природного газа за счет увеличения расхода ПУТ (Кз = 0,4 м ³ /кг)	[6] x 0,4	–0,72	–0,72	0	–0,68	–1,22	–0,98	–0,98
8	Суммарная экономическая эффективность ПК, грн/т	Цк x [6]+ Цпг x [7]– Цпут x [4] ^{*3}	–2,31	–2,31	–1,34	–2,17	–3,90	–3,21	–3,21

Таблица 2 – Эффективность пылеугольной технологии для доменного цеха ОАО «ЕМЗ»

Показатели	Базовый период	Численные значения показателей при применении шихты	
		1-й режим: окатыши СевГОК уголь «АС»	3-й режим: окатыши ЦГОК уголь 70 % «АС» +30 % «Г»
Производительность печи, %	0	111,3	136,9
Расход кокса, кг/т чугуна	501,7	382,4	319,3
Расход ПГ, м ³ /т чугуна	91,1	51,1	0
Расход ПУТ, кг/т чугуна	0	100	180
Расход условного топлива, кг/т чугуна	631,2	557,2	506
Снижение себестоимости чугуна, грн./т чугуна	0	75	96,8
Экономия кокса, тыс.т/год	0	365,1	558,1
Экономия ПГ, млн. м ³ /год	0	122,4	278,8
Потребность угля для производства ПУТ, тыс.т/год	0	336,6	605,9
Прирост производства, тыс.т/год	0	345,8	1129,1
Снижение себестоимости чугуна от внедрения пылеугольной технологии, млн. грн./год	0	229,5	296,2

Освоение 2^{го} этапа ПУТ-технологии и расхода ПУТ на 1т чугуна 160-250 кг, однако, потребует реализации значительно более эффективных и сложных компенсирующих мероприятий, обеспечивающих снижение выхода шлака на 1т чугуна до 300 кг, содержания мелочи 5 – 0 мм в железорудной шихте до 5 % , повышения горячей прочности кокса (CSR) до 60 % и выше и т.д.

В результате стоимость капитальных затрат на реализацию технологии значительно, возможно, вдвое и более, повысится, что однако может быть частично или полностью компенсировано дополнительной экономией кокса.

Качественно оценена эффективность массового промышленного внедрения в Украине пылеугольной технологии на основе расчетов и ре-

ального многолетнего промышленного опыта ОАО «ДМЗ» и зарубежных стран (опыт 1985-2004 гг.). Исходя из этого, принимаем в целом для чугуна, выплавленного в основных доменных цехах Украины (22 млн. т в год):

- расход ПУТ 120 кг/т чугуна (уголь марки «Т» и «А», зольностью 5-8 %);
- снижение расхода ПГ 0,4 м³/кг ПУТ;
- коэффициент замены кокса ПУТ 0,8 кг/кг;
- стоимость кокса (на начало 2006 г.) 1000 грн/т;
- стоимость ПГ 600 грн 1000 м³;
- стоимость ПУТ 500 грн/т.

Исходя из указанных цифр реализация пылеугольной технологии в масштабах отрасли черной металлургии позволит снизить потребность кокса на 2,4 млн. т, ПГ ~1,06 млрд. м³, себестоимость чугуна на ~1,4 млрд. грн.

Таким образом, окупаемость внедрения первого этапа пылеугольной технологии составит менее 2 лет. Дальнейшее неизбежное повышение цен на энергоносители, в первую очередь на ПГ, будут только повышать эффективность использования ПУТ.

Попутно решаются задачи как значительного снижения или полного исключения использования в доменном производстве ПГ, так и охраны окружающей среды: сокращение годового объема производства кокса на 2,4 млн. т обеспечит снижение выброса в окружающую среду вредных веществ на 14,8 тыс. т, в т. ч. 4,8 тыс. т сернистых соединений, 5,5 тыс. т аммиака и фенола, 1,5 тыс. т окислов азота и т.д. [15].

Эффективность использования ПУТ, приготовленного из углей марок «Г», меньшая по экономии кокса и получаемому эффекту, однако вдвигание 150-180 кг/т чугуна такого топлива обеспечит полный вывод из состава дутья ПГ, при сохранении на базовом уровне или снижении расхода кокса.

Проблема ресурсов углей для производства ПУТ может быть актуальной только на первом этапе освоения технологии. В дальнейшем же, очевидно, случится то, что уже случилось во всех странах, применяющих ПУТ в массовом количестве: сокращение производства кокса, улучшение его качества за счет повышения доли коксующихся углей в коксошихте, использование большей части высвободившейся коксошихты в качестве сырья для производства ПУТ. (рис 2).

В Украине наиболее рациональной представляется угольная шахта для производства ПУТ в составе (60-80 %) Донецких углей (марки А, Т) и 40-20 % - импортных низкосернистых углей (S - 0,2-0,4 %).

Как использование смесей углей для производства ПУТ, так и сокращение объема производства кокса соответственно расширению пылеудувания – объективная и массовая реальность в странах мира – США,

Франции, Германии и др., важнейший компонент эффективности данной технологии [1, 9, 10].

В результате выполненных исследований установлено:

Технология доменной плавки с вдуванием в горн ПГ, требующая ежегодно на ее реализацию около 2,5 млрд. м³ ПГ, в сложившихся технологических условиях менее эффективна по сравнению с вдуванием ПУТ. Определяющим показателем, характеризующим преимущества ПУТ, по сравнению с ПГ, является возможность замены ПУТ в 2-3 раза большего количества кокса

В настоящее время в Украине созданы необходимые предпосылки для быстрого и эффективного внедрения доменной технологии с использованием ПУТ.

.Реализация технологии доменной плавки с применением ПУТ в основных доменных цехах Украины (22 млн. т чугуна в год) уже на первом этапе позволит снизить расход кокса на 2,4 млн. т, природного газа на 1,06 млрд.м³, обеспечить снижение себестоимости чугуна на 1,4млрд. грн. при сохранении базовых производительности доменных печей и качества чугуна.

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. Steiler J.-M., Hanrot F. Present state and innovative issues for ironmaking // Le Revue de Metallurgie – CIT. - 2005. - P. 161-169.
3. Langner Injection of pulverised coal at Thyssen Krupp Steel // Stahl und Eisen. - 2005. - 11. - S. 91-95.
4. Lungen H.B. Actual Status and Future aspects of Ironmaking in Europe // Fachtagung Kokereitechnik im Rellinghaus der RAG, 11-12 May 2006.
5. 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.
6. Технология доменной плавки с вдуванием в горн пылеугольного топлива и природного газа на обогащенном кислородом дутье, обеспечивающая замену 30-40 % кокса / А.Н. Рыженков, Л.В. Савранский, С.Л. Ярошевский и др. // Металл и литье Украины. - 2005. - № 1-2.- С. 3-10.
7. Захарченко В.Н. Состояние и перспективы доменного производства Украины //Труды международной научно-технической конференции "Пылеугольное топливо - альтернатива природному газу при выплавке

- чугуна", г. Донецк, 18-21 декабря 2006 г. - Донецк: Унитех, 2006. – С. 27-35.
8. Ярошевский С.Л., Кузнецов А.М., Афанасьева З.К. Резервы эффективности комбинированного дутья в доменных цехах Украины.- Донецк: Норд компьютер, 2006.- С.9 - 14.
 9. Использование вдувания пылеугольного топлива для оптимизации работы доменной печи / Б.Параманатан, Д.Плоой, М.Геердес и др. // Сталь, 2005.-№ 10.- С.38 - 44.
 10. Renkiang Z., Kezhong G/ Charakteristik of 200 kg/t HM PSI and low coke rate of BF in Baosteel // 59-th Ironmaking conference, March 26-29, Pittsburg, PA Proceeding.-P. 321-326.
 11. Ярошевский С.Л. Выплавка чугуна с применением пылеугольного топлива.- М.: Metallurgia, 1988.- 176 с.
 12. Рамм А.Н. Современный доменный процесс. – М.: Metallurgia, 1980. – 304 с.
 13. Китаев Б.И. Теплообмен в доменной печи. – М.: Metallurgia, 1966.
 14. Бабий В.И., Иванова И.В. Длительность воспламенения и горения частиц пыли различных марок углей // Материалы III Всесоюзной конференции по теории горения твердого топлива "Горение твердого топлива". – Новосибирск: Наука, 1969.
 15. Экологическая и экономическая эффективность замены части кокса пылеугольным топливом в доменной плавке / С.Л. Ярошевский, А.А. Минаев, А.И. Ковалев и др. // I Международная научно-практическая конференция «Экологические проблемы промышленных мегаполисов». – Том 2. - Донецк-Авдеевка, 01-04 июня 2004 года. – Донецк: ДонНТУ, 2004. – С. 115-119.

© Ярошевский С.Л. 2007