

И. Г. Товаровский, В. П. Лялюк*, А. Е. Меркулов

Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины, Днепропетровск

*Металлургический институт Криворожского национального университета, Кривой Рог

Альтернативные технологии замещения кокса и природного газа в доменной плавке

Показано, что расширение арсенала технологий замещения кокса различными энергоносителями совершенно необходимо в условиях рыночной конъюнктуры для оперативного выбора наиболее эффективных вариантов технологии в ходе динамичного изменения цен. На основе разработанной в ИЧМ НАН Украины математической модели выполнен анализ коксосберегающих режимов доменной плавки, который показал возможность поэтапной реализации альтернативных режимов: загрузка в печь кускового угля с улучшением свойств сырья – использование пылеугольного топлива – вдувание продуктов газификации углей. Такая схема обеспечит сокращение расхода кокса до уровня 200 кг/т чугуна.

Ключевые слова: доменная плавка, продукты газификации угля, пылеугольное топливо, кокс

Широкое развитие на предприятиях Украины технологии доменной плавки с замещением части кокса и природного газа (ПГ) менее дефицитными энергоносителями потребовало более глубокого и широкого анализа всех аспектов проблемы.

Ранее на основе обсуждения проблемы специалистами убедительно показано, что реализация ожидаемых результатов технологии с вдуванием пылеугольного топлива (ПУТ) требует, прежде всего, решения комплекса технических проблем коренного улучшения металлургических свойств кокса и железорудного сырья [1-8]. Сюда следует добавить решение проблем управления процессами при низком расходе кокса, особенно «сверху» параметрами загрузки [9]. Пути решения этих проблем известны [1, 2, 6-9], а трудности реализации в ограниченных масштабах преодолимы. Однако при решении проблем в масштабах отрасли возникают серьезные ограничения, обусловленные, в частности, дефицитом коксующихся углей и углей для приготовления ПУТ [4, 7].

Указанные ограничения, которые не ощущались в начальный период расширения вдувания ПУТ в Европе и Азии, теперь характерны не только для Украины и России, но вскоре (по мере исчерпания ресурсов) окажут конъюнктурное влияние на развитие всей мировой металлургии.

Учитывая изложенное, следует сочетать развитие ПУТ с разработкой и развитием альтернативных коксозамещающих технологий. В связи с этим следует отметить, что декларируемая в работе [1, 2] «безальтернативная перспектива» вдувания ПУТ в условиях возрастающего дефицита углей коксующихся и для приготовления ПУТ, а также качественного железорудного сырья может перерасти в тупиковую перспективу для отдельных предприятий.

Этот стратегический шаг в развитии доменного производства Украины и России требует глубокого и широкого осмысления, тем более, что изложенные в [1, 2] аргументы против альтернативных технологий оказались неубедительными [10]. Показано [10], что сводить технический прогресс в доменном производстве к расширению только использования технологии

вдувания ПУТ в современном динамичном мире рыночной экономики при дефиците всех ресурсов означает обречь многие предприятия на беззащитность перед неожиданными поворотами конъюнктуры рынка. Расширение технологии вдувания ПУТ в отрасли при сопутствующем развитии работ по улучшению металлургических свойств сырья и кокса как основы технического прогресса должно сопровождаться разработкой дополняющих и альтернативных технологий. Эта идеология становится приемлемой для большого количества специалистов, в том числе бывших её оппонентов [8].

Одной из альтернатив вдувания только ПУТ является технология мобильного сочетания ПУТ и коксового газа (КГ) или другого восстановительного газа, которая позволяет при недостатке углей требуемого сортамента для приготовления ПУТ (например по зольности), вдувать на отдельных доменных печах ПУТ не 200-250, а 100-150 кг/т. В этом случае для поддержания на оптимальном уровне температуры у фурм и соответственно температурного поля печи потребуется вдувать 100-150 м³/т КГ или эквивалентное количество другого восстановительного газа, например, продуктов газификации угля (ПГУ) широкого назначения [11] с получением расхода кокса, соответствующего вдуванию ПУТ 200 кг/т. При невозможности получения требуемых металлургических свойств кокса (по любым причинам) целесообразно сократить расход ПУТ вплоть до нуля, а расход КГ увеличить до 200-250 м³/т, что позволит получить доступную величину экономии кокса с сохранением стабильности процессов.

К необходимости использования КГ приходят и японские специалисты, разрабатывающие способ выплавки чугуна с вдуванием в доменную печь КГ, подвергнутого конверсии и имеющего высокое содержание водорода [12].

В различных сочетаниях с ПУТ, в том числе и при полном отключении ПУТ, по разным причинам можно использовать технологию загрузки подготовленного кускового антрацита. Наиболее показательные результаты этой технологии получены в ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» в периоды, когда комбинат не испытывал

дефицита в антраците и получал качественный обогащенный продукт. Так, в октябре 2006 г. расход кокса на доменной печи объемом 5000 м³ составлял 426,8 кг/т при расходе антрацита 56 кг/т и природного газа 87,1 м³/т, а на доменной печи № 6 объемом 2000 м³ в августе 2006 г. расход кокса был 436,1 кг/т при расходе антрацита 74 кг/т и природного газа 69,9 м³/т [13, 14].

Опыт работы доменной печи № 5 объемом 1719 м³ Алчевского МК на двух технологиях, разделенных непродолжительным отрезком времени, с загрузкой кускового антрацита через колошник и вдуванием в фурмы ПУТ с 2006 по ноябрь 2010 г. показал следующее: при работе с загрузкой антрацита достигнутый минимальный расход кокса составил 444 кг/т при расходе антрацита 44 кг/т (в среднем за 2006 г.) и природного газа 89 м³/т [14], а при вдувании ПУТ в марте 2009 г. достиг 477 кг/т при расходе ПУТ 64 кг/т чугуна и природного газа 51,8 м³/т; в 2012 г. в результате кардинального улучшения характеристик кокса и сырья расход кокса на доменной печи № 5 в 2012 г. сократился до 400-445 кг/т при расходе ПУТ 107-155 кг/т чугуна [15]. Корректировка параметров работы ДП-5 с загрузкой антрацита в 2006 г. по изменившимся в 2012 г. характеристикам кокса и сырья показала возможность сокращения расхода кокса до 397 кг/т при расходе антрацита 70 кг/т и уменьшении потребления природного газа с 89 до 40 м³/т и кислорода вплоть до перехода на атмосферное дутьё.

Таким образом, каждому варианту технологии с вдуванием ПУТ соответствует вариант альтернативной технологии, обеспечивающий не больший расход кокса, чем в исходном случае. Окончательный выбор варианта определяется характером используемых критериев и ограничений.

Преимущества технологии вдувания ПУТ по сравнению с технологией загрузки кускового антрацита могут быть реализованы при дальнейшем совершенствовании режима плавки с увеличением расхода ПУТ до 200-250 кг/т чугуна и сокращением расхода кокса до 300-350 кг/т чугуна.

В связи с возрастающим дефицитом малозольных углей для приготовления ПУТ фундаментальное решение проблемы сокращения расхода кокса до 180-200 кг/т чугуна с использованием для его замещения низкосортных углей может быть получено на основе разработки новой технологии доменной плавки с вдуванием горячих восстановительных газов – продуктов газификации углей (ГВГ–ПГУ), получаемых в специальных газификаторах – прифурменных (на ДП) и придоменных (в отдельных агрегатах).

Сущность технологии с вдуванием ПГУ заключается в следующем. Каждый фурменный прибор ДП на участке «коллено-сопло» оборудуется прифурменным газификатором (ПФГ) – устройством для газификации ПУТ. Сверху от коллектора горячего дутья через опуск к ПФГ подается горячее дутье, в поток которого вдувается ПУТ. Генерируемые в устройстве ГВГ–ПГУ выводятся из ПФГ в области воздушной фурмы

ДП и поступают в фурменный очаг. Часть окислительного дутья, поступающего непосредственно в ДП для сжигания кокса, подается отдельным трактом, который может быть выполнен в двух вариантах: автономный отвод горячего дутья из опуска коллектора с подводом его к воздушной фурме для ввода в ДП; замена части горячего дутья эквивалентным количеством неподогретого (холодного) кислорода – ХК, подаваемого трубкой через тело фурмы в фурменный очаг (по основному каналу фурмы поступают ПГУ).

Высокая полнота газификации ПУТ в ПФГ при полном ожигании зольной части с выносом её в ДП обеспечивает эффективный режим сжигания кокса в фурменных очагах и позволяет, в отличие от обычного вдувания ПУТ, использовать для вдувания в ДП большое количество высокзолых углей.

Для анализа особенностей новой технологии и ожидаемых результатов выполнены расчеты на модели, разработанной в Институте черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины [11, 16, 17]. В качестве базового периода приняты параметры работы ДП-9 ПАО «АМКР» в лучшем по показателям периоде – октябре 2006 г. Вариант ПУТ предполагает вдувание 250 кг/т чугуна малозольного угля (до 10 % золы, 13 % летучих, табл. 1) при полном выводе природного газа, а вариант ПГУ – вдувание ГВГ–ПГУ из высокзолых углей (25 % золы и летучих, табл. 1) в количестве 400 кг угля на 1 т чугуна, предполагающем замещение такого же количества кокса, как в варианте ПУТ.

Остальные варианты предполагают минимизацию расхода кокса $K_{\text{мин}}$ за счет увеличения температуры дутья до 1300 °С и перевода дополнительного известняка из доменной шихты в агломерационную, а также последующего увеличения содержания железа в шихте и выбора рационального распределения рудной нагрузки (РН) в поперечном сечении ДП.

Распределение рудных нагрузок по радиальным кольцевым сечениям (РКЗ) печи рассчитывается по заданному в базовом варианте распределению каждого компонента шихты между РКЗ, а при поиске наилучшего – задаются. Результаты определения распределений относительных рудных нагрузок представлены в табл. 2.

Особенностью распределения рудных нагрузок в базовом периоде (табл. 2) является наличие в промежуточной зоне отдельных РКЗ со сверхвысокой рудной нагрузкой, что характерно для конусной загрузки. Однако расположение указанных РКЗ вблизи оси (РКЗ–2, 3) существенно изменяет в положительном направлении их функциональную роль и влияние на эффективность плавки. Требуется дополнительное изучение этой особенности.

Таблица 1

Составы углей, принятые для расчета показателей и параметров ДП при вдувании ПУТ и ПГУ

Угли для вдувания	Зола	Летучие	S	H	N	O	H ₂ O	C _{лет}	C _Σ	C _{нел}
	%		кг/кг							
ПУТ	10	13	1,2	0,04	0,015	0,025	0,01	0,05	0,798	0,748
ПГУ	25	25	1,2	0,05	0,025	0,075	0,01	0,1	0,578	0,478

Таблица 2 В табл. 3 приводятся основные расчетные показатели плавки в различных вариантах технологии, а на рисунке показано температурно-концентрационное поле в объеме ДП в эти периоды. При вдувании ПУТ (250 кг/т чугуна) сокращение расхода кокса составило 176 кг/т, а с учетом

Распределение относительных рудных нагрузок

РКЗ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ФРН	0,414	1,541	1,475	1,125	1,008	0,995	1,049	0,995	0,961	0,926
РРН	0,42	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12

Примечание: ФРН – фактические, РРН – равномерные в промежуточных РКЗ

Таблица 3

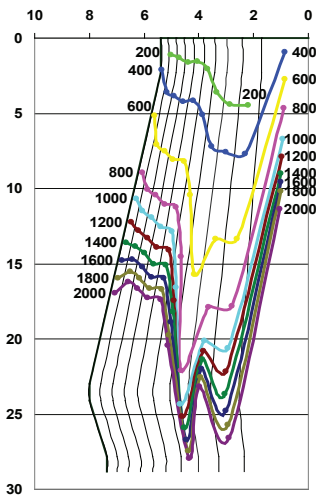
Ожидаемые показатели доменной плавки на ДП 5000 м³ ПАО «АМКР» при вдувании ПУТ, ПГУ и неподогретого кислорода (ХК), а также минимизации расхода кокса (K_{мин}) за счет увеличения температуры дутья, перевода сырого известняка в аглошихту, увеличения содержания железа в шихте (Fe) и выбора распределения рудных нагрузок на колошнике (РРН)

Показатели	База	ПУТ ₂₅₀	ПГУ ₄₀₀	K _{мин} ФРН	K _{мин} РРН+Fe	K _{мин} РРН. Fe. ХК
Производительность, т/сут	9604	9170	7910	9012	10078	8926
Расход кокса, кг/т чугуна	483	308	342	250	199	250
Дутье: расход, м ³ /мин	6674	6389	3060	2172	1488	858
температура, °С	1090	1090	1090	1300	1300	100
содержание кислорода, %	30,5	30,5	30,5	30,5	30,5	90
Расход природного газа, м ³ /т	87	0	0	0	0	0
Расход вдуваемого угля, кг/т	0	250	400	400	400	400
Колошниковый газ: температура, °С	81	308	289	185	62	259
содержание, %: СО	29,1	27,9	29,3	28,3	26,8	25,9
СО ₂	19,8	22,4	19,0	19,9	21,9	20,9
Н ₂	7,7	5,0	8,3	9,2	9,6	8,5
Известняк/конвертируемый шлак, кг/т	35/56	47/56	132/55	0/57	0/54	0/54
Агломерат + окатыши + руда, кг/т	1629	1627	1610	1677	1566	1567
Железо в шихте, %	55,2	55,0	53,5	53,7	57,4	57,4
Рудная нагрузка, т/т	3,7	5,8	5,4	7,2	8,4	6,7
В шлаке*, %: кремнезем	37,0	35,9	36,0	35,5	34,3	34,2
глинозем	8,7	8,6	9,7	9,5	10,6	10,5
известь	45,0	43,7	43,7	43,2	41,7	41,6
магнезия	4,7	4,5	4,0	4,0	3,9	3,9
Количество шлака, кг/т	416	445	550	545	429	429
Объем влажного газа, м ³ /т	1715	1649	2027	1720	1538	1774
Расход кислорода (расчет), м ³ /т	141	142	79	49	30	139
Теоретическая температура горения, °С	2219	2328	2056	2054	1947	1970
Количество фурменного газа, м ³ /т	1502	1459	1844	1566	1388	1658
Количество сухого колошникового газа, м ³ /т	1607	1568	1905	1598	1411	1646
Прямое восстановление оксида Fe, %	35,9	33,1	22,0	28,3	29,0	19,1
Использование СО + Н ₂ , %	40,5	44,4	39,1	41,3	44,9	44,7
Кусковой углерод, кг/т: общий/в районе фурм	411/284	262/140	291/185	213/115	170/71	213/134
Приход теплоты, кДж/кг	4425	4917	5314	4617	3927	4615
в том числе: горение кокса	2790	1374	1815	1131	693	1317
теплота дутья и добавок	1508	3423	3373	3368	3125	3191
Потребность теплоты, кДж/кг	3899	3846	3777	3591	3346	3160
Энтальпия колошникового газа, кДж/кг	225	824	1164	639	194	1021
Потери теплоты, кДж/кг	302	247	373	388	387	434
Доля полезной теплоты, %	88	78	71	78	85	68
Отношение водяных чисел	0,856	0,819	0,80	0,831	0,848	0,86
Теплотворность колошникового газа, кДж/м ³	4513	4076	4610	4574	4439	4187
Интенсивность: по газу, м ³ /(м ³ ·мин)	2,27	2,09	2,21	2,14	2,14	2,18
по коксу/ЖРШ, кг/(м ³ ·сут)	902/3217	549/3069	525/2620	438/3107	390/3245	435/2876
ПГУ**: количество, м ³ /т чугуна.	0	0	1106	1106	1106	1393
температура, °С	–	–	1590	1693	1693	1572
содержание СО+Н ₂ , %	–	–	60,3	60,3	60,3	48,1

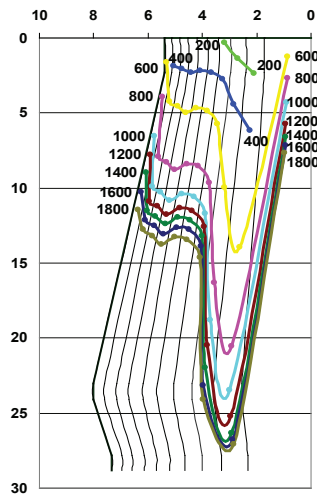
*при содержании в чугуне во всех вариантах, %: Si – 0,84; Mn – 0,32; S – 0,019 и основности шлака – 1,22;

**при заданном отношении О/С = 0,5 моль/моль

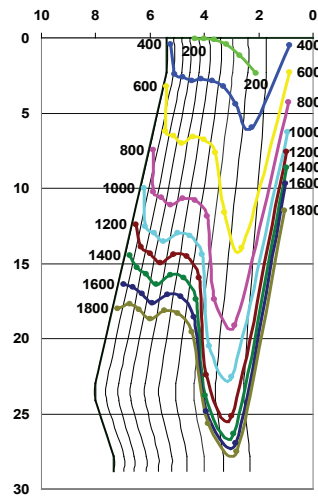
База

Температура газов: T , °C

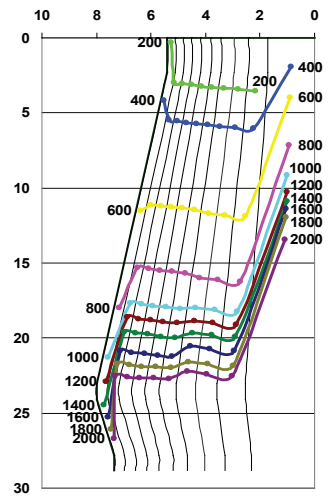
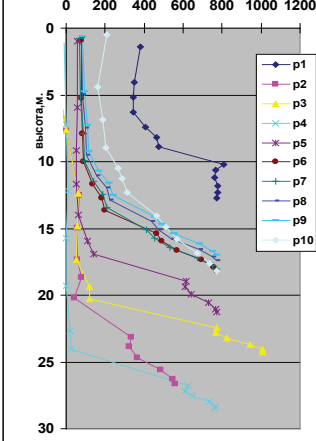
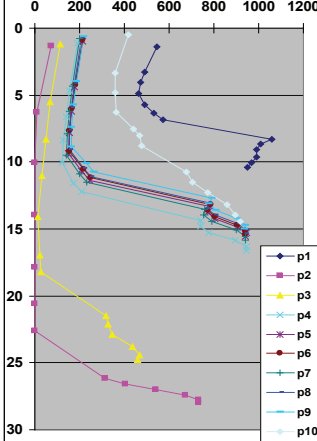
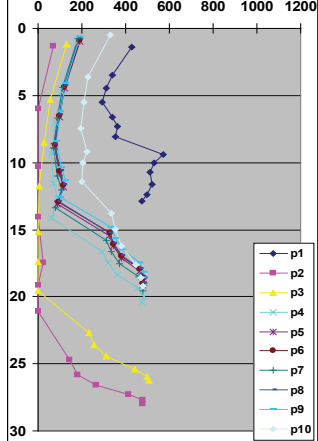
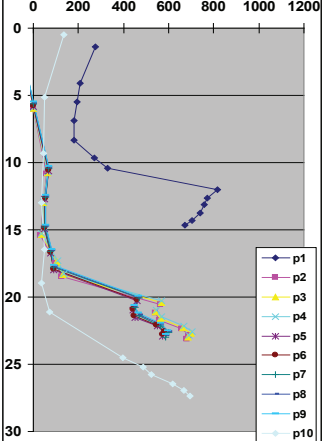
ПУТ250

Температура газов: T , °C

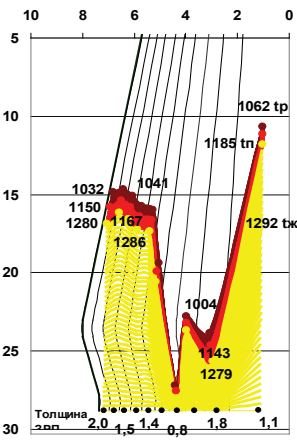
ПГУ400

Температура газов: T , °C

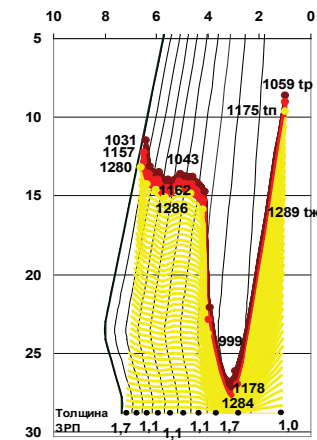
КминРРН+Fe

Температура газов: T , °CЗначения $T-t$ по радиальным зонамЗначения $T-t$ по радиальным зонамЗначения $T-t$ по радиальным зонамЗначения $T-t$ по радиальным зонам

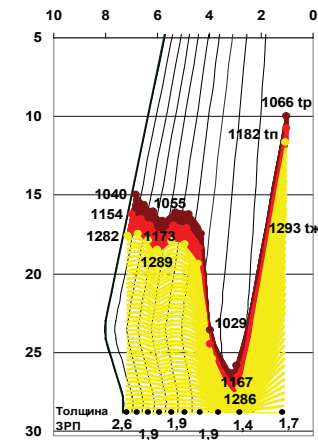
Температура фазовых превращений



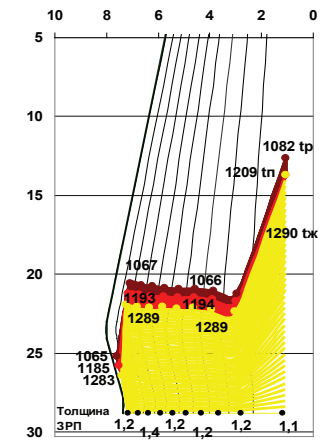
Температура фазовых превращений



Температура фазовых превращений



Температура фазовых превращений



Изолинии температуры газа (T), разности температур газа и шихты ($T-t$), а также параметры зоны размягчения и плавления (ЗРП) в рабочем пространстве ДП в базовом периоде при вдувании ПУТ, ПГУ и $K_{\text{мин}} \text{ РРН+Fe}$; по горизонтали – расстояние от оси ДП, по вертикали – расстояние от «технологического нуля», м; t_p – температура начала размягчения, t_n – плавления, $t_{ж}$ – жидкофазного течения

вывода природного газа ($87 \text{ м}^3/\text{т}$) – $250 \text{ кг}/\text{т}$, что соответствует эквиваленту замещения кокса $\text{ЭЗ}_k = 1,0 \text{ кг кокса}/\text{кг угля}$. При вдувании ПГУ (расход угля $400 \text{ кг}/\text{т}$) сокращение расхода кокса соответствует $\text{ЭЗ}_k = 0,54 \text{ кг кокса}/\text{кг угля}$. Соответствующие эквиваленты замещения по углероду кокса и углей (см. табл. 1): при вдувании ПУТ – $\text{ЭЗ}_c = 1,07 \text{ кг } C_{\text{кокса}}/\text{кг } C_{\text{угля}}$; при вдувании ПГУ: $\text{ЭЗ}_c = 0,794 \text{ кг } C_{\text{кокса}}/\text{кг } C_{\text{угля}}$.

Замещение углерода с величиной $\text{ЭЗ}_c > 1,0 \text{ кг } C_{\text{кокса}}/\text{кг } C_{\text{угля}}$ в случае ПУТ полностью объясняется сокращением степени прямого восстановления, которое в «чистом» виде составляет $0,03\text{--}0,04 \text{ \%}$ / кг ПУТ и существенно увеличивает эквивалент замещения [11]. Для случая ПГУ указанная величина была $0,05 \text{ \%}$ / кг угля, что соответствует увеличению ЭЗ_k на $0,2 \text{ кг}/\text{кг}$. За счет этого замещение углерода могло быть $\text{ЭЗ}_c = 1,2$ против фактического $0,794 \text{ кг } C_{\text{кокса}}/\text{кг } C_{\text{угля}}$. Разница $\text{ЭЗ}_c = 0,4 \text{ кг}/\text{кг}$ обеспечивает процесс превращения дополнительного шлака и флюса, образованных за счет превышения зольности кокса зольностью замещающего угля, и количественно соответствует известным балансовым соотношениям [11, 17].

Величина удельного расхода кокса при вдувании ПУТ ($250 \text{ кг}/\text{т}$) снижается до $308 \text{ кг}/\text{т}$ чугуна, а при вдувании ПГУ ($400 \text{ кг угля}/\text{т}$ чугуна) – $342 \text{ кг}/\text{т}$. Дальнейшее совершенствование технологии с вдуванием ПГУ позволит достичь минимально-возможного уровня расхода кокса $200 \text{ кг}/\text{т}$ чугуна, что подтверждается результатами расчета ряда вариантов (табл. 2 и рисунок): $K_{\text{мин}} \text{ ФРН}$ – увеличение температуры дутья до $1300 \text{ }^\circ\text{C}$ и перевод сырого флюса из доменной шихты в агломерационную при фактическом распределении рудных нагрузок на колошнике (ФРН); $K_{\text{мин}} \text{ РРН+Fe}$ – то же при равномерном распределении рудных нагрузок в промежуточных радиальных зонах и периферийной «отдушине» (РРН), а также увеличении содержания железа в шихте; $K_{\text{мин}} \text{ РРН.Fe.XK}$ – то же при замене горячего дутья неподогретым (холодным) кислородом.

Уже первый из рассмотренных вариантов дает низкий расход кокса ($250 \text{ кг}/\text{т}$) при умеренной производительности ($9012 \text{ т}/\text{сут}$), что во многом обусловлено хорошим распределением материалов на колошнике в базовом периоде. Для варианта $K_{\text{мин}} \text{ РРН+Fe}$ соответственно получены наилучшие результаты – расход кокса $199 \text{ кг}/\text{т}$ чугуна и производительность $10078 \text{ т}/\text{сутки}$. Приемлемым при определенных условиях является также вариант $K_{\text{мин}} \text{ РРН.Fe.XK}$ ($250 \text{ кг}/\text{т}$).

Таким образом, подача в ДП до $400 \text{ кг}/\text{т}$ чугуна высокозольного угля (25 \% золы) в виде ПГУ позволит заменить количество кокса, близкое к $250 \text{ кг}/\text{т}$ чугуна ПУТ (достигнуто в мировой практике) из малозольных углей (до 10 \% золы). При дальнейшем совершенствовании параметров новой технологии и оптимизации распределения материалов на колошнике возможно сокращение расхода кокса до минимально допустимого уровня $180\text{--}200 \text{ кг}/\text{т}$ чугуна [11, 16, 17].

Изменение температурно-концентрационных полей печного пространства при варьировании параметров новой технологии характеризуется следующими особенностями (рисунок): при вдувании ПУТ и ПГУ (по сравнению с базовым периодом) изотеры газа, а также границы зон теплообмена смещаются вверх, а значе-

ния разности температур газа и шихты увеличиваются. Вверх перемещаются и элементы ЗРП с некоторым уменьшением их толщины. Характерно, что величины указанных изменений в случае ПУТ – значительны, а в случае ПГУ – малозначительные.

При формировании варианта с минимизацией расхода кокса величину РН варьировали у периферии при заданной РН у оси и равномерном распределении в остальных радиальных зонах. В лучшем из рассмотренных вариантов $K_{\text{мин}} \text{ РРН+Fe}$ ($199 \text{ кг}/\text{т}$ чугуна, 10 тыс. т чугуна в сутки) достигнуто равномерное распределение температур в РКЗ-2–9 при смещении изотерм этих РКЗ, а также границ зон теплообмена (точек перегиба кривых разности температур газа и шихты) в область, ниже соответствующих величин базового периода, а также перемещения периферийной изотермы в низ заплечиков. В соответствии с изменением температурного поля произошла деформация ЗРП, элементы которой в РКЗ-2–9 сдвинулись в низ шахты, а в РКЗ-10 (периферия) – в середину заплечиков. Полученное в этом варианте температурно-концентрационное поле печного пространства более благоприятно для хода процессов, чем в других периодах.

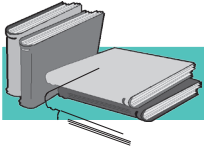
Выводы

Расширение технологии вдувания ПУТ в отрасли при сопутствующем развитии работ по улучшению металлургических свойств сырья и кокса как основы технического прогресса должно сопровождаться разработкой дополняющих и альтернативных технологий. Одной из альтернатив вдуванию только ПУТ является технология мобильного сочетания ПУТ, КГ и кускового антрацита, которая позволяет при недостатке углей требуемого сортамента сокращать расход ПУТ вплоть до нуля при увеличении расхода КГ до $200\text{--}250 \text{ м}^3/\text{т}$ и антрацита до $70\text{--}90 \text{ кг}/\text{т}$, обеспечивающем получение доступной экономии кокса. Расширение арсенала технологий замещения кокса различными энергоносителями совершенно необходимо в условиях рыночной конъюнктуры для оперативного выбора наиболее эффективных вариантов технологии в ходе динамичного изменения цен.

Реализацию альтернативных режимов целесообразно осуществлять поэтапно.

В ДП-9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» перво-степенным является коренное улучшение металлургических характеристик кокса и сырья, которое уже в ближайшее время позволит достичь расхода кокса $380\text{--}400 \text{ кг}/\text{т}$, а при сочетании с разработанной и освоенной технологией загрузки в ДП кускового антрацита – $300\text{--}320 \text{ кг}/\text{т}$ без значительных капитальных затрат.

На этой основе в последующий период возможна реализация технологии замещения более 50 \% кокса углем при полном исключении природного газа. Поскольку обеспечение этой технологии низкзольными углями в сложившихся и в перспективных условиях проблематично, необходимо актуализировать разработку, испытание и реализацию новой технологии доменной плавки с вдуванием продуктов газификации зольных углей, которая обеспечит сокращение расхода кокса до минимально возможного уровня – $180\text{--}200 \text{ кг}/\text{т}$ чугуна.



ЛИТЕРАТУРА

1. Внедрение пылеугольной технологии – безальтернативная перспектива доменного производства Украины / С. Л. Ярошевский, В. Е. Попов, А. М. Кузнецов и др. // II Международная конференция доменщиков по проблемам продления компании доменной печи и освоения технологии вдувания ПУТ. Современные решения и практический опыт: тез. докл. (Днепропетровск), 18-22 мая 2009 г. – Днепропетровск: Объединение производителей чугуна. – 2009. – С. 90-97.
2. Пылеугольное топливо – безальтернативная перспектива доменного производства в Украине / А. Н. Рыженков, А. А. Минаев, С. Л. Ярошевский и др. // Сталь. – 2010. – № 10. – С. 7-14.
3. *Харахулах В. С., Старовойт А. Г., Изюмский Н. Н.* Проблемы доменного производства Украины и пути их решения при вводе технологии вдувания ПУТ // Международный конгресс доменщиков по доменному производству XXI века: тез. докл. (Москва), 12-16 апреля 2010 г. – М.: – Изд-во Кодекс, 2010. – С. 92-99.
4. *Золотухин Ю. А., Андрейчиков Н. С.* Требования к качеству кокса для доменных печей с высоким расходом пылеугольного топлива // Сталь. – 2009. – № 6. – С. 3-7.
5. *Курунов И. Ф.* Состояние и развитие доменного производства Китая, Японии, Северной Америки, Западной Европы и России // Бюллетень Черная металлургия ОАО “Черметинформация”. – 2010. – № 3. – С. 32-49.
6. Перспективы применения пылеугольного топлива в доменных печах Украины и России / А. А. Минаев, А. Н. Рыженков, Ю. Г. Банников и др. // Сталь. – 2008. – № 2. – С. 5-11.
7. *Старовойт А. Г.* Современная сырьевая база для коксования, её структура и требования к качеству кокса // Новини науки Придніпров'я. – 2010. – № 5. – С. 22-25.
8. Перспективы и эффективность технологии выплавки чугуна в доменных печах / С. Л. Ярошевский, З. К. Афанасьева, А. В. Кузин, И. В. Мишин // Там же. – 2010. – № 5. – С. 25-31.
9. *Большаков В. И.* Технология высокоэффективной энергосберегающей металлургической доменной плавки. – Киев: Наукова думка, 2007. – 411 с.
10. *Товаровский И. Г., Большаков В. И., Лялюк В. П.* Альтернативные коксоберегающие технологии – перспектива развития доменного производства. // Металлургическая и горноруд. пром-сть. – 2011. – № 2. – С. 10-13.
11. *Товаровский И. Г.* Доменная плавка. – Днепропетровск: Пороги, 2009. – 768 с.
12. Development of high-performance coking additive in high strength coke making / T. Shishido, T. Okayama, M. Hamaguchi et al. // Zairyo to Prosesu =CAMP ISIJ. – 2009. – V, 22. – № 2. – С. 777.
13. Антрацит и термоантрацит в шихте доменной плавки // В. П. Лялюк, И. Г. Товаровский, Д. А. Демчук и др. – Днепропетровск: Пороги, 2008. – 245 с.
14. Доменная плавка с заменой части кокса кусковым антрацитом / И. Г. Товаровский, В. П. Лялюк, Т. Г. Шевченко, В. С. Листопадов и др. // XV международная конференция по теплотехнике и энергетике в металлургии: тез. докл. 7-9 октября 2008 г., НМетАУ, Днепропетровск. – С. 240-241.
15. *Захарченко В. Н.* основные показатели работы доменного производства Украины в 2012 году // VI Международный Конгресс по агло-кокс-доменному производствам: Проблемы доменного и смежных производств в современных условиях. Технологии использования разных видов топлива и сырья: тез. докл. 20-24 мая, 2013., Ялта, – С. 13-25.
16. *Товаровский И. Г., Большаков В. И., Меркулов А. Е.* Аналитическое исследование процессов доменной плавки. – Днепропетровск: Экономика, 2011. – 206 с.
17. *Товаровский И. Г.* Процессы доменной плавки. – Т. 1. Анализ состояния. – 595 с. – Т. 2. – Проблемы и перспективы. – 406 с. // Издательский дом LAP LAMBERT Academic Publishing. – 2012.

Анотація

Товаровський І. Г., Лялюк В. П., Меркулов О. Є.

Альтернативні технології заміщення коксу і природного газу в доменній плавці

Показано, що розширення арсеналу технологій заміщення коксу різними енергоносіями абсолютно необхідно в умовах ринкової кон'юнктури для оперативного вибору найбільш ефективних варіантів технології в ході динамічного зміни цін. На основі розробленої в ІЧМ НАН України математичної моделі виконано аналіз коксоберегаючих режимів доменної плавки, який показав можливість поетапної реалізації альтернативних режимів: завантаження в піч кускового вугілля з поліпшенням властивостей сировини – використання пиловугільного палива – вдування продуктів газифікації вугілля. Така схема забезпечить зменшення витрати коксу до рівня 200 кг/т чавуну.

Ключові слова

доменна плавка, продукти газифікації вугілля, пиловугільне паливо, кокс

Summary

Tovarovsky I. G., Lyalyuk V. P., Merkulov A. E.

Alternative technologies replacement coke and natural gas in blast furnace

Expand the arsenal of technology substitution of coke by different energy sources is necessary in a market environment for the rapid selection of the most effective technology options in the dynamic price changes. The developed in the Iron and Steel Institute NAS mathematical model of the analysis modes saving coke blast furnace, which showed the possibility of a phased implementation of alternative modes: charge of lump coal into the furnace with improved properties of the raw material – the use of pulverized coal injection – the injection of coal gasification products. This arrangement provides reduction in consumption of coke to a level of 200 kg / t pig iron.

Keywords

blast-furnace smelting, the products of gasification of coal, pulverized coal, coke

Поступила 01.11.13

Оформление рукописи для опубликования в журнале "Металл и литьё Украины":

Материалы для публикации необходимо подавать в формате, поддерживаемом Microsoft Word, размер бумаги А4, книжная ориентация, шрифт Arial – размер 10, междустрочный интервал – 1,5. Объем статьи – не более 10 стр., рисунков – не более 5.

Рукопись должна содержать:

- УДК;
- фамилии и инициалы всех авторов (на русском, украинском и английском языках);
- название статьи (на русском, украинском и английском языках);
- название учреждения(й), в котором(ых) работает(ют) автор(ы);
- аннотации на русском, украинском и английском языках;
- ключевые слова (не менее шести) – на русском, украинском и английском языках;
- предлагаемая структура текста (Arial 10, прямой) экспериментальной статьи: «Введение», «Материалы и методы», «Результаты и обсуждение», «Выводы».
- таблицы должны иметь порядковый номер (Arial 10, курсив) и заголовок (Arial 10, п/ж), текст в таблице (Arial 9, прямой), примечания к таблицам размещаются непосредственно под таблицей (Arial 8, курсивом).
- формулы (Arial 11, русские символы – прямым, английские – курсивом, греческие – Symbol 12, прямым) должны иметь порядковый номер (Arial 10, прямой);
- рисунки, схемы, диаграммы и другие графические материалы должны быть черно-белыми, четкими, контрастными, обязательно иметь номер и подрисуночную подпись (Arial 9, прямой); все громоздкие надписи на рисунке следует заменять цифровыми или буквенными обозначениями, объяснение которых необходимо выносить в подрисуночную подпись;
- список литературы (Arial 9);
- ссылки нумеруются в порядке их упоминания в тексте, где они обозначаются порядковой цифрой в квадратных скобках (например - [1]).