

М. А. Томаш, А. В. Сущенко*

ПАО «ММК им. Ильича», Группа Метинвест, Мариуполь

*Приазовский государственный технический университет, Мариуполь

Совершенствование технологии доменной плавки с вдуванием пылеугольного топлива

Выполнен анализ теплотехнологии доменной плавки с вдуванием в горн печи пылеугольного топлива. Показано, что энергоэффективность указанной технологии может быть существенно повышена за счет организации комбинированного вдувания энергоносителей с дополнительной подачей в нижнюю часть шахты печи горячих восстановительных газов.

Ключевые слова: доменное производство, вдувание пылеугольного топлива, энергоэффективность, горячие восстановительные газы, комбинированное вдувание энергоносителей, удельный расход кокса

Постановка проблемы. Расход кокса в доменных печах (ДП) является одним из важнейших технико-экономических показателей работы металлургического комбината, во многом определяющим удельные затраты топливно-энергетических ресурсов на выпуск конечной металлопродукции, себестоимость и конкурентоспособность последней, а также уровень вредных выбросов предприятия в окружающую среду. На лучших металлургических комбинатах мира в Китае и Японии достигли минимального удельного расхода кокса – 240-280 кг/т чугуна, тогда как средний расход кокса в странах Европы составляет 350-360 кг/т чугуна [1]. Лучший современный показатель на передовых комбинатах Украины – 360-400 кг/т чугуна, а на других отечественных предприятиях он составляет 480-550 кг/т чугуна.

Снижение топливно-энергетических затрат на производство чугуна в доменных печах традиционно является одной из основных задач ученых-металлургов. Поэтому указанному вопросу посвящено большое количество исследований и публикаций. В результате разработаны и освоены разнообразные способы повышения энергоэффективности доменного производства и снижения удельного расхода кокса на выплавку чугуна.

В условиях Украины, имеющей большие запасы некоксуемых углей, одной из наиболее перспективных признана технология доменной плавки с вдуванием пылеугольного топлива (ПУТ) [2, 3]. Каждый 1 кг ПУТ заменяет 0,9-1,0 кг кокса. Приготовление пылеугольного топлива сопровождается значительно меньшим загрязнением атмосферы и водного бассейна, чем производство кокса. Условиями повышения расхода ПУТ в ДП являются высокие значения механической прочности кокса и рудных материалов, содержания железа в шихте и температуры дутья. Первым отечественным предприятием, внедрившим технологию доменной плавки с одновременным вдуванием в горн печи ПУТ и природного газа, является Донецкий металлургический завод (ДМЗ), где достигли высоких технико-экономических пока-

зателей: удельные расходы кокса – 365,2 кг/т; ПУТ – 90,1 кг/т; природного газа (ПГ) – 82,2 м³/т чугуна при температуре дутья 1109 °С. В настоящее время, в условиях практически полного исключения подачи ПГ в горн ДП, на металлургических комбинатах Украины, использующих технологию доменной плавки с вдуванием ПУТ, показатели по удельным расходам кокса и пылеугольного топлива (кг/т чугуна) соответственно следующие: ДМЗ – 400 и 150-170 (2011); Алчевский металлургический комбинат – 403 и 153 (1-е полугодие 2012); металлургический комбинат «Запорожсталь» – 393 и 153 (июнь-август 2013); Мариупольский металлургический комбинат им. Ильича – 381 и 159 (июнь-август 2013).

Цель работы – выполнить анализ теплотехнологии доменной плавки с вдуванием ПУТ и разработать технические предложения, направленные на дальнейшее повышение ее энергоэффективности.

Изложение основного материала. Вдувание ПУТ в горн ДП непосредственно заменяет углерод кокса при сгорании у фурм и устраняет дефицит тепла в нижней части печи. При этом дефицит газов-восстановителей в шахте ДП сохраняется. Летучие вещества угольной пыли, выделяющиеся при ее сгорании, частично увеличивают удельный выход восстановительных газов. Но при вдувании ПУТ в ДП снижают расход или полностью прекращают подачу ПГ. Поэтому выход восстановительных газов в доменной печи сокращается. Из-за этого вдувание ПУТ сопровождается увеличением степени прямого восстановления оксидов железа $r_{\text{пр}}$.

Вместе с тем, потенциальные возможности при реализации рассматриваемой технологии в снижении расхода кокса можно существенно увеличить, если степень прямого восстановления оксидов железа в печи будет не возрастать, а снижаться.

Возможности одновременного вдувания в горн доменной печи ПУТ и природного газа, являющегося источником газов-восстановителей, ограничены. Увеличению количества вдуваемых в фурмы топливных добавок препятствуют снижение теоретической температуры горения, сложность обеспечения

полного сгорания топлива у фурм и другие технологические факторы.

В 60-70-х годах XX столетия получили распространение опытно-промышленные доменные плавки с вдуванием в печь горячих восстановительных газов (ГВГ) [4, 5]. Важнейшим преимуществом таких технологий является возможность существенного увеличения удельного расхода (на 1 т чугуна) вдуваемых углеводородсодержащих добавок. При использовании ГВГ и кислорода удельное количество продуктов горения, образующихся в фурменном очаге и ограничивающих форсировку печи в обычных условиях, заметно уменьшается (по сравнению с другими вариантами сочетания компонентов комбинированного дутья). В этом случае, при сохранении газодинамических условий, в ДП можно вдуть значительно большее количество кислорода в единицу времени, то есть достигнуть высокой степени интенсификации процесса плавки. Производительность ДП при вдувании, например, конвертированного газа можно увеличить на 8,2 % [5].

Для достижения наиболее полного восстановления шихты и уменьшения степени прямого восстановления железа (до величины, близкой к нулю) ГВГ, наряду с соответствующим их удельным расходом, должны иметь более высокое содержание оксидов углерода и водорода, то есть, как показывают опытные плавки и выполненные расчеты, в ГВГ оно должно достигать 92-95 % (за счет уменьшения содержания в них окислителей и азота). Одним из важных технологических требований к составу вдуваемого газа является его стабильность, особенно по содержанию углекислоты, а также оксида углерода [5].

Доля восстановителей в ГВГ линейно влияет на коэффициент замены ими кокса $\text{ЭЗ}_{\text{ГВГ}}$, повышая его при увеличении $(\text{CO} + \text{H}_2)$ в ДП вплоть до 80 %. Дальнейшее повышение концентрации восстановительных компонентов не только не увеличивает, но и несколько снижает экономию кокса. Это обусловлено тем, что при высоком восстановительном потенциале газов в ДП быстро достигается полное восстановление оксидов железа косвенным путем, а дальнейшее увеличение расхода ГВГ не снижает степень прямого восстановления и, соответственно, не способствует экономии теплоты. При этом газы выполняют лишь функцию теплоносителя. По мере снижения доли азота в ГВГ степень прямого восстановления уменьшается с увеличением ГВГ более круто. Каждые дополнительные 10 % $(\text{CO} + \text{H}_2)$ увеличивают $\text{ЭЗ}_{\text{ГВГ}}$ на 0,042 кг/м³. Увеличение содержания окислителей в ГВГ $(\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O})$ уменьшает $\text{ЭЗ}_{\text{ГВГ}}$ линейно, причем на каждый дополнительный 1 % $(\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O})$ величина $\text{ЭЗ}_{\text{ГВГ}}$ в среднем уменьшается на 0,015 кг/м³. Повышение температуры ГВГ ($t_{\text{ГВГ}}$) увеличивает $\text{ЭЗ}_{\text{ГВГ}}$ на 0,019 кг/м³ на каждые дополнительные 100 °С.

Значение коэффициента замены кокса ГВГ (кг/м³) можно рассчитать по формуле [6]:

$$\text{ЭЗ}_{\text{ГВГ}} = 0,2\text{CO} + 0,3\text{H}_2 - 1,5(\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}) - 0,18\text{N}_2 + 0,00019t_{\text{ГВГ}} + 1,7\text{C}_T, \quad (1)$$

где CO, H₂, H₂O, CO₂, N₂ – объемные доли соответствующих компонентов в ГВГ м³/м³; $t_{\text{ГВГ}}$ – температура

ГВГ, °С; C_T – содержание твердого углерода в ГВГ, кг/м³.

Значения степени прямого восстановления, близкие к нулю, и минимальный расход кокса достигаются при расходах ГВГ порядка 800-900 м³/т.

В основу предлагаемой технологии доменной плавки положен принцип автономности верхней восстановительной и нижней плавильной зон доменной печи. Вдуваемое в горн ДП пылеугольное топливо уменьшает дефицит теплоты в горне и снижает удельный расход кокса за счет его прямой замены угольной пылью. Горячие восстановительные газы, подаваемые в шахту доменной печи, устраняют недостаток газов восстановителей в этой зоне и снижают удельный расход кокса за счет более полного развития восстановления оксидов железа газами и снижения степени прямого восстановления железа. При достаточном расходе ГВГ степень прямого восстановления можно максимально приблизить к нулю, а ход доменной плавки – к идеальному Грюнеровскому процессу [7] (без дополнительного расхода топлива в горне при высоких технологических параметрах процесса).

Известны различные способы получения ГВГ. В аглодоменном производстве в качестве дополнительного топлива используют очищенный различными техническими методами от CO₂ колошниковый газ. Содержащий большое количество восстановителей (CO + H₂) полученный газ можно вдувать в горн ДП, а также использовать для нагрева насадки воздухонагревателей [8].

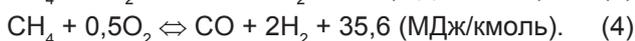
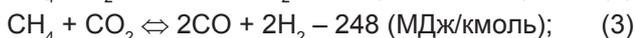
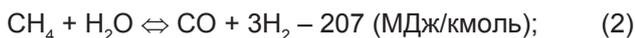
Восстановительные газы можно получить путем газификации твердого топлива (угля) [6]. Состав полученного газа зависит от многих факторов, главными из которых являются вид и характеристика топлива, температура и давление в зоне реакций, а также состав дутья. Обычно температуру процесса газификации поддерживают в интервале 1000-1300 °С при широком диапазоне давлений от 0,10 до 10,0 МПа и выше. В качестве окислителя обычно используют кислород в чистом его виде (кислородное дутье), либо входящий в состав воздуха (воздушное дутье), либо высвобождающийся в ходе химических реакций, например, при диссоциации водяного пара или других соединений.

Организация процесса газификации твердого топлива обладает некоторыми недостатками, главный из которых – малая интенсивность процесса. Так, в самых крупных газогенераторах типа «Лурги» со словесным процессом газификации при работе под давлением в 2-3 МПа интенсивность процесса по расходу угля на единицу поверхности слоя составляет всего 1,5-2,5 т/(ч·м²). Температура газа на выходе из такого газогенератора достигает 550 °С и при этом он содержит до 20 г/м³ смоляных компонентов, что значительно затрудняет утилизацию физической теплоты газа в энергоцикле до его очистки.

В течение нескольких лет в ИВТАН и ИЧМ проводили аналитические и экспериментальные исследования по отработке конструкции и режима работы газогенераторов пылеугольного топлива вихревого типа с целью получения ГВГ для вдувания в домен-

ные печи [9]. Тогда разработали компактный (устанавливается в пределах существующего фурменного прибора) газогенератор с достаточно высокой стойкостью, работающий в режиме с выносом всей ожоженной золы угля в фурменный очаг вместе с получаемым ГВГ, который подтвердил возможность производства ГВГ с температурой 1700-2000 °С и содержанием окислителей 1-2 %.

Наиболее распространенный путь получения ГВГ – конверсия ПГ. В зависимости от применяемого для конверсии окислителя выделяют паровую, углекислотную и кислородную конверсии. При этом газ-восстановитель получают в результате следующих химических реакций:



При выборе способа конверсии ПГ для получения ГВГ с целью их последующего вдувания в шахту доменной печи следует предпочесть паровую конверсию кислородной и углекислотной. При современной высокой стоимости природного газа решающим недостатком кислородной конверсии остается относительно низкий выход газов-восстановителей – 3 м³ на 1 м³ ПГ. При паровой и углекислотной конверсии выход газов-восстановителей 4 м³/м³ ПГ. При углекислотной конверсии в промышленных условиях в качестве окислителя используют не чистый углекислый газ, а колошниковый, содержащий CO₂. В условиях доменного цеха это является недостатком углекислотной конверсии, так как в состав восстановительного газа переходит большое количество азота из колошникового газа, что нежелательно. Кроме того, колошниковый газ содержит соединения серы, резко снижающие активность никелевого катализатора. Эти недостатки исключают возможность применения углекислотной конверсии в доменном цехе, несмотря на минимальную стоимость окислителя. Паровая конверсия лишена этих недостатков.

Различают конверсию природного газа каталитическую и высокотемпературную. Каталитическую конверсию метана проводят с водяным паром в трубчатых печах с внешним обогревом (паровая конверсия), а также с парокислородной смесью в аппаратах шахтного типа при небольшом повышенном давлении. Наилучший катализатор – никелевый с различными добавками. Высокотемпературную конверсию осуществляют в отсутствие катализаторов при температурах 1350-1450 °С.

Первые процессы паровой, пароуглекислотной и углекислотной конверсий проводили в конвертерах-газоагрегаторах, работающих по регенеративному циклу подобно доменным воздухоагрегаторам (ВН). Для активизации реакции конверсии природного газа, а также для подавления побочной при этом реакции сажеобразова-

ния верхнюю часть насадки газоагрегатора пропитывали раствором азотнокислого никеля. Как показал опыт работы конверсионных установок, у этого способа есть существенные недостатки. Главный из них заключается в выпадении сажи на насадке газоагрегаторов и в тракте движения газа. В период нагрева насадки никель частично окислялся, а в период получения газа отдавал этот кислород, резко ухудшая состав газа, делая его нестабильным [4].

Наиболее перспективным представляется использование конвертера (реформера) природного газа непрерывного действия. Основное его преимущество – это стабильность состава и температуры ГВГ. К недостаткам можно отнести умеренную температуру ГВГ ($t_{\text{ГВГ}} = 900-950 \text{ }^\circ\text{C}$), снижающую эффективность их вдувания в горн ДП. Однако при использовании ГВГ для вдувания в нижнюю часть шахты доменной печи такая температура является близкой к оптимальной, так как находится в соответствии с температурным уровнем зоны вдувания ГВГ в ДП.

Конвертер представляет собой [10] газоплотную сварную стальную конструкцию, защищенную огнеупорной футеровкой (рис. 1). Внутри секций располагаются реакционные трубы, заполненные катализатором. В большинстве случаев в качестве катализатора применяют никель в различных концентрациях. Смешанный газ (ПГ + H₂O), подогретый до 400 °С, входит в трубы снизу; конвертированный газ выходит из верхних концов труб с температурой примерно 900 °С и поступает в футерованные коллекторные трубопроводы. Реформер отапливается с помощью установленных в днище горелок, работающих на колошниковом газе и воздухе. Рабочая температура составляет 1100 °С. Дымовые газы отсасываются из межтрубного пространства через отверстия по обеим боковым сторонам корпуса реформера, проходят через два параллельно расположенных рекуператора, где отдают большую часть физической теплоты к смеси природного газа и пара, и далее сбрасываются в дымовую трубу.

Затем провели расчеты паровой конверсии природного газа при реализации ее в условиях доменного цеха. Определили, что при паровой конверсии 1 м³ природного газа в конвертере непрерывного действия будет получено 4,584 м³ конвертированного

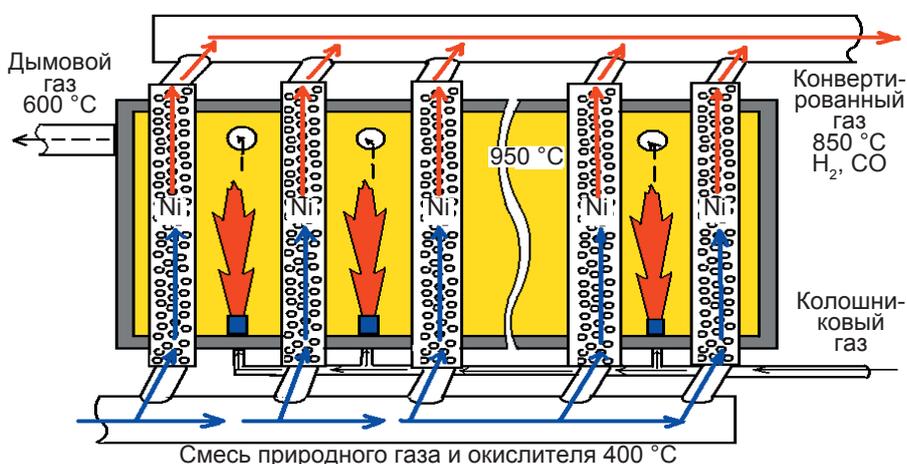


Рис. 1.

Схема реформера непрерывного действия

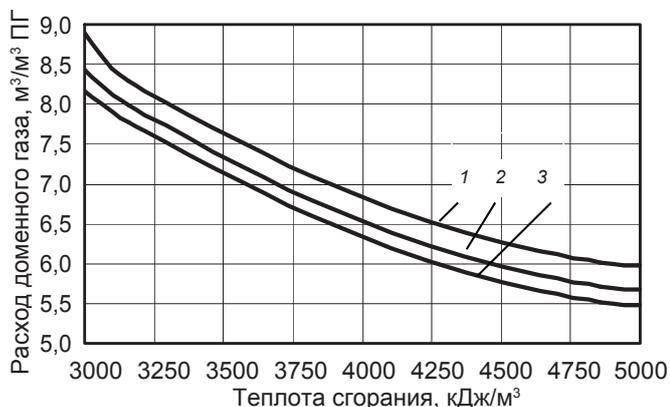


Рис. 2. Расход колошникового газа на горелки конвертера для конверсии 1 м³ природного газа при температуре (°С) конвертированного газа: 1 – 800; 2 – 900; 3 – 1000

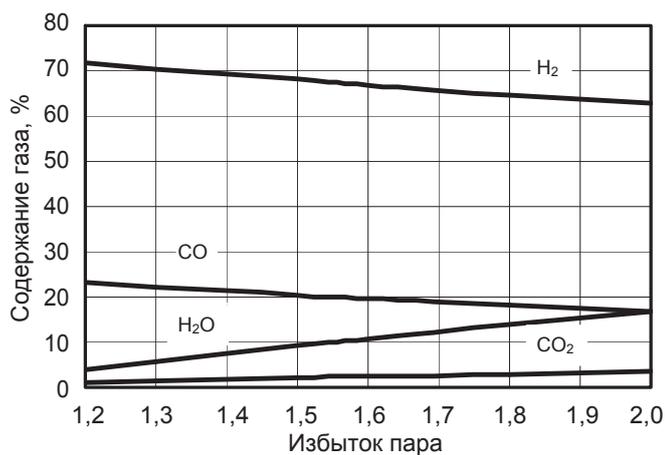


Рис. 3. Изменение состава конвертированного газа при увеличении коэффициента избытка водяного пара, %

газа с температурой 900 °С следующего состава (%): H₂ – 69,2; CO – 21,3; H₂O – 7,5; CO₂ – 1,8. Расход водяного пара составит 1,187 кг/м³ природного газа, а расход доменного газа (на горелки реформера для обеспечения теплотребностей процесса) – 6,85 м³/м³ природного газа. Следует отметить, что расход доменного газа может существенно меняться в зависимости от его состава и теплоты сгорания (рис. 2).

Важнейшим технологическим параметром паровой конверсии природного газа является коэффициент избытка водяного пара α_{H₂O}. Минимальному расходу пара на конверсию соответствует α_{H₂O} = 1. Однако при таком расходе пара конверсия углеводородов будет протекать не полностью, а в составе конвертированного газа будет содержаться сажающийся углерод. Его присутствие в составе восстановительного газа нежелательно, так как сажающийся углерод может забивать газоходы. Для снижения сажеобразования избыток пара должен быть более 1,2. С увеличением α_{H₂O} образование сажающегося углерода прекращается, но увеличивается содержание окислителей в составе конвертированного газа (рис. 3).

Так, при коэффициенте избытка пара 1,4 общее содержание окислителей (CO₂ + H₂O) в конвертированном газе составит 9,2 %, при α_{H₂O} = 1,2 – 4,8 %, а при α_{H₂O} = 1,8 – 16,9 %.

Принципиальная схема одного из вариантов реализации предложенной технологии доменного процесса представлена на рис. 4. Доменный газ после выхода из ДП проходит обычную трехступенчатую очистку, включающую пылеуловитель 1, скруббер 2, трубу Вентури 3, дроссельную группу 4, и поступает в коллектор доменного газа 5. Весь объем получаемого доменного газа делят на три потока. Часть доменного газа 6 отбирают для нагрева насадки ВН. Небольшая часть доменного газа поступает в газовую сеть металлургического предприятия, ее используют в качестве газообразного топлива другие цеха. Часть доменного газа 7 подают на горелки конвертера (непрерывного действия) и сжигают внутри его, обеспечивая температуру внутри конвертера 1050–1100 °С. Образовавшиеся при этом дымовые газы 8 с температурой 500–600 °С покидают конвертер и проходят через рекуператор, где их теплота утилизируется. После рекуператора дымовые газы выбрасываются в дымовую трубу. Исходная смесь природного газа и водяного пара проходит через рекуператор, нагреваясь до температуры порядка 400 °С, и поступает в трубы реформера с катализатором, где протекает паровая конверсия. Конвертированный газ 9 с температурой 800–900 °С поступает к верхнему ряду фурм 10, расположенных в нижней части шахты ДП. Через нижний ряд фурм 11 в горн ДП поступает горячее дутье 12 с температурой порядка 1250 °С. В фурмы горна 11 также подают пылеугольное топливо.

Для определения технико-экономических показателей доменной плавки по новой технологии составили зональный тепловой баланс с условным разделением рабочего пространства ДП на две зоны (нижнюю и верхнюю). Верхняя зона соответствует шахте доменной печи, в ней протекают такие процессы, как: испарение влаги шихты; косвенное восстановление оксидов железа газами; частичное разложение известняка (принято, что степень разложения извест-

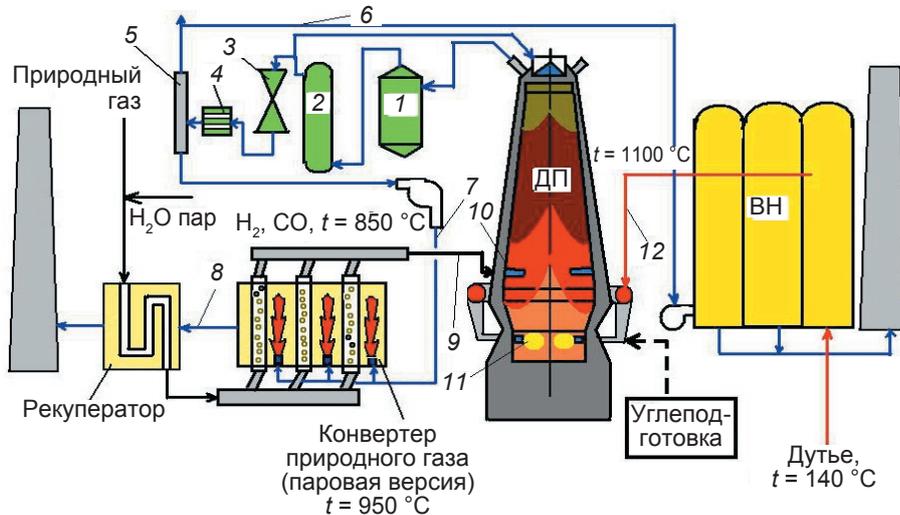


Рис. 4. Принципиальная схема доменного процесса с вдуванием ГВГ в нижнюю часть шахты и ПУТ в горн доменной печи

няка в верхней зоне составляет 50 %). Нижняя зона располагается в распаре, заплечиках и горне. В ней идут процессы размягчения и плавления шихты с образованием чугуна и шлака; реакции прямого восстановления углеродом оксидов кремния, марганца, фосфора, части оксидов железа; горения топлива и разложения влаги дутья, которые завершаются разложением известняка.

Для определения минимально возможного расхода кокса на выплавку чугуна выбраны параметры доменной плавки, характерные для наиболее передовых предприятий металлургической отрасли: температура дутья – 1250 °С; расход ПУТ – 240 кг/т чугуна; содержание железа в шихте – 62 %. Установленный расход ПУТ является практически предельным расходом топливных добавок в горн ДП в настоящее время. Вдувание ГВГ в шахту дает возможность значительно увеличить расход топливных добавок в ДП, практически не меняя условий в горне доменной печи.

Расчет материального баланса доменной плавки выполнен в качестве предварительного перед составлением тепловых балансов. В ходе расчета материального баланса выбирают степень прямого восстановления r_d . Выбор r_d должен быть выполнен таким образом, чтобы степень использо-

Материальный баланс

Приход			Выход		
	кг	%		кг	%
Рудная шихта	150,70	44,24	Чугун	100,00	29,53
Кокс	17,00	4,99	Шлак	24,35	7,19
ПУТ	24,00	7,04	Доменный газ	192,44	56,82
Влага кокса	0,58	0,17	Влажный доменный газ	21,89	6,46
Сухое дутье	114,77	33,69	Всего	338,68	100,00
Влага дутья	1,05	0,31			
Восстановительный газ	23,32	6,85			
Известняк	9,25	2,72			
Всего	340,67	100,00			

вания восстановительной способности водорода $h_{H_2} = 100 \cdot H_2O / (H_2 + H_2O)$ и CO $h_{CO} = 10 \cdot CO_2 / (CO + CO_2)$ [5] не превысила реальных значений, соответствующих равновесию реакций восстановления вюстита газами. Степень использования водорода составила 40-45 %. С учетом использования окисленных окатышей и большого расхода сырого известняка, насыщающих колошниковый газ CO_2 , степень использования CO может составить 46-50 %. Результаты расчета материального баланса доменной плавки приведены в табл. 1 (невязка составила 0,6 %).

Задачей теплового баланса нижней зоны является определение удельного расхода кокса на выплавку 100 кг чугуна. Если расход кокса принят предварительно при расчете материального баланса,

Таблица 2

Тепловой баланс нижней зоны доменной печи

Тепло					
приход			расход		
статьи	МДж	%	статьи	МДж	%
Физическое тепло дутья	162,7	31,85	Уносится чугуном	110,7	21,67
Тепло окисления углерода топлива до CO	246,2	48,20	Уносится шлаком	45,6	8,93
Тепло шихты из верхней зоны	101,9	19,95	Разложение влаги дутья	14,6	2,86
Итого	510,8	100,00	Разложение известняка	7,9	1,55
			Диссоциация оксидов	74,9	14,66
			Уносится газами	171,4	33,56
			Реакции летучих	3,5	0,69
			Потери	82,2	16,09
			Итого	510,8	100,00

Таблица 3

Тепловой баланс верхней зоны доменной печи

Тепло					
приход			расход		
статьи	МДж	%	статьи	МДж	%
С газом из нижней зоны	171,40	20,01	Уносимое в нижнюю зону	101,90	11,90
С восстановительным газом	68,50	8,00	Диссоциация оксидов железа	631,70	73,75
Окисление CO и H_2 в реакциях косвенного восстановления	613,50	71,62	Разложение известняка	7,90	0,92
Вносится шихтой	3,20	0,37	Испарение влаги шихты	1,50	0,18
Всего	856,60	100,00	Уносится колошниковым газом	95,80	11,18
			Потери тепла	17,80	2,08
			Всего	856,60	100,00

Таблица 4

Показатели предлагаемой технологии доменного процесса

Показатели расчета	Значения
Расход:	
сухого кокса, кг/т чугуна	170
известняка, кг/т чугуна	92,50
окатышей, кг/т чугуна	1507
ПУТ, кг/т чугуна	240
природного газа, м ³ /т чугуна	120
восстановительного газа, м ³ /т чугуна	550
дутья, м ³ /т чугуна	899
кислорода (в составе дутья), м ³ /т чугуна	57
пара, кг/т чугуна	142,50
Выход:	
шлака, кг/т чугуна	243,50
колошникового газа (сухого), м ³ /т чугуна	1669
Состав чугуна, %:	
Si	0,40
Mn	0,09
S	0,037
P	0,024
C	4,41
Состав шлака, %:	
CaO	45,35
SiO ₂	37,78
Al ₂ O ₃	6,29
MgO	6,98
FeO	0,50
MnO	0,40
S	2,72
Основность CaO / SiO ₂	1,20
Состав колошникового газа, %:	
CO ₂	19,30
CO	20,90
H ₂	20,20
N ₂	39,50
Влажность	16,30
Теплота сгорания, МДж/м ³	4580
Содержание O ₂ в дутье, %	26
Температура дутья, °C	1250
Температура восстановительного газа, °C	900
Содержание Fe в окатышах, %	62,67

тепловой баланс нижней зоны позволяет оценить потери теплоты и правильность выбора расхода кокса. При правильном выборе расхода кокса потери тепла в систему охлаждения в нижней зоне должны соответствовать интервалу значений 50-100 МДж/100 кг чугуна. Задача теплового баланса верхней зоны – определение температуры колошникового газа.

В расчетах на границе зон принимали: температуру газа – 900 °C; разность температур шихты и газа – 50 °C; температуру шихты – 850 °C (900 - 50 °C). Результаты расчетов зонального теплового баланса ДП приведены в табл. 2 и 3. На их основе определили показатели доменного процесса для предлагаемой технологии (табл. 4).

Затраты тепловой энергии на выплавку 1 т чугуна по новой технологии составили 16,5 ГДж и сократились на 2,3 ГДж в сравнении с традиционной технологией. Коэффициент использования тепла в доменном процессе увеличился с 51,10 до 54,09 % за счет снижения неиспользованной химической энергии доменного газа с 30,83 до 16,21 %. Новая технология доменной плавки с вдуванием в горн ПУТ (240 кг/т чугуна) и в шахту ГВГ (550 м³/т чугуна) при расходе природного газа для получения ГВГ 120 м³/т чугуна предоставит возможность снизить степень прямого восстановления оксидов железа до 12 % и удельный расход кокса до 170 кг/т чугуна, что на 90-120 кг/т чугуна ниже, чем на лучших доменных печах страны.

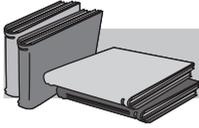
Выводы

Наиболее перспективная в Украине технология доменной плавки с вдуванием пылеугольного топлива в горн ДП, снижая удельный расход кокса за счет его замены на ПУТ в нижней части агрегата, не устраняет дефицита газа-восстановителя в шахте печи. При этом идеальный процесс доменной плавки по Грюнеру, характеризующийся минимальными степенью прямого восстановления оксидов железа и расходом кокса, не может быть достигнут.

Предложена новая технология доменной плавки с одновременным вдуванием пылеугольного топлива в горн доменной печи и горячих восстановительных газов в нижнюю часть шахты (вдувание ПУТ заменяет часть кокса-источника теплоты, уменьшая недостаток ее в нижней зоне ДП, а вдувание ГВГ устраняет недостаток восстановителей в верхней зоне ДП), позволяющая приблизить ход процесса к Грюнеровскому и существенно снизить топливно-энергетические затраты на выплавку чугуна.

При современной высокой стоимости природного газа наиболее рациональным и технологичным способом получения ГВГ для доменной плавки является паровая конверсия ПГ в конвертерах непрерывного действия. При этом с 1 м³ ПГ будет получено 4,584 м³ конвертированного газа с температурой 900 °C следующего состава (%): H₂ – 69,2; CO – 21,3; H₂O – 7,5; CO₂ – 1,8. Расход водяного пара составит 1,187 кг/м³ ПГ, доменного газа на горелки – 6,85 м³/м³ ПГ.

Новая технология доменной плавки (с удельным расходом ПУТ ~240 кг/т чугуна и ГВГ ~550 м³/т чугуна) даст возможность снизить степень прямого восстановления оксидов железа до 12 % и удельный расход кокса до 170 кг/т чугуна.



ЛИТЕРАТУРА

1. *Курунов И. Ф.* Шихтовые материалы, кокс, эксплуатация и показатели работы доменных печей // *Сталь*. – 2001. – № 3. – С. 7-13.
2. *Ярошевский С. Л.* Выплавка чугуна с применением пылеугольного топлива. – М.: *Металлургия*, 1988. – 175 с.
3. Перспективы применения пылеугольного топлива в доменных цехах Украины и России / *А. А. Минаев, А. Н. Рыженков, Ю. Г. Банников и др.* // *Сталь*. – 2008. – № 2. – С. 5-11.
4. *Тихомиров Е. Н.* Комбинированное дутье доменных печей. – М.: *Металлургия*, 1974. – 160 с.
5. *Тихомиров Е. Н.* Восстановительные газы и кислород в доменном производстве. – М.: *Металлургия*, 1982. – 104 с.
6. *Товаровский И. Г.* Анализ показателей и процессов доменной плавки. – Днепропетровск: *Пороги*, 2000. – 420 с.
7. *Рамм А. Н.* Современный доменный процесс. – М.: *Металлургия*, 1980. – 304 с.
8. *Белосельский Б. С., Барышев В. И.* Низкосортные энергетические топлива: особенности подготовки и сжигания // М.: *Энергоиздат*, 1989. – С. 134.
9. *Альтшулер В. С.* Современные процессы газификации твердого топлива. – М.: *Недра*, 1976. – 280 с.
10. *Иващенко В. П., Величко А. Г., Терещенко В. С.* Одностадийные процессы прямого получения жидкого металла с применением традиционных видов энергии // *Теория и практика металлургии*. – 2002. – № 1. – С. 9-23.

Анотація

Томаш М. О., Сущенко А. В.

Вдосконалення технології доменної плавки з вдуванням пиловугільного палива

Виконано аналіз теплотехнології доменної плавки з вдуванням у горно печі пиловугільного палива. Показано, що енергоефективність вказаної технології можливо істотно підвищити за рахунок організації комбінованого вдування енергоносіїв з додатковим поданням в нижню частину шахти печі гарячих відновлювальних газів.

Ключові слова

доменне виробництво, вдування пиловугільного палива, енергоефективність, гарячі відновлювальні газу, комбіноване вдування енергоносіїв, питома витрата коксу

Summary

Tomash M. A., Sushchenko A. V.

Improvement of blast-furnace melting technology with coal-dust insufflations

The analysis of heat-technology of the blast-furnace melting with coal-dust insufflations to the crucible is executed. Shown that power effectiveness reference technology able to be appreciably enhance due to organization of the combined energy carriers insufflations – with additional admission of hot gas-reductor in the bottom part of furnace stack.

Keywords

blast-furnace production, coal-dust insufflations, power effectiveness, hot gas-reductor, combined energy carriers insufflations, coke rate