

УДК 669.162

Сущенко А.В.¹, Томаш М.А.²

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ 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.

Сущенко А.В., Томаш М.А. Підвищення енергоефективності технології доменної плавки з вдуванням пиловугільного палива. Виконано аналіз теплотехнології доменної плавки з вдуванням у горн печі пиловугільного палива. Показано, що енергоефективність вказаної технології може бути істотно підвищена за рахунок організації комбінованого вдування енергоносіїв - з додатковим подаванням у нижню частину шахти печі гарячих відновлювальних газів.

Ключові слова: доменне виробництво, вдування пиловугільного палива, енергоефективність, гарячі відновлювальні гази, комбіноване вдування енергоносіїв, питома витрата коксу.

Sushchenko A. V., Tomash M. A. Increase of efficiency of the process of blast furnace melting with pulverized coal fuel injection. The analysis of heat-technology of the blast-furnace melting with pulverized coal fuel injection into the blast furnace hearth. It was shown that power efficiency of the described process could be sufficiently increased by means of organization of combined injection of energy resources, with additional supply of renewable gases into the lower part of the furnace stack.

Keywords: blast-furnace production, coal-dust insufflations, power effectiveness, hot renewable gases, combined injection of power sources, coke consumption.

Постановка проблемы. Расход кокса в доменных печах 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 достигнут минимальный удельный расход кокса 260 – 280 кг/т чугуна. Средний расход кокса в странах Европы составляет 350 – 360 кг/т чугуна [1]. Украина существенно отстает, лучший современный показатель – 420 – 440 кг/т чугуна. На большинстве украинских металлургических комбинатов удельный расход кокса составляет 490 – 510 кг/т чугуна.

Анализ последних исследований и публикаций. 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. Весомый вклад в его решение внесли отечественные и зарубежные ученые: Ярошевский С.Л., Минаев А.А., Тихомиров Е.Н., Товаровский И.Г., Андронов В.Н., Рамм А.Н., Готтлиб А.Б., Мишар Ж., Китаев Б.И., Донсков Е.Г., Ноздрачев В.А., Грес Л.П. и многие другие. Были разработаны и освоены разнообразные способы повышения энергоэффективности доменного производства и снижения удельного расхода кокса на

¹ канд. техн. наук, доцент, Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь

² ассистент, Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь

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 и др.]. 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. На ДМЗ внедрена технология доменной плавки с одновременным вдуванием в горн печи ПУТ и природного газа, где были достигнуты высокие технико-экономические показатели: удельные расходы кокса - 365,2 кг/т, ПУТ - 90,1 кг/т, природного газа - 82,2 м³/т чугуна при температуре дутья 1109 °С. В Японии и Китае расход ПУТ, вдуваемого в горн доменных печей, достигает 240 – 260 кг/т чугуна. Условиями высокого расхода ПУТ являются высокие значения механической прочности кокса и рудных материалов, содержания железа в шихте и температуры дутья.

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

Изложение основного материала. Вдувание ПУТ в горн доменных печей непосредственно заменяет углерод кокса при сгорании у фурм и устраняет дефицит тепла в нижней части доменной печи. При этом дефицит газов-восстановителей в шахте доменной печи сохраняется. Летучие вещества угольной пыли, выделяющиеся при её сгорании, частично увеличивают удельный выход восстановительных газов. Но при вдувании ПУТ в доменные печи снижают или полностью прекращают вдувание природного газа. Поэтому выход восстановительных газов в доменной печи сокращается. Из-за этого вдувание ПУТ сопровождается увеличением степени прямого восстановления оксидов железа α_d .

Вместе с тем, потенциальные возможности рассматриваемой технологии в снижении расхода кокса могут быть существенно увеличены, если при ее реализации будет иметь место не возрастание степени прямого восстановления оксидов железа в печи, а её снижение.

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, сложности обеспечения полного сгорания топливных добавок у фурм и другие технологические факторы.

В 60-х–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 1т чугуна) вдуваемых углеводородсодержащих добавок. При использовании ГВГ и кислорода (по сравнению с другими вариантами сочетания компонентов комбинированного дутья) удельное количество продуктов горения, образующихся в фурменном очаге и ограничивающих форсировку печи в обычных условиях, заметно уменьшается. В этом случае, при сохранении газодинамических условий, в доменную печь можно вдувать значительно большее количество кислорода в единицу времени, т.е. достигнуть высокой степени интенсификации процесса плавки. Производительность печи при вдувании, например, конвертированного газа может быть увеличена 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 возможно более высокое содержание оксида углерода и водорода. Опытные плавки и выполненные расчеты показывают, что содержание CO и H₂ в ГВГ должно доходить до 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 восстановителя в ГВГ (CO + H₂) линейно влияет на коэффициент замены ГВГ кокса $\Xi_{ГВГ}$, увеличивая его вплоть до 80 % (CO + H₂), после чего повышение концентрации восстановительных компонентов не только не увеличивает, но и несколько снижает экономию кокса. Это обусловлено тем, что при высоком восстановительном потенциале газов в доменной печи быстро достигается полное восстановление оксидов железа косвенным путем, и 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. В пределах до 80 % (CO + H₂) ГВГ каждые дополнительные 10 % (CO + H₂) увеличивают ЭЗ_{ГВГ} на 0,042 кг/м³. При 100 % (CO + H₂) ЭЗ_{ГВГ} = 0,42 кг/м³. Увеличение содержания окислителей в ГВГ (CO₂ + H₂O) уменьшает ЭЗ_{ГВГ} линейно, причем на каждый дополнительный 1% (CO₂ + H₂O) величина ЭЗ_{ГВГ} в среднем уменьшается на 0,015 кг/м³. Повышение температуры ГВГ (t_{ГВГ}) увеличивает ЭЗ_{ГВГ} на 0,019 кг/м³ на каждые дополнительные 100 °С. Значение коэффициента замены кокса ГВГ (кг/м³) можно рассчитать по формуле [6]:

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

где CO, H₂, H₂O, CO₂, N₂ – объемные доли соответствующих компонентов в ГВГ м³/м³;
 t_{ГВГ} – температура ГВГ, °С;
 C_τ – содержание твердого углерода в ГВГ, кг/м³.

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

В основу предлагаемой технологии доменной плавки положен принцип автономности верхней восстановительной и нижней плавильной зон доменной печи. Вдуваемое в горн доменной печи пылеугольное топливо уменьшает дефицит теплоты в горне и снижает удельный расход кокса за счёт 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 счёт более полного развития восстановления оксидов железа газами и снижения степени прямого восстановления железа. При достаточном расходе ГВГ степень прямого восстановления может быть максимально приближена к 0, а ход доменной плавки к идеальному Грюнеровскому процессу [7] без дополнительного расхода топлива в горне при высоких технологических параметрах процесса. Получение ГВГ осуществляется путем организации процесса паровой конверсии природного газа (ПГ) в специальном реформере (конвертере). В качестве топлива для обогрева последнего применяется доменный газ. При этом эффективность использования ПГ в доменной плавке увеличивается в 1,5 раза. Коэффициент замены кокса природным газом возрастает с 0,7 до 1,05 кг/м³ за счёт увеличения количества газов-восстановителей в сравнении с традиционным вдуванием природного газа в горн. Использование вторичных энергетических ресурсов – доменного газа для проведения паровой конверсии природного газа позволяет повысить эффективность применения последнего с минимальными затратами. Принципиальная схема одного из вариантов реализации предложенного доменного процесса представлена на рисунке.

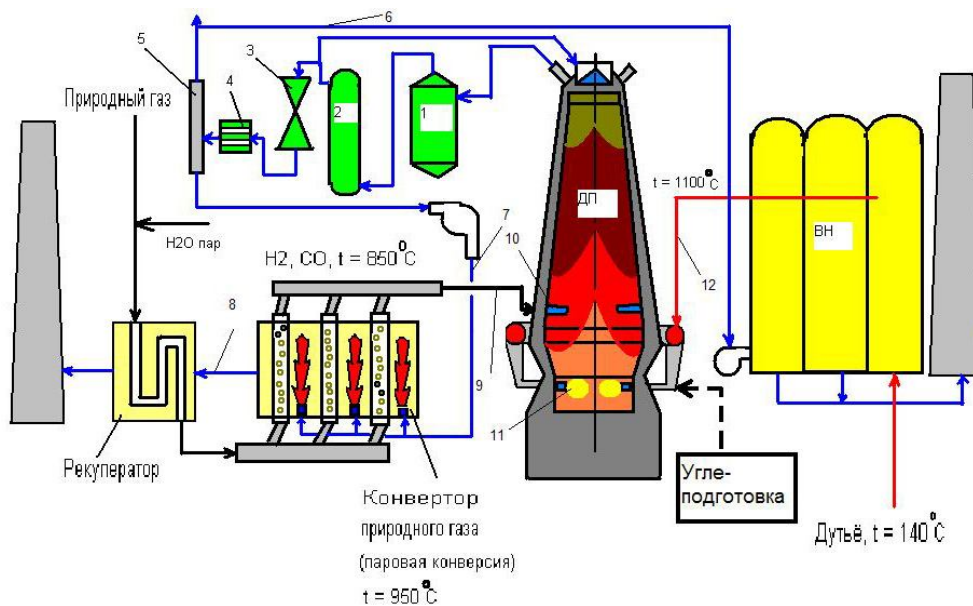


Рисунок – Принципиальная схема доменного процесса с вдуванием ГВГ в нижнюю часть шахты и ПУТ в горн доменной печи

Доменный газ после выхода из доменной печи проходит обычную трёхступенчатую очистку, включающую пылеуловитель 1, скруббер 2, трубу Вентури 3 и дроссельную группу 4, и поступает в коллектор доменного газа 5. Весь объём получаемого доменного газа делится на три потока. Часть доменного газа 6 отбирается для нагрева насадки воздухонагревателей (ВН). Небольшая часть доменного газа поступает в газовую сеть металлургического предприятия и используется в качестве газообразного топлива другими цехами. Часть доменного газа 7 подаётся на горелки конвертора (непрерывного типа) и сжигается внутри его металлического корпуса, обеспечивая температуру внутри конвертора 1050 – 1100 °С. Образовавшиеся при этом дымовые газы 8 с температурой 500 – 600 °С покидают конвертор 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 подается к верхнему ряду фурм 10, расположенных в нижней части шахты доменной печи. Через нижний ряд фурм 11 в горн доменной печи поступает горячее дутьё 12 с температурой порядка 1250 °С. В фурмы горна 11 также подаётся пылеугольное топливо.

Для сравнительной оценки эффективности предложенной и базовой (традиционной) технологий выплавки чугуна был рассчитан общий тепловой баланс доменной плавки с одновременным вдуванием ПУТ в горн и ГВГ в шахту доменной печи для системы «доменная печь – блок воздухонагревателей – конвертер природного газа» по методике [8]. Для анализа 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 – более 62 %. Установленный расход ПУТ является практически предельным расходом топливных добавок в горн доменной печи в настоящее время. Результаты расчета приведены в таблице. Тепловой баланс базовой плавки рассчитан и представлен в работе [8].

Таблица

Общий тепловой баланс выплавки чугуна в доменной печи по новой технологии

Статьи баланса	МДж/т	%
Приход		
Полная теплота сгорания углерода кокса и ПУТ	9826	59,38
Полная теплота сгорания летучих веществ	2420	14,63
Полная теплота сгорания природного газа	4080	24,66
Энтальпия холодного дутья	166	1,00
Энтальпия пара	53	0,32
Энтальпия шихты	2	0,01
Итого приход	16547	100,0
Расход		
Диссоциация оксидов	7066	42,70
Разложение карбонатов	160	0,97
Испарение влаги шихты и разложение влаги дутья	161	0,97
Энтальпия чугуна	1107	6,69
Энтальпия шлака за вычетом теплоты шлакообразования	456	2,76
Неиспользованное тепло		
Энтальпия колошникового газа	958	5,79
Внешние потери тепла	1000	6,04
Химическая энергия колошникового газа	2682	16,21
Химическая энергия углерода в чугуне	1440	8,70
Энтальпия дымовых газов потери тепла на ВН и реформере	1517	9,17
Итого общий расход	16547	100,0

Затраты тепловой энергии на выплавку 1 т чугуна по новой технологии составили 16,5 ГДж и сократились на 2,3ГДж в сравнении с традиционной технологией. Коэффициент использования тепла в доменном процессе увеличился с 51,1 до 54,09 %. Увеличение КИТ достигнуто за счёт 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) позволит снизить степень прямого восстановления оксидов железа до 12 %, а удельный расход кокса до 170 кг/т чугуна, что на 90 - 120 кг/т чугуна ниже, чем на лучших доменных печах.

При проведении дальнейших исследований необходимо: выполнить анализ тепловой работы доменной печи по разработанной технологии на основе составления зональных тепловых балансов, с разделением печи на две зоны; провести анализ и выбрать оптимальный вариант получения ГВГ в доменном цехе; разработать эффективные устройства для вдувания энергоносителей в печь.

Выводы

1. Наиболее перспективная в Украине технология доменной плавки с вдуванием пылеугольного топлива в горн доменной печи, снижая удельный расход кокса за счёт его замены на ПУТ в нижней части агрегата, не устраняет дефицита газа-восстановителя в шахте печи. При этом идеальный ход доменной плавки по Грюнеру, характеризующийся минимальными степенью прямого восстановления оксидов железа и расходом кокса, не может быть достигнут.
2. 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 доменной печи, а вдувание ГВГ устраняет недостаток восстановителей в верхней зоне доменной печи), позволяющая приблизить ход процесса к Грюнеровскому и существенно снизить топливно-энергетические затраты на выплавку чугуна.

Список использованных источников:

1. Курунов И.Ф. Шихтовые материалы, кокс, эксплуатация и показатели работы доменных печей (по материалам 4 – го Европейского конгресса по коксохимическому и аглодоменному производству) // Сталь. – 2001. - № 3. – С. 7 – 13.
1. Ярошевский С.Л. Выплавка чугуна с применением пылеугольного топлива / С.Л. Ярошевский – М.: Металлургия, 1988. – 175 с.
2. Минаев А.А. 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.
3. Тихомиров Е.Н. Комбинированное дутьё доменных печей / Е.Н. Тихомиров. – М.: Металлургия, 1974. – 160 с.
4. Тихомиров Е.Н. Восстановительные газы и кислород в доменном производстве / Е.Н. Тихомиров. – М.: Металлургия, 1982. – 104 с.
5. Товаровский И.Г. Анализ показателей и процессов доменной плавки / И.Г. Товаровский, В.В. Севернюк, В.П. Лялюк – Днепрпетровск: Пороги, 2000. – 420 с.
6. Рамм А.Н. Современный доменный процесс / А.Н. Рамм – М.: Металлургия, 1980. – 304 с.
7. Томаш А.А. Традиционные и новые методы расчёта теплового баланса доменной плавки / А.А. Томаш, А.В. Сущенко, М.А. Томаш // Вісник ПДТУ. – Вип. 18. – 2008. – С. 9 – 14.

Рецензент: Маслов В.А.
д-р техн. наук, проф., ПГТУ

Статья поступила 20.12.2009