

УДК 669.187:536.7

М.В. ГУБИНСКИЙ¹, д-р техн. наук, проф.,
С.Н. ТИМОШЕНКО², канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,
А.А. ШРАЙБЕР³, д-р техн. наук, проф., **И.В. АНТОНЕЦ**³

¹ Национальная металлургическая академия Украины,
пр. Гагарина, 4, г. Днепр, 49600, Украина,

² Донецкий национальный технический университет,
пл. Шибанкова, 2, г. Покровск, 85300, Украина,

³ Институт общей энергетики НАН Украины,
ул. Антоновича, 172, г. Киев, 03150, Украина

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ ПУТЕМ КОНВЕРСИИ ПРИРОДНОГО ГАЗА С ОТХОДЯЩИМИ ГАЗАМИ ДУГОВОЙ ПЕЧИ

Разработана новая схема электросталеплавильного процесса с термохимической регенерацией-конверсией природного газа с отходящими печными газами для предварительного нагрева скрапа. Согласно термодинамическим расчетам данная схема обеспечивает повышение теплового КПД печи на 5–6%, экономию топлива на 21% и снижение эмиссии CO₂ в атмосферу на 9,8%.

К л ю ч е в ы е с л о в а: дуговая сталеплавильная печь, энергоэффективность, природный газ, конверсия, термохимическая регенерация.

Состояние вопроса и постановка задачи. Дуговые сталеплавильные печи (ДСП) обеспечивают более трети мирового объема выплавки стали, уступая только конвертерному процессу. Дуговые печи привлекают производителей возможностью интенсивного и концентрированного ввода энергии в рабочее пространство агрегата вне зависимости от его окислительного потенциала, широким спектром вариантов исходной шихты, более высокими экологическими характеристиками.

Производство стали сопровождается образованием пылегазовой смеси в количестве 200–450 мг/т с температурой 300–1600 °С на выходе из печи по ходу плавки. Газообразование обусловлено главным образом окислением углерода при продувке ванны кислородом (СО), работой топливно-кислородных горелок (ТКГ, СО₂ + водяной пар) и притоком атмо-

сферного воздуха через рабочее окно (N₂, O₂) за счет разрежения в печи, создаваемого дымососом (20–100 Па). Дополнительным источником газов является термическое разложение органических и неорганических примесей шихты. С отходящими газами в ДСП теряется 15–25% введенной энергии [1].

Компанией «Techint Technologies» (Италия) разработан процесс «Consteel» [2, 3] с утилизацией теплоты печных газов для предварительного нагрева скрапа. Технология предусматривает непрерывную подачу шихты из отделения подготовки скрапа в сталеплавильную ванну и дискретный выпуск металла с оставлением в печи жидкого «болота», составляющего до 50–55% от массы плавки. В настоящее время в разных странах работают более 40 установок этого типа, в том числе крупнейшая в мире 420-тонная ДСП постоянного тока на предприятии «Tokyo Steel» (Япония) [4].

Существенным недостатком технологии «Consteel» является низкая интенсивность

© М.В. ГУБИНСКИЙ, С.Н. ТИМОШЕНКО,
А.А. ШРАЙБЕР, И.В. АНТОНЕЦ, 2017

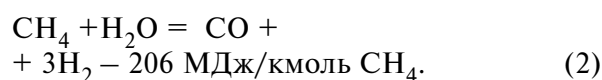
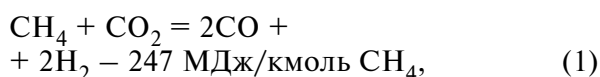
теплоотдачи от потока печных газов к нагреваемому на конвейере скрапу, которая осуществляется сверху вниз [5]. Проблема усугубляется притоком холодного воздуха по длине конвейера. В целях повышения температуры скрапа предложено использовать топливно-кислородные горелки в качестве дополнительного средства [3] или вместо утилизации тепла отходящих газов [5].

По нашему мнению, для повышения эффективности предварительного нагрева скрапа в ДСП целесообразно использовать опыт термохимической регенерации (ТХР) – конверсии природного газа, полученный при использовании в шахтных процессах производства металлизированного сырья [6], а также в нагревательных и стекловаренных печах [7]. Условием применения метода является относительное постоянство газовой выделений из печи по составу, температуре и окислительному потенциалу, что характерно для процессов с непрерывным плавлением скрапа в жидкой ванне.

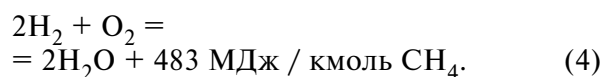
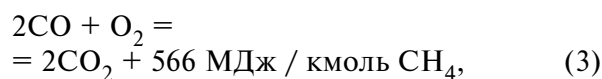
Поэтому целью настоящей работы является повышение энергоэффективности ДСП. Для этого рассмотрены основные термодинамические характеристики конверсии природного газа за счет утилизации энергии отходящих газов ДСП применительно к возможности использования конвертированного топлива (КТ) для предварительного нагрева скрапа, что позволит снизить энергозатраты на выплавку стали. Параллельно появляется возможность уменьшения эмиссии CO_2 из печи в атмосферу за счет рециклинга части углекислого газа, участвующей в процессе ТХР. Кроме того, предлагается новая схема электросталеплавильного процесса с ТХР.

Термодинамические характеристики процесса конверсии природного газа. Для упрощения считаем, что природный газ состоит из чистого метана, и все реакции стехиометрические. Воздух и продукты сгорания (ПС) используются как окислитель и реагент для конверсии топлива соответственно.

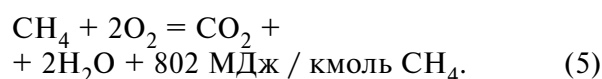
Процесс ТХР заключается в проведении совместной углекислотной и пароводяной конверсии метана за счет использования энтальпии отходящих газов ДСП с температурой 1200–1500 °С по реакциям



Сжигание конвертированного топлива в ТКГ протекает согласно реакциям



Углекислый газ и водяной пар, необходимые для реализации реакций (1), (2), образуются согласно (3), (4) при работе ТКГ. Традиционный вариант предварительного нагрева скрапа [3, 5] предполагает сжигание в ТКГ непосредственно метана:



Нетрудно убедиться, что калорийность КТ, образующегося по реакциям (1), (2), составляет 1049 и 1008 МДж / кмоль CH_4 , т.е. ТХР открывает возможности существенной экономии исходного топлива.

Рассмотрим простейшую схему ТХР-установки, представленную на рис. 1. Отходящие газы после печи 1 поступают в реактор 2, где образуется КТ, и далее – в воздухонагреватель 3. Затем поток охлажденных ПС разделяется на две части: $\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 7,52\text{N}_2$ сбрасывается в атмосферу, а $(\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 7,52\text{N}_2)/3$ служит реагентом, т.е. состав ПС после печи (на 1 кмоль CH_4) – $4(\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 7,52\text{N}_2)/3$. Поэтому мы будем пользоваться как энтальпией всех ПС после печи (обозначение I), так и удельной величиной $i = 0,75I$.

Чтобы оценить качество схем ТХР, будем, во-первых, рассматривать не «чистую» ТХР, а комбинированную регенерацию (КР), включающую и нагрев воздуха, и, во-вторых, сравнивать схемы КР с соответствующими схемами воздушной регенерации (ВР), пример которой показан на рис. 2. Для этой схемы приняты такие исходные данные: $T_0 = T_1 = 303 \text{ К}$; $T_2 = 673 \text{ К}$; $T_3 = 1473 \text{ К}$ (индексы здесь и ниже совпадают с номерами точек в кружочках). Приведем некоторые результаты расчета этой схемы:

I_1	I_2	Q_a	I_3	I_4	T_4	q^+	Q_t	φ
2,8	108,3	105,5	437,9	332,4	1213,8	910,6	472,7	0,414

(все энтальпии I , полные энтальпии $K = I + J$, калорийности J и количества теплоты имеют размерность МДж/кмоль CH_4 , и ниже она не повторяется; все температуры в К). Здесь $Q_a = I_2 - I_1$ – расход теплоты на нагрев воздуха (потери теплоты в аппаратах и трубопроводах не учитываем); $q^+ = J_0 + I_2$ – теплота, входящая в теплообменник 2 (здесь и ниже пренебрегаем I_0); $Q_t = q^+ - I_3$ – количество теплоты, используемой в печи для проведения технологического процесса; $\varphi = I_4/J_0$ – потери теплоты с уходящими газами.

При расчете схемы рис. 1 вначале рассмотрен максимально выгодный вариант, где температура конверсии $T_c = 1400$ К (ясно, что

нагрев реагирующей смеси до таких температур потребует использования дорогих материалов). Принято также $T_9 = 473$ К. Полная энтальпия КТ определяется с помощью программы EQSO [8]. Тепловой баланс установки имеет вид

$$4i_7/3 + Q_a + Q_c = 4i_3/3; \quad Q_a = I_9 - I_1; \quad Q_c = K_8 - J_0 - i_7/3, \quad (6)$$

где Q_c – количество теплоты, используемой на конверсию. Из (6) следует

$$i_7 = 4i_3/3 - Q_a - K_8 + J_0. \quad (7)$$

Результаты здесь таковы:

I_3	T_6	T_7	i_6	i_7	I_9	Q_a	K_8	q^+	Q_c	Q_t	φ
584	679,8	577,4	130,5	94,8	50,4	47,6	1243,7	833,9	409,8	710,3	0,118.

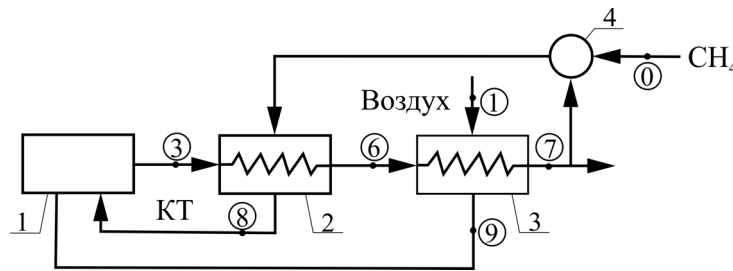


Рис. 1. Схема комбинированной регенерации:
1 – печь; 2 – термохимический реактор; 3 – теплообменник; 4 – смеситель

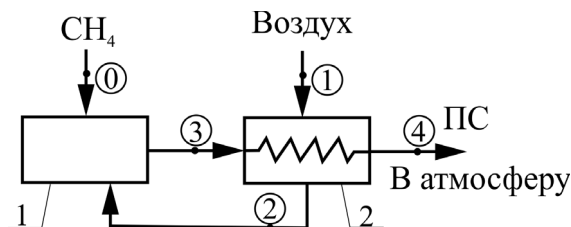


Рис. 2. Воздушная регенерация
1 – печь; 2 – теплообменник

Таблица 1 – Влияние температуры конверсии на характеристики ТХР

T_c	900	925	950	975	1000	1100	1200	1300	1400
K_8	1040,9	1065,0	1087,0	1106,5	1123,2	1168,9	1197,6	1221,3	1243,7
Q_{t2}	507,5	531,5	553,6	573,1	589,8	635,5	664,8	687,9	710,3
χ	1,07	1,124	1,171	1,212	1,25	1,344	1,405	1,455	1,5
ψ	0,065	0,11	0,15	0,175	0,2	0,258	0,288	0,314	0,333
ϕ	0,371	0,341	0,313	0,289	0,268	0,211	0,176	0,146	0,118

Таким образом, отношение значений Q_t для КР и ВР $\chi \equiv Q_{t2}/Q_{t1} \approx 1,5$, т.е. переход на комбинированную регенерацию позволяет сэкономить $\psi \equiv (\chi - 1)/\chi \sim 1/3$ исходного топлива по сравнению с ВР. Потери с отходящими газами при этом уменьшаются почти вчетверо.

Далее рассматриваются более реальные температуры конверсии (все остальные величины такие же, как и в предыдущем варианте). Пример полученных результатов приводится в табл. 1. Видно, что характеристики схемы сильно зависят от температуры конверсии. Чтобы получить существенную экономию топлива, нужно обеспечить значительную температуру конверсии – не менее 950 К. Тут следует отметить еще один момент: температуры горячего воздуха для воздушной и комбинированной регенерации разные (673 и 473 К соответственно), причем это различие приводит к заниженным значе-

ниям эффективности КР. Поэтому были проведены дополнительные расчеты при условии $T_9 = T_2$. Кроме того, полагалось, что конечная температура конверсии такая же. Рассмотрены три случая: $T_9 = 850, 900$ и 950 К. Пример полученных результатов представлен в табл. 2, где дополнительно приведены потери теплоты с отходящими газами при ВР (это $\phi_1; \phi_2$ относятся к КР).

Сопоставление данных табл. 1 и 2 свидетельствует, что эффективность ТХР заметно повышается, если контрольные температуры одинаковы при КР и ВР. Если в табл. 1 при 900 К экономия топлива незначительна, то в табл. 2 при такой температуре уже достигается существенная экономия – 14,5%, причем потери теплоты с отходящими газами уменьшаются в 1,55 раза.

Новая схема электросталеплавильного процесса. Результаты расчетов, приведенные выше, свидетельствуют о серьезных термоди-

Таблица 2 – Результаты расчетов при $T_9 = T_2 = T_c$

T_c, K	850	900	950
K_8	994,0	1040,9	1087,0
Q_{t2}	571,9	634,1	695,9
χ	1,085	1,17	1,25
ψ	0,077	0,145	0,2
ϕ_2	0,291	0,213	0,136
ϕ_1	0,348	0,329	0,309

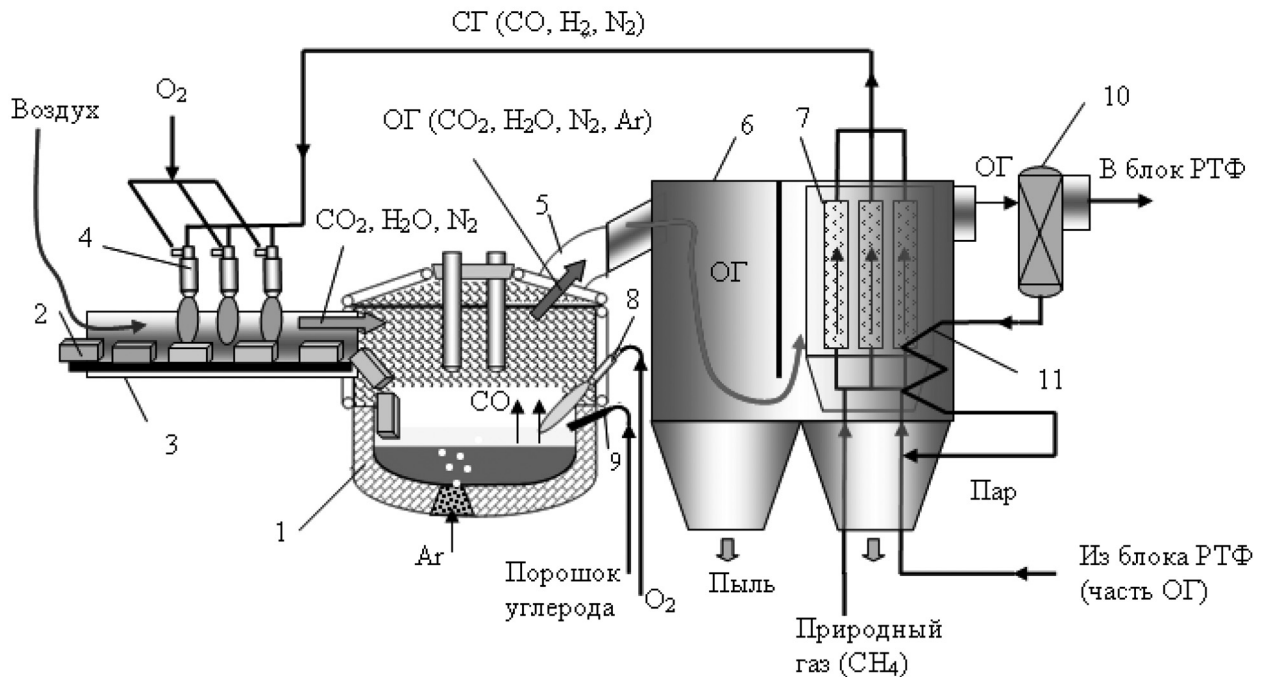


Рис. 3. Схема электрошлакового процесса с использованием ТХР. Обозначения см. в тексте

намических достоинствах применения ТХР-технологии для электрошлакового процесса. Рассмотрим перспективный вариант утилизации теплоты и химической энергии газовыделений ДСП для конверсии метана. Получаемый при регенерации синтез-газ (СГ) используется как более эффективный энергоноситель для интенсификации процесса плавки и снижения экологической нагрузки на окружающую среду. Схема процесса приведена на рис. 3.

В электродуговую печь 1 через отверстие в корпусе непрерывно загружается фрагментированный скрап 2 с помощью конвейера в туннеле 3. Скрап нагревают конвективными потоками пламени горелок 4. Отходящие газы (ОГ) из печи через газоход 5 поступают в камеру дожигания СО и первичного пылеосаждения 6. В ТКГ используется СГ, полученный в реформере 7 в результате конверсии. Температурный режим реформера и окислители (CO_2 , H_2O), необходимые для реакций конверсии (1), (2), обеспечиваются технологическими газовыделениями ДСП.

Необходимый для конверсии углекислый газ образуется в результате дожигания СО, который выделяется при продувке сталепла-

вильной ванны кислородом через фурму 8 с вводом углеродсодержащего порошка инжектором 9. Предусмотрено обеспыливание ОГ в блоке рукавных тканевых фильтров (РТФ) штатной системы газоочистки ДСП перед использованием их в ТХР.

Водяной пар, также необходимый для конверсии, образуется при работе ТКГ. В камере дожигания он способствует повышению эффективности первичного пылеосаждения и является катализатором процесса дожигания СО. Однако в РТФ наличие пара не допускается (возможно цементирование пыли), поэтому в технологической схеме предусмотрен влагоотделитель 10. Возврат пара в процесс конверсии производится через испаритель 11, установленный в камере 6.

Были выполнены расчеты характеристик ТХР для высокопроизводительной ДСП вместимостью 170 т, работающей по технологии «Consteel». Из технологического регламента принято: масса плавки 120 т («болото» 50 т); продолжительность плавки 40 мин.; удельный расход кислорода и окисляемого углерода 17 $\text{нм}^3/\text{т}$ и 9 $\text{кг}/\text{т}$ соответственно; расход электродов 1,5 $\text{кг}/\text{т}$; угар скрапа при нагреве

Таблица 3 – Ожидаемые показатели применения технологии термохимической регенерации для ДСП

Наименование параметра	Величина параметра	
	Относительные единицы (%)	Абсолютные значения
Экономия природного газа	21	3,6 нм ³ /т стали*
Повышение теплового к.п.д. печи	5–6	
Снижение угара скрапа при нагреве	5–7	0,8–1,1 кг/т стали
Сокращение выбросов CO ₂	9,8	8–10 кг/т стали

* Для справки: годовая производительность ДСП около 1,4 млн т стали.

16 кг/т; температура нагрева скрапа 650 °С; тепловая мощность и КПД ТКГ 30 МВт и 0,6 соответственно [5].

При расчете окисления углерода ванны и электродов принято, что при температуре более 1600 °С протекает суммарная реакция $C + 0,5O_2 = CO$, а равновесие реакции Будуара $CO_2 + C = 2CO$ при наличии в системе свободного углерода существенно сдвинуто вправо. Окисление углерода ванны обеспечивается техническим кислородом, а дожигание CO и окисление электродов и скрапа при нагреве протекают за счет кислорода приточного воздуха в газоходах и камере б.

Оценка энергетических показателей электроплавки с ТХР выполнена для следующего начального приближения: соотношение углекислотной и пароводяной конверсии 1:1; содержание азота в ОГ 60%; температура СГ на выходе из реформера 900 °С [6]; температура пламени при горении СГ 1400 °С (как для доменного газа, близкого к СГ по химическому составу) [9]; температура реакции дожигания CO до CO₂ с учетом пирометрического коэффициента 1650 °С [1, 9]. Для расчета притока атмосферного воздуха принято: разрежение в печи 15 Па; площадь неплотностей печи 1 м². Теплофизические параметры материалов взяты из [9].

Оценки показывают, что для обеспечения необходимой тепловой мощности ТКГ расход СГ, содержащего 60–65% азота, 18–20% CO и 15–17% H₂, составляет около 24000 нм³/ч. Производство СГ обеспечивается рециклингом

18% технологических ОГ печи. Их температура с учетом теплового эффекта процесса дожигания CO составляет 1435 °С, что с определенным запасом обеспечивает тепловой баланс реформера (с учетом потерь тепла в камере б и расхода энергии на испарение воды из ОГ).

Повышенная в 1,25–1,3 раза по сравнению с метаном калорийность СГ и использование части ОГ в цикле ТХР позволяют рассчитывать на существенное снижение потребления природного газа в ДСП и уменьшение эмиссии парникового газа CO₂ в атмосферу. Преимуществом предлагаемого способа является также уменьшение угара скрапа при высокотемпературном нагреве за счет организации более мягкого факела при наличии инертной примеси азота в газовой смеси ТКГ.

Оценка повышения теплового КПД печи при использовании ТХР основана на следующих положениях. Тепловая мощность ТКГ, вводимая для предварительного нагрева скрапа, покрывает примерно 20–25% потребной мощности на проведение плавки с учетом тепловых потерь печи. Ожидаемые технико-экономические показатели процесса ТХР применительно к рассмотренной схеме ДСП приведены в табл. 3. Базой сравнения является эквивалентная по производительности технология с использованием горелок, работающих на природном газе.

Срок окупаемости инвестиций в структуру термохимической регенерации для ДСП должен составить не более 1–2 лет.

ВЫВОДЫ

Применение метода термохимической регенерации метана с отходящими печными газами в электросталеплавильном процессе с непрерывным плавлением скрапа в жидкой ванне представляется реальным и обеспечивает повышение теплового КПД печи на 5–6%. При неизменной производительности ДСП и мощности ТКГ в результате ТХР достигается сокращение расхода природного газа на 21% по сравнению с его прямым сжиганием в ТКГ. В условиях 120-тонной ДСП производительностью 180 т/час при внедрении ТХР экономия природного газа составит 3,6 нм³/т стали, или около 5 млн нм³ в год. Электросталеплавильная технология с ТХР позволяет сократить эмиссию парникового газа СО₂ в атмосферу на 9,8% за счет вовлечения части СО₂ с технологическими печными газами в рециклинг.

1. Toulouevski Yu.N., Zinurov Yu.N. Innovation in electric arc furnaces. Scientific basis for selection. Berlin: Springer, 2010. 258 p.
2. Vallomy J. Patent US 6450804, F27D 3/00, 17.09.2002. Techint Spa, Italy.
3. Marcozzi M., Guzzon M. The evolution of preheating and the importance of the hot heel in supersized EAF systems. *MPT International*. 2011. No. 3. P. 82–91.

4. Adachi T., Sellan R. The jumbo size 420 t EAF at Tokyo Steel, Japan. *MPT International*. 2012. No. 2. P. 54–62.
5. Тулуевский Ю.Н., Зинуров И.Ю., Швер В. Г. Новые возможности печей Consteel. *Электromеталлургия*. 2011. № 6. С. 22–27.
6. Atsushi M., Uemura H., Sakaguchi T. Midrex process. *COBELCo technology review*. Issue 29. Dec.2010. P. 50–57.
7. Rue D., Kozlov A., Khinkis M., Kurek H. Thermochemical recuperator for glass melter. 74-th Glass Problems Conference (October 15, 2013).
8. Шрайбер О.А. Використання теплових вторинних енергоресурсів методом термохімічної регенерації. Розрахунок конверсії палива. *Проблеми загальної енергетики*. 2013. № 2(33). С. 39–42.
9. Казанцев Е.И. Промышленные печи. Справочник. Москва: Metallurgy, 1975. 368 с.

Надійшла до редколегії 16.02.2017