

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ КИСЛОРОДНОГО ДУТЯ ДЛЯ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ*)

Проф. Н. А. СЕМЕНЕНКО

Профессор доктор технических наук Николай Александрович Семенов заведует кафедрой газопечной теплоэнергетики Московского ордена Ленина энергетического института. Основное направление последних работ проф. Н. А. Семенова—рационализация топливоборужования и энергетическая модернизация методами и средствами топочно-котельной техники промышленных печей и крупных технологических топливопотребляющих аппаратов. Проф. Семенов имеет 35 печатных работ по различным вопросам топочно-котельной техники. В области энергетики он работает 17 лет.

Основной задачей всей теоретической и прикладной теплотехники является, в конечном итоге, проблема экономии тепловой энергии топлива. Решением именно этой задачи определяется смысл и значение применения на электростанциях пара высоких параметров, бинарных силовых циклов, комбинированной выработки тепла и электроэнергии, всех усовершенствованных силовых агрегатов и парогенераторов.

Необходимо далее констатировать, что если в современной станционной энергетике имеются весьма значительные достижения в топливоборужовании (кпд первичного топливопотребляющего агрегата — парового котла — составляет 80—90%), то в области промышленно-технологического потребления топлива приходится ещё и сейчас считаться с бесполезной потерей не менее 75—80% заключающегося в нём тепла. Подобное положение относится, главным образом, к разного рода плавильным и нагревательным промышленным печам и, в частности, к печам сталеплавильным, имеющим термический кпд всего 10—20%.

Ставя и обсуждая возникающие в связи с этим проблемы энергетической модернизации промышленных печей, приходится в первую очередь говорить именно о печах сталеплавильных. В этих печах наиболее низкие значения термического кпд сочетаются с наиболее крупным теплотреблением как единичным, агрегатным, достигающим до 30—35 · 10⁶ ккал/час, так и суммарным годовым, составляющим — в масштабах нашего предвоенного сталеплавильного производства — около 5 · 10⁶ т условного топлива.

Теплоэнергетическое несовершенство современной пламенной сталеплавильной печи, сохранившей без каких-либо принципиальных изменений схему почти столетней давности Мартена и Сименса, обуславливается, главным образом, ограниченностью теплоутилизационных возможностей воздухоподогрева и органическими конструктивными недостатками реверсивной плавильной камеры и регенеративного воздухоподогревателя. Следует при этом подчеркнуть, что для плавления металла может быть использовано лишь верхушечное тепло высокотемпературного потенциала. Поэтому решающее значение для повышения термического кпд сталеплавильной печи приобретает задача полноценной утилизации тепловых отходов плавильной камеры.

Эту задачу можно решить только путём комбинированного использования выделяемого тепла для одновременной выработки основной технологической продукции (стали) и дополнительной энергетической (пара). Очевидно, что пару энергетического назначения всегда обеспечено практически неограниченное применение.

Нами были подробно исследованы варианты энергетической модернизации нормальной реверсивно-регенеративной мартеновской печи, а также теплотехнические возможности сталеплавильных агрегатов прямоточного типа. Наибольший принципиально технический интерес и народнохозяйственное значение представил при этом вариант прямоточной печи, питаемой обогащённым кислородом воздухом, рассмотрение коего и является содержанием настоящего сообщения.

*) Доклад на заседании Технического совета Главкислорода при СНК СССР 30 мая 1944 г.

Из всех теплопотребляющих производственных процессов, связанных с непосредственным сжиганием топлива, наиболее высокие температуры в рабочей камере требует сталезарение. Температура шлакового слоя металлической ванны доходит к концу плавки до 1650—1700° Ц. Это определяет необходимость получения в плавильном пространстве печи действительных температур продуктов горения не ниже 1800—1900° Ц по условиям достаточно эффективной эмиссии лучистого тепла от факела к металлической ванне.

Задача достижения подобных температур разрешается в нормальных мартеновских печах регенеративным подогревом воздуха или воздуха и низкокалорийного газообразного топлива до 1100—1200° Ц. Регенераторы из огнеупорного кирпича, располагаемые непосредственно за плавильной камерой, не могут обеспечить охлаждения дымовых газов ниже 500—700° Ц, в связи с чем потеря с уходящими в атмосферу газами составляет 35—40% в балансе тепла. Периодическое переключение регенераторов с дымовых газов на нагреваемую среду связано, кроме того, с рядом дополнительных тепловых потерь. Каждая перекидка клапанов влечёт за собой потерю в атмосферу части нагретого воздуха или воздуха и газообразного топлива. Кроме того, имеет место охлаждение плавильного пространства благодаря обратному вытеснению в печь охлаждённых продуктов сгорания из переключаемых регенераторов и усиленному засосу в плавильное пространство холодного воздуха в моменты перекидки клапанов.

Принцип регенеративного подогрева связан также с циклическим снижением температуры нагреваемой среды, достигающим значений $\Delta t = 250\text{—}350^\circ \text{Ц}$. Это создаёт известную неустойчивость температурного состояния плавильной камеры. Реверс пламени в мартеновской печи, работающей на типовом для неё низкокалорийном газе, усложняет конструктивное выполнение наиболее ответственной части — головок, выполняющих попеременно то роль горелок, то каналов, отводящих раскалённые продукты горения.

Сильный разогрев головок в периоды прохождения дымовых газов требует их энергичного водяного охлаждения. Это не только связано с значительной потерей тепла (порядка 1,0—1,2 · 10⁶ ккал/час на одну головку), но и уменьшает температуру плавильного пространства, благодаря снижению темпера-

тур воздуха и газообразного топлива при их прохождении по водоохлаждаемым пролётам головок.

Помимо указанных теплотехнических недостатков регенераторы из огнеупорного кирпича, как теплоутилизационный элемент мартеновской печи, характеризуются весьма значительным объёмом материаловложений. В табл. 1 приведены цифры, характеризующие расход материалов на сооружение регенераторов для типовой 185-тонной мартеновской печи, работающей на смешанном газе теплотворной способностью в 2000 ккал/м³.

Таблица 1

Расход материалов на сооружение регенераторов типовой 185-тонной мартеновской печи

Наименование материала	Объём (в м ³)	Вес (в т)
Динасовый кирпич	600	1110
Шамотовый »	680	1260
Изоляционный »	210	130
Металлоконструкции	—	370

Прямоточная сталеплавильная печь впервые была осуществлена на одном из металлургических заводов Рура только в 1936 г. Несовременный в работе и трудный по выполнению кирпичный регенератор этой печи был заменён металлическим рекуператором. Прямоточный принцип даёт возможность значительно рациональнее решить и общую теплоэнергетическую схему печи размещением рекуператора в конце газового тракта — при температурах отходящих газов в 170—200° Ц — и включением между плавильной камерой и рекуператором высокопроизводительного радиационного парового котла-утилизатора.

Вариант прямоточно-рекуперативной сталеплавильной печи связан, однако, с необходимостью расходовать достаточно большие количества дефицитных жароупорных сталей для выполнения рекуператора. Необходимо также подчеркнуть, что пирометрический уровень процесса сталеварения в прямоточной рекуперативной печи, при осуществимых теперь нагревах воздуха и газа в металлических рекуператорах, не повышается по сравнению с нормальной мартеновской печью. Это определяет ограниченность указанного варианта в отношении технологической производительности и возможности ускорения плавки металла.

При учёте изложенного чрезвычайно большой интерес представляет идея питания прямоточной печи воздухом с повышенной концентрацией кислорода. В этом случае прямоточный сталеплавильный агрегат приобретает следующие существенные производственные и теплотехнические преимущества:

1. Выплавка стали производится в области повышенных температур, лимитируемых лишь качеством и выполнением огнеупорной кладки печи. Это даёт возможность ускорить процесс, во всяком случае в тех начальных его стадиях, для которых характерными являются сниженные температуры металлической ванны и, следовательно, внутренней кладки печи (периоды завалки и прогрева шихты).

2. Резко снижается температура необходимого подогрева воздуха и низкокалорийного газа, что упрощает и удешевляет изготовление рекуператора (меньшая поверхность

печей, в частности, рассматриваемого сейчас варианта прямоточной печи с кислородным питанием, производилось применительно к следующим неизменным условиям работы: садка печи — 185 т, топливо — смешанный газ с теплотворной способностью 2000 ккал/м³. Шихта содержит 75% жидкого чугуна и 25% скрапа. Расход железной руды 15,8%, известняка 10%, выход шлака 18% от веса металлической завалки. Концентрация кислорода в соответствующем варианте прямоточной печи принята, пока условно, равной 40%.

Результативные технико-экономические показатели рассмотренных вариантов, дающие возможность их сопоставления и сравнительной оценки по чисто энергетическим показателям и объёму материаловложений в теплоутилизационную часть установки (регенераторы, рекуператоры, паробразователи), приводятся в табл. 2.

Таблица 2

Основные показатели различных вариантов работы сталеплавильной печи с теплоутилизационным устройством

Исследованные варианты	Пароотдача (в кг на 1 кг стали)	Расход тепла (в ккал/кг стали)		Термический кпд агрегата (в %)			Объём материаловложений в теплоутилизационную установку (в т)			
		Вид.	Действ.	$\eta_{тМ}$	$\eta_{т^0}$	$\Sigma\eta_{т}$	Норм. сталь	Легирован. сталь	Всего ме- талла	Огнеупор- ных и изо- ляционных материалов
Нормальная мартеновская печь	0	1010	1010	11	0	11	370	0	370	2500
Мартеновская печь с хвостовым котлом-утилизатором	0,23	1010	850	11	16	27	445	0	445	2600
Утилизация отходов тепла плавильной камеры и уходящих газов мартена	0,43	1010	710	11	29	40	460	0	460	2650
Прямоточная печь	0,57	1184	794	10,4	33	43,4	218	57	275	210
Прямоточная печь с воздухом, обогащённым кислородом (до 40%)	1,56	1830	750	5,7	55,3	61	235	0	235	200

нагрева, возможность применять нормальную углеродистую сталь).

При некоторой, указываемой далее концентрации кислорода необходимость предварительного подогрева компонентов горения вообще отпадает. Этим в ещё большей степени упрощается вся конструкция печи.

3. За счёт меньшей или нулевой регенерации тепла в плавильную камеру возрастает теплоперепад, приходящийся на долю паробразовательной части установки, т. е. увеличивается выработка дополнительной энергетической продукции.

Исследование возможных вариантов энергетической модернизации сталеплавильных

Как видно из приведённых данных, в кислородном варианте прямоточной печи суммарный термический кпд и выработка энергетического пара достигают наибольших значений. Одновременно резко снижается объём материаловложений в последующую за плавильной камерой теплоутилизационную часть агрегата.

Возможность повышения температурного уровня в камере плавления несомненно будет связана и с сокращением длительности отдельных периодов плавки, т. е. с увеличением часовой производительности печи, что сейчас можно ориентировочно оценить минимум в 10—15%.

Данные, приведённые в табл. 2, позволяют отчётливо представить всё несовершенство теплоиспользования в современных мартеновских печах и оценить открывающиеся в этом направлении энергетические перспективы. Эти перспективы исключительно велики. Достаточно указать, что при выплавке только 25% производимой у нас стали в прямоточных печах с кислородным питанием обеспечивается экономия в год не менее 300 000 т условного топлива или соответствующая выработка дополнительного количества энергетического пара.

Переходим к вопросу определения оптимальной концентрации кислорода и выявлению зависящих от неё теплотехнических показателей прямоточной сталеплавильной печи. В качестве объекта исследования сохраняется указанная выше печь садкой 185 т при следующих постоянных расчётных параметрах:

Коэффициент избытка организованно зводимого воздуха $\alpha = 1,0$, присос неорганизованного воздуха $\Delta\alpha = 0,3$, средняя температура продуктов горения перед теплоутилизационной установкой $t'_r = 1600^\circ\text{C}$, а в конце её $t''_r = 170^\circ\text{C}$, коэффициент избытка воздуха в уходящих газах $\alpha_y = 1,5$.

Для всех рассматриваемых концентраций кислорода (в пределах 21—100%) также неизменным принимается тепло, отдаваемое в плавильной камере. Это тепло определяется следующей сводкой расходов на 1 кг металлической закладки:

Теплосодержание металла	348 ккал/кг
» шлака	102 »
» чугуна садки	200 »
Экзотермические реакции	334 »
Эндотермические реакции	203 »
Полезный расход тепла топлива	$Q_p = 348 + 102 - 200 + 203 - 334 = 119$ ккал/кг.

Потери тепла составят:

С охлаждающей водой	172 ккал/кг
В окружающую среду	64 »
Излучением окон	40 »
С выбиванием газов	70 »

Сумма потерь 346 ккал/кг

Тепло газов из шихты 158 »

Тепло, отдаваемое в плавильной камере:

$$Q_0 = 119 + 346 + 158 = 623 \text{ ккал/кг.}$$

Удельный расход топлива на 1 кг металла z определяется из уравнения теплового баланса плавильной камеры:

$$z(Q_p + Q_{ф.т} + Q_{ф.в} - Q_{п.г}) = Q_0,$$

где Q_p — рабочая теплотворная способность топлива (ккал/кг), $Q_{ф.т}$ и $Q_{ф.в}$ — физическое тепло топлива и воздуха (ккал/кг топлива),

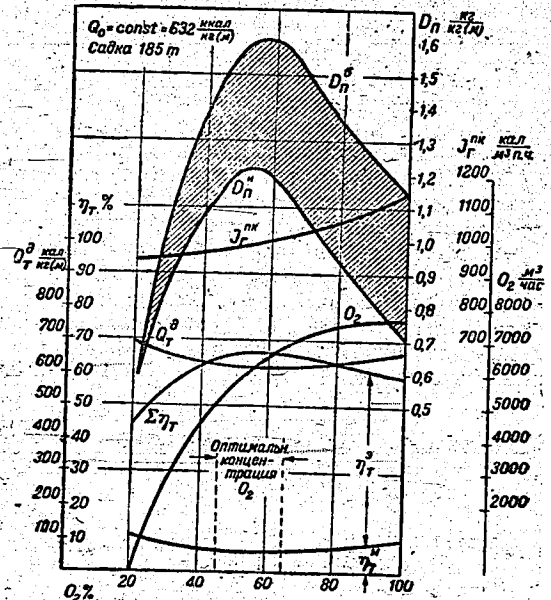


Рис. 1. Теплотехнические параметры прямоточной сталеплавильной печи при переменных концентрациях кислорода.

$Q_{п.г}$ — теплосодержание уходящих из плавильной камеры продуктов горения топлива (ккал/кг).

Таблица 3
Зависимость подогрева дутья и газообразного топлива от концентрации кислорода

	Концентрация кислорода в дутье (в %)				
	21	40	60	80	100
Теплосодержание продуктов горения (в ккал/м³)	946	960	980	1060	1140
Подогрев воздуха и газообразного топлива (в °C)	1100	400	—	—	—

Подогрев воздуха и газообразного топлива при нормальной концентрации кислорода ($O_2 = 21\%$) принят обычный, до 1100°C .

Это определяет удельное теплосодержание продуктов горения в плавильной камере, представляющее её температурный уровень, равным $I_{г.к}^{п.к} = 946$ ккал/м³ продуктов горения.

Теплобалансовое уравнение плавильной камеры даёт возможность оценить необходимую величину подогрева воздуха и топлива

да в пределах 45—65%. При этом выработка пара на 1 кг металла составляет: брутто $D_{п}^б$ приблизительно 1,6 кг, а нетто $D_{п}^н$ (с учётом расхода электроэнергии на получение 100% кислорода в размере 0,3 квт-ч/м³) около 1,2 кг. Кривая O_2 показывает среднеплавочный расход кислорода 100%-ной концентрации на печь с садкой 185 т.

Следует обратить также внимание на заметное повышение при указанных концентрациях кислорода значение параметра $I_{г.к}^{п.к}$, указывающее на возможность сокращения при этом длительности плавки металла по сравнению с печью, работающей с высокотемпературным подогревом нормального воздуха и газообразного топлива.

На рис. 2 схематически показана общая компоновка теплоутилизационной установки прямооточной сталеплавильной печи, работающей на воздухе с оптимальной концентрацией кислорода. В данном случае воздухо- и газоподогреватели из системы печного агрегата полностью выпадают. Непосредственно за плавильной камерой располагается радиационный парогенератор. Далее следует пароперегреватель и кипящий водяной экономайзер.

Парогенератор состоит из 4 кипяtilьных трубных панелей с естественной циркуляцией, экранирующих все поверхности шлаковика, значительно развитого по объёму.

Пароводяные поверхности нагрева котлоагрегата работают со значительно большей интенсивностью тепловосприятия, нежели рекуперативный, а тем более регенеративный воздухо- и газоподогреватель. Благодаря этому общие материалозатраты в теплоутилизационную установку, а также строительные габариты её получаются в данном случае предельно сокращёнными.

Народнохозяйственное значение рассмотренной проблемы радикальной модернизации сталеплавильных печей устанавливается следующими ориентировочными энергетическими показателями, относящимися к типовому металлургическому заводу законченного производственного цикла, оборудованному вместо

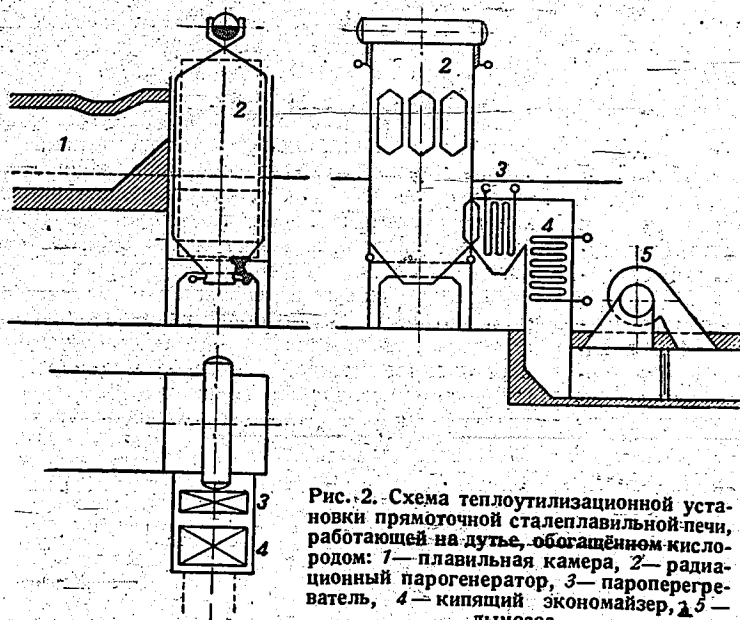


Рис. 2. Схема теплоутилизационной установки прямооточной сталеплавильной печи, работающей на дутье, обогащённом кислородом: 1—плавильная камера, 2—радиационный парогенератор, 3—пароперегреватель, 4—кипящий экономайзер, 5—дымосос.

при различных концентрациях кислорода, ориентируясь при этом на получающееся значение $I_{г.к}^{п.к}$. Чрезмерно резкое повышение последнего параметра может оказаться недопустимым по условиям надёжности работы огнеупорного материала плавильной камеры. Поэтому представляется возможным принять зависимость необходимого и допустимого подогрева воздуха и топлива от переменной концентрации кислорода, приведённую в табл. 3.

Конечные результаты расчётов теплотехнических параметров прямооточной печи в зависимости от концентрации кислорода графически показаны на рис. 1. Максимальное значение суммарного термического кпд агрегата $\Sigma \eta$ и минимальный действительный (с учётом теплосодержания выработанного пара) расход тепла топлива на 1 кг металла $Q^к$ получаются при концентрациях кислоро-

нормальных мартенов новыми прямоточными сталеплавильными печами — парогенераторами с кислородным дутьём. Принятый в качестве примерного объекта завод выпускает в год $1,5 \cdot 10^6$ т проката и работает на кривокожской руде и донецком топливе. Вся сталь выплавляется в пламенных печах с содержанием в шихте 80% жидкого чугуна и 20% скрапа. Годовая производительность сталеплавильного цеха составляет $1,8 \cdot 10^6$ т, что соответствует 12 печам садкой 185—200 т и часовой производительности цеха 250 т.

Основываясь на приведённом выше материале, действительная экономия топлива при замене нормальных мартенов кислородными печами — парогенераторами, может быть в указанных условиях оценена равной $0,48 \cdot 10^6$ ккал, или 0,07 т условного топлива на 1 т выплавленной стали. Это соответствует годовой экономии по сталеплавильному цеху порядка 125 000 т топлива.

Одновременно с этим печи — парогенераторы, вырабатывающие в час 300—400 т пара, практически исключают отдельную котельную со сложным топочно-котельным оборудованием из состава заводского энергохозяйства, строящегося при этом на основе

комбинированного использования тепла технологического топлива.

* * *

Суммируя результаты изложенного, приходим к следующим заключительным выводам.

1. Радикальное решение задачи энергетической модернизации пламенных сталеплавильных печей даёт вариант прямоточной печи — парогенератора, питаемого воздухом, обогащённым кислородом с оптимальной концентрацией последнего порядка 50%.

2. В прямоточной печи — парогенераторе, прогрессивная тенденция комбинированной выработки продукции технологической и энергетической находит наиболее полное и законченное выражение, открывающее широкие перспективы экономии топлива, дефицитных материалов, а также повышения технологической производительности печи.

3. Ближайшим и совершенно необходимым этапом реализации сталеплавильного агрегата нового типа являются сооружение и всестороннее металлургическое и теплоэнергетическое исследования полупромышленного его образца в условиях производственной эксплуатации.

ПРИМЕНЕНИЕ КИСЛОРОДА В МАРТЕНОВСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ*)

Проф. К. Г. ТРУБИН

Целесообразность применения кислорода в мартеновском производстве ясна далеко не во всех случаях практики и часто служит объектом дискуссий. Остановимся на возможных выгодах использования кислорода с точки зрения теплотехники и производительности сталеплавильного агрегата. Отсутствие надлежаще проведённых опытов как в отечественной, так и в зарубежной практике вынуждает ограничиться лишь соображениями самого общего характера. В каких же случаях применение кислорода или обогащённого им воздуха даст бесспорный экономический эффект?

Газ малой теплотворной способности как топливо мартеновских печей

Значительное количество мартеновских печей в СССР работает на газе низкой теплотворной способности (генераторный газ из сырых дров, торфа, из тощего каменного угля). Обогащение кислородом воздуха, потребного для сжигания такого газа, повысит тепловую мощность печей, а следовательно, и их производительность. Это относится преимущественно к заводам малой металлургии и потребует лишь небольших конструктивных изменений металлургических агрегатов.

Применяя кислород на заводах с полным металлургическим циклом, можно будет обеспечить работу мартеновских печей на ко-

*) Сводка на заседании Технического совета Главкислорода при СНК СССР 30 мая 1944 г.