

РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

УДК. 041:66.012.37

В.В. Курносов, Л.А. Шульц

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭНЕРГО-ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПЕЧЕЙ БЕЗОКИСЛИТЕЛЬНОГО НАГРЕВА СТАЛИ ПЕРЕД ОБРАБОТКОЙ ДАВЛЕНИЕМ¹

Отсутствие в настоящее время работающих печей безокислительного нагрева стали перед ее обработкой давлением делает проведение их сравнения с традиционными печами сложной задачей. Однако, даже качественный анализ и сравнение позволяют оценить возможные направления их развития и существенно повлиять на сроки создания и внедрения подобных печей.

Наиболее распространенными печами для нагрева стальных заготовок перед пластической деформацией являются методические – в прокатном и камерные – в кузнечно-штамповочном производстве.

Прежде чем остановится на оценках работы таких печей в режиме возможного «безокислительного нагрева» на базе повсеместно положенного в его основу стадийного горения необходимо подчеркнуть следующее. Предполагалось, что в методических печах с двухстадийным сжиганием вторая стадия горения может быть реализована в методической зоне с температурой металла не выше 600 – 700 °C, в печах камерных – с дожиганием над зоной нагрева с аэродинамическим разделением факельных зон струями вторичного воздуха. Однако, как показала практика, если в камерных печах кузнечно-штамповочных производств выбранное направление технологического решения безокислительного нагрева стали было вполне оправданным, то в отношении методических печей (превращаемых при реконструкции в проходные без методической зоны) – нет.

Как показал опыт эксплуатации реконструированных методических печей, переведенных на так называемый «малоокислительный режим», в лучшем случае удавалось добиться стабильного сокращения окисления стали не более, чем в 1,5 – 2,0 раза. И главная причина такого результата – высокотемпературные зоны с первичным горением топлива при коэффициенте расхода воздуха $n = 0,48 – 0,5$ в условиях двухстадийного сжигания по балансу тепла не могут сопряжено работать с зоной дожигания (методической в обычных условиях нагрева). В этих условиях в методическую зону будет поступать почти на порядок больше химической энергии, чем там может быть реализовано. И это положе-

ние не исправляет ни высокотемпературный подогрев воздуха (1000 °C), ни применение чистого кислорода (98 %). Действительно, коэффициент использования топлива – природного газа в высокотемпературных зонах, даже при таких параметрах окислителя, соответственно составляет около 0,14 и 0,17, т.е. при известных потерях рабочего пространства тепловой КПД названных печей будет близок к нулю.

В целом реконструированные методические печи, как показал многочисленный опыт их эксплуатации в режиме стадийного сжигания природного газа, смогли надежно работать только при первичном сжигании природного газа с n не менее 0,7, что и определило максимальное снижение окисления стали в таких условиях – в 1,5 – 2,0 раза против традиционного нагрева. Причем, для технологических результатов их работы было совершенно безразлично, как поступает недостающий от $n = 0,48 – 0,5$ до $n = 0,7$ воздух – в горелки или неуправляемо подмешивается из зоны дожигания. Резко отражалось это лишь на образовании сажи при первичном горении, затрудняющей обслуживание печей.

Напротив, практически в идеальных условиях по балансу тепла зон стадийного горения оказалась проходная печь стана 2300/1700 ЧМК для безокислительного нагрева и гомогенизирующей выдержки трансформаторной стали [1]. В зоне дожигания газов в этой печи слябы нагревались лишь с 1050 – 1200 до 1400 °C. Высокотемпературная зона выдержки металла с первичным сжиганием топлива с холодным, но обогащенным до 50 – 55 % кислородом воздухом, фактически работала на режиме холостого хода, т.е. с компенсацией только потерь тепла через кладку печи. Ни водоохлаждаемых элементов, ни открывающихся окон в ней не было. Зона гомогенизации – первичного сжигания и зона дожигания по потреблению теплоты были хорошо сбалансираны. Применение же кислорода и практически молекулярное перемешивание газов позволяло в зоне выдержки металла организовать первичное горение холодной смеси газов и устойчиво поддерживать температуру около 1450 °C при $n = 0,48 – 0,5$ без выделения сажи. Причем, для подавления рециркуляции, зоны горения были разделены пережимом и дожигание газов в проходной печи впервые было осуществлено с

¹ Работа выполнена в рамках гранта по постановлению Правительства РФ № 218 от 09.04.2010.

применением аэродинамической завесы, защищающей металл от окисления и обеспечивающей полноту процесса дожигания. Окисление трансформаторной стали в зоне ее перегрева и гомогенизирующей выдержки резко снижалось, и лишь перед выходом слябов из печи они проходили через специальную окислительную зону для стравливания в жидкий шлак поверхностного слоя металла со следами внутреннего окисления кремния, что приводило к снижению итоговых результатов безокислительного нагрева и только из-за этого в целом окисление в печи уменьшалось всего в 6 – 8 раз (с 4,0 – 5,0 до 0,5 – 0,7 %).

Из огромного опыта экспериментальной эксплуатации рассматриваемых печей убедительно следует, что обязательным и общим решением стадийного сжигания топлива и в методических (проходных), и камерных печах с достижением действительно безокислительного нагрева (при котором окисление металла снижается в десять и более раз, независимо от температуры посада металла, температуры подогрева воздуха и применения кислорода) при стадийном режиме горения может быть только открытое дожигание газов без контакта продуктов дожигания с металлом на всем протяжении его нагрева. Тем более, что в современных прокатных цехах металлургических заводов все больше делается ставка на горячий посад металла в нагревательные печи.

Камерная рекуперативная печь, соответствующая такому решению стадийного сжигания топлива, была предложена и описана в работе [2]. Возможные схемы проходных рекуперативных печей, потенциально пригодные для реализации полноценного безокислительного нагрева металла как с горячим, так и холодным посадом, сконструированные по аналогичному принципу, представлены на рис. 1, 2.

Рабочие пространства представленных печей по ходу движения металла поделены на несколько зон, каждая с самостоятельным двухстадийным сжиганием природного газа. Зоны первичного сжигания толкателевой печи (рис. 1) оснащены боковыми горелками, печи с шагающим подом (рис. 2) – плоскофакельными сводовыми горелками. Решение узла дожигания и рекуперации в этих печах заимствовано из работы [2]. К горелкам подводятся предварительно перемешанная смесь газов с температурой около 500 °C. Те же горелки с раздельным подводом газов используются при розжиге печей. Первичное горение осуществляется с обычным или обогащенным до 28,5 % кислорода воздухом. Воздух аэродинамических завес и дожигания используется без обогащения кислородом. Весь воздух, поступающий на горение, подогревается до 550 – 600 °C, газ – до 350 – 400 °C. К конструкциям печей предъявляются повышенные требования по их герметизации. Аспирируемый от печей воздух поступает в качестве окислителя на сжигание топлива. Бункеры под печью с шагающим подом при безокислительном режиме ее эксплуатации для предотвращения взрыва предварительно заполняются кусковым легковесным негорючим материалом. В качестве стен и свода печей используется газоплотная оgneупорная фурнитуровка на основе керамволокна в сочетании с kleевыми композитами и силовыми элементами. Фурнитуровка и горелки крепятся непосредственно к листовому кожуху печи, обеспечивающему ее герметичность.

В настоящей работе проведено сравнение различных показателей традиционных печей и печей безокислительного нагрева стали с двухстадийным сжиганием природного газа при следующих исходных параметрах: на первой стадии сжигание осуществляется с коэффициентом расхода окислителя $n_1 = 0,48 – 0,5$, на второй –

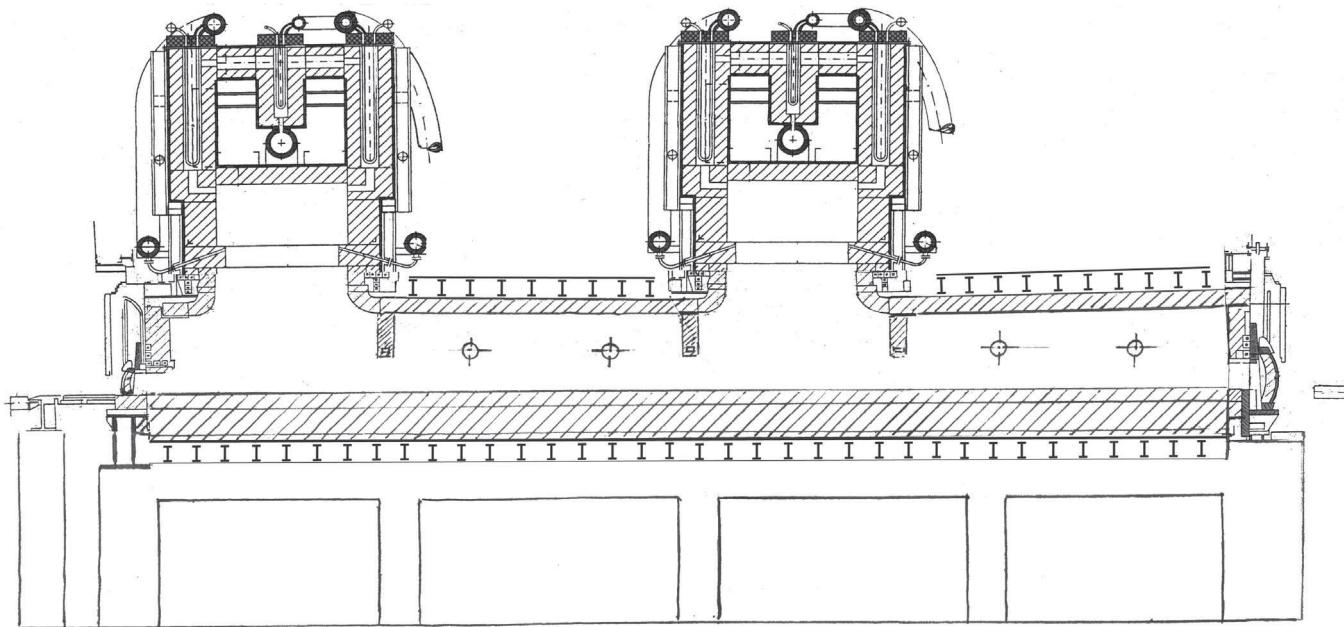


Рис. 1. Толкателевая рекуперативная безокислительная печь

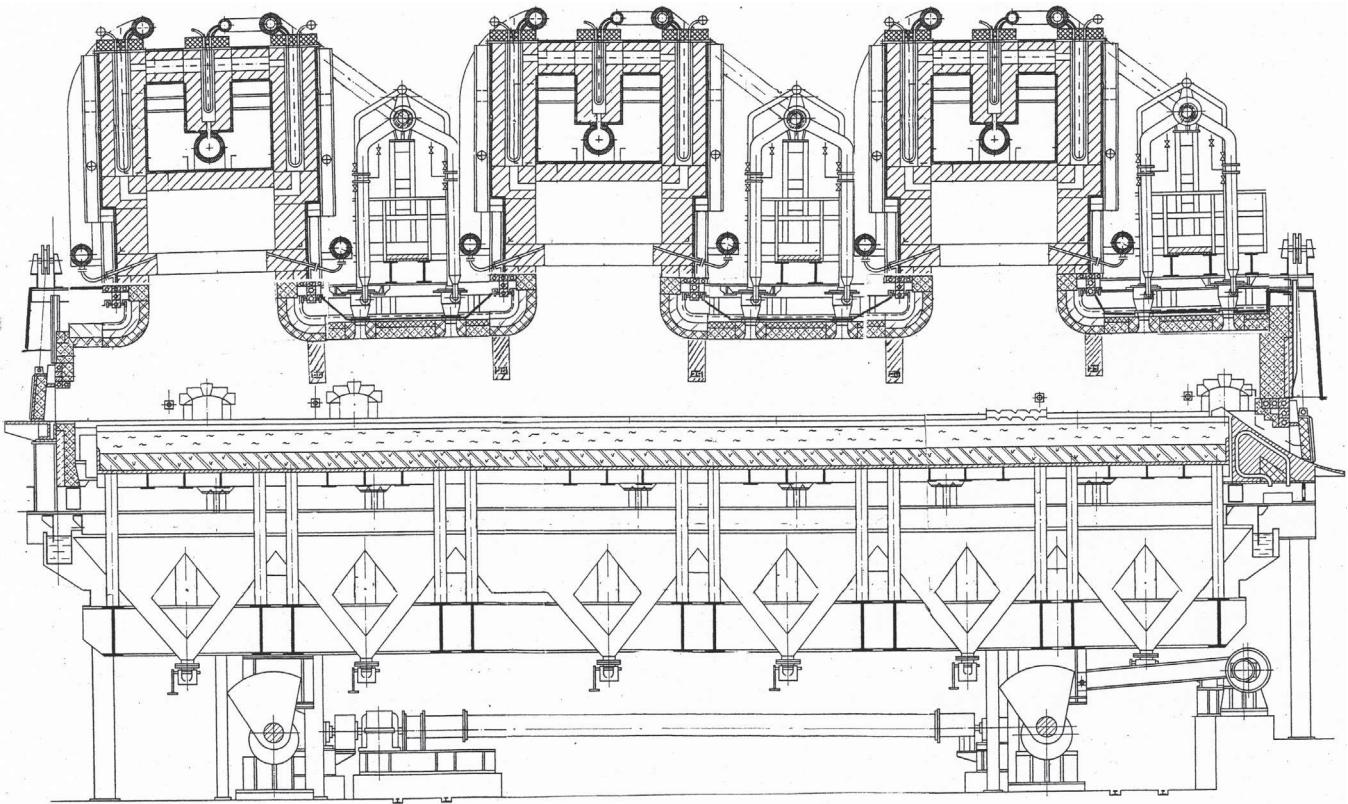


Рис. 2. Нагревательная рекуперативная безокислительная печь с шагающим подом

дожигание с n_2 , на выходе из печи состав продуктов горения должен соответствовать общему $n = 1,1$. В качестве окислителя приняты: обычный воздух, воздух обогащенный кислородом до 28,5 %, до 50 % и кислород 98 %. Кислород чистый или в качестве добавки к воздуху используется без подогрева (условно при 0 °C). В зависимости от содержания кислорода в окислителе при итоговом общем коэффициенте расхода воздуха $n = 1,1$ содержание кислорода в отходящих газах составит 1,7 – 6,2 %. Низшая теплота сгорания природного газа $Q_n^p = 35 \text{ МДж}/\text{м}^3$. Количество образующихся продуктов полного сгорания при $n = 1,1$, в зависимости от содержания кислорода в окислителе R составляет, $\text{м}^3/\text{м}^3$ топлива: 11,18 при $R = 21 \%$; 8,5 при $R = 28,5 \%$; 5,28 при $R = 50 \%$; 3,04 при $R = 98 \%$. При этом количество окислителя, подаваемого в зону дожигания, по отношению к первичным продуктам неполного горения при безокислительном нагреве соответствует $n_2 \sim 1,2$, теплота продуктов дожигания Q_n^p изменяется от 3,4 до 7,4 МДж/м³. Обогащенный кислородом воздух или кислород используются либо только на первой стадии сжигания, либо на обоих стадиях.

В базовом (наиболее распространенном) варианте традиционной работы методической печи с одностадийным сжиганием топлива принятые следующие показатели: состав и расход продуктов полного горения соответствуют использованию обычного необогащенного кислородом воздуха ($R = 21 \%$) при $n = 1,1$, их температура $t_{yx} = 1100 \text{ }^\circ\text{C}$, температура подогрева воз-

духа $t_b = 350 \text{ }^\circ\text{C}$, потери тепла через ограждения рабочего пространства теплопроводностью, с водой охлаждаемых элементов и излучением через окна в долях от химической энергии сжигаемого топлива $\Pi = 25 \%$. Аналогичные показатели в базовом варианте камерной печи: $n = 1,1$, $R = 21 \%$, $t_{yx} = 1280 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_b = 0 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Pi = 15 \%$. В качестве номинального режима работы и в методических, и в камерных печах принят стационарный режим. Причем, если для методических (или проходных) печей такой режим с постоянной рабочей температурой естественен, то для камерных является частным случаем, характерным для наиболее обширного класса кузнецких печей средних размеров. Для разных режимов эксплуатации печей, отличающихся по эффективности использования топлива в базовом варианте работы, величина Π пересчитывалась. Несколько случаев работы печей были проанализированы при минимально возможных потерях рабочего пространства, связанных с потерями только теплопроводностью через кладку (ограждения), которые реально могут быть снижены до $\Pi_{\text{ усл}} = 1 - 3 \%$. Температура уходящих из печи газов, в зависимости от пиromетрии и стадийности горения, в соответствии с результатами обследования печей, принималась: при увеличении температуры подогрева или обогащения воздуха кислородом на 50 – 60 °C ниже базового значения, при стадийном сжигании, наоборот, на 50 – 150 °C выше. В расчетах были использованы справочные материалы, приведенные в работах ОАО «Стальпроект» и др.

Оценка образования термических оксидов азота проводилась по методике МИСиС [3]. Быстрые оксиды азота в сравнительном анализе выбросов (около 100 мг/м³ продуктов горения) не учитывались. При калориметрической температуре горения $T_k \geq 2300$ К в расчетах NO использовалась температура $T_t = 2200 + [100(T_k - 2200)]^{0,5}$, примерно соответствующая теоретической. Температура печи (по показаниям зачехленной термопары) в зоне вторично сжигания (дожигания) во всех случаях принималась $t_n = 1300$ °C, температура поступающих на дожигание газов $t_{д.г.} = 1250$ °C. Методика в разное время отрабатывалась и проверялась на печах с полным и неполным сжиганием природного газа с различным подогревом воздуха и обогащением воздуха кислородом до 50 %. Относительная точность расчетного определения NO составляла 5 – 10 %.

Калориметрические температуры горения и дожигания природного газа в выбранных режимах в зависимости от температуры подогрева воздуха, коэффициента расхода и состава окислителя (смеси воздуха с кислородом) следующие:

Содержание кислорода в окислителе, R %		21,0	28,5	50,0	98,0
Объем кислорода в смеси при $n = 1,1$, м ³ /м ³ топлива		0	0,71	1,57	2,14
Объем воздуха в смеси при $n = 1,1$, м ³ /м ³ топлива		10,18	6,78	2,70	0
Температура горения, °C					
t_b , °C	n	2040	2600	3750	5080
0	1,0	2250	2670	3790	5080
1000	1,0	2780	2950	3950	5080
0	1,1	1880	2530	3650	4800
350	1,1	2100	2610	3700	4800
1000	1,1	2630	2870	3880	4800
Температура горения, °C					
t_b , °C	n_1	1300	1550	1980	2330
0	0,5	1490	1650	2050	2330
675	0,5	1600	1750	2100	2330
1000	0,5	1875	1900	2150	2330
Температура дожигания (окислитель – воздух), °C					
t_b , °C	$t_{д.г.}$, °C	n_2	1890	1930	2000
0	1250	1,2			2200

Тепловой КПД печи и удельный расход топлива B определяли по уравнениям:

$$\begin{aligned} \text{КПД} &= IP \cdot \text{КИТ} / (IP + Q_{\text{п.п.}}) = \text{КИТ} - \Pi = \\ &= \text{КИТ} / (1 + \Pi_{\text{баз}} / \text{КПД}_{\text{баз}}), \quad B = I / (\text{КПД} \cdot Q_{\text{п.п.}}^{\text{p}}), \text{ м}^3/\text{т}, \end{aligned}$$

где I – энтальпия металла, P – производительность печи, КИТ – коэффициент использования топлива, $Q_{\text{п.п.}}$ – потери рабочего пространства теплопроводностью и излучением, $\Pi_{\text{баз}}$ и КПД_{баз} – соответствующие параметры в базовом варианте.

Расход кислорода $B_{O_2} = B 21(R - 21)L_O n / (79R)$, м³/т, где L_O – расход необогащенного кислородом воздуха при $n = 1,0$.

Энтальпию нагретого металла I во всех случаях принимали 850 МДж/т (Ст. 45, температура 1250 °C), тепловыделение при его окислении – 5,65 МДж/кг.

Сравнение вариантов нагрева проведено по следующим удельным эксплуатационным показателям (на 1 т нагретого металла): расходу топлива, расходу кислорода, углу металла, массе выбросов в пересчете на диоксид азота. При обычном нагреве в прокатных печах величину окисления (угара) металла, соответствующую средним практическим данным, в расчетах принимали 1,5 %, в кузнецких печах – 2 %, в условиях так называемого «малоокислительного нагрева» углерод металла принимался по лучшим средним показателям опытной эксплуатации соответствующих печей, достигнутым в России и за рубежом: построенных на базе методических печей – 0,7 %, камерных – 0,2 %, проходных (рис. 1, 2) – 0,1 %. Экономическое сопоставление вариантов работы печей выполнено также только по текущим удельным затратам на природный газ и кислород, стоимости окисленного металла и платежей за выбросы. Изменение качества поверхности металла не учитывали. По этим же и скрытым составляющим были оценены и удельные энергетические затраты на нагрев стали – эксплуатационные технологические топливные числа – ТТЧ, кг ут./т стали. При оценке ТТЧ учтены также скрытые выбросы и затраты первичной энергии, связанные с производством кислорода.

Соответствующие удельные исходные показатели приняты: стоимость топлива – 3 руб/м³; отношение стоимости равных объемов природного газа и кислорода по внутренним ценам России – 0,586, по ценам Западной Европы – 2,78; стоимость электроэнергии 3,1 руб/кВт·ч; стоимость металла (Ст. 45, квадрат) 27 руб/кг; стоимость экологического ущерба 800 руб/прив. т выбросов оксидов азота (в пересчете на NO₂, с учетом коэффициента опасности 25, коэффициента экологической ситуации 1,5), выбросы на кВт·ч в электроэнергетике 0,2 прив. кг. Технологические топливные числа ТТЧ: природный газ – 1,2 кг ут./м³, кислород – 0,24 кг ут./м³, сталь (угар) – 1,4 кг ут./кг, электроэнергия – 0,35 кг ут./кВт·ч, выбросы – 0,27 Мп кг ут./т (Мп – приведенные выбросы, т).

Результаты расчета печей с различным сжиганием топлива, рекуперацией тепла отходящих газов и применением кислорода (М – методические печи, К – камерные, П – проходная по рис. 1, 2) в соответствии с принятыми исходными данными приведены в таблице.

Анализируя приведенный выше материал, можно заключить:

Результаты расчета печей с различным сжиганием топлива

Тип печи, режим	$R, \%$	$t_b, ^\circ\text{C}$	Π	$t_{yx}, ^\circ\text{C}$	КПД	$B, \text{м}^3/\text{т}$	$B_{O_2}, \text{м}^3/\text{т}$	$\text{NO}_2, \text{г}/\text{т}$	Стоимость, руб/т	ТТЧ, кг у.т./т
Печи с одностадийным сжиганием топлива										
M – 1, баз.	21	350	0,250	1100	0,364	66,8	–	286	618	103
M – 2	21	1000	0,378	1050	0,550	44,2	–	330	550	74
M – 3	28,5	350	0,285	1050	0,420	57,9	41,1	384	833/637	105
M – 4	50	350	0,325	1050	0,473	51,4	80,5	470	988/663	105
M – 5	50	350	0,010 _{усл}	1050	0,789	30,8	48,4	280	751/589	71
M – 6	98	–	0,337	1050	0,490	49,6	106,1	н.д.	1100/671	106
K – 1, баз.	21	0	0,150	1280	0,250	97,3	–	290	840	147
K – 2	21	1000	0,316	1220	0,526	46,2	–	333	688	86
Печи с двухстадийным сжиганием топлива										
M – 7*	50/28,5	350	0,285	1150	0,415	58,5	41,5	152	584/417	92
M – 8	98	–	0,332	1100	0,480	50,6	108,2	н.д.	1011/460	122
M – 9	98	–	0,010 _{усл}	1100	0,800	30,4	65,0	н.д.	686/353	65
M – 10	21	1000	0,250	1250	0,369	65,8	–	193	395	91
K – 3**	21	1000	0,074	1220	0,123	198,0	–	693	671	243
K – 4	21	0	0,130	1350	0,213	114,0	–	384	411	142
K – 5***	21	675	0,210	1350	0,346	70,2	–	240	275	89
K – 6***	21	675	0,030 _{усл}	1350	0,524	46,4	–	159	200	61
П – 1	28,5/24	675	0,030	1300	0,569	42,7	13,8	149	247/149	59

* На первой стадии горения $R = 50 \%$, на второй $R = 21 \%$, при общем обогащении воздуха $O_2 R = 28,5 \%$. Вторичный воздух не подогревается.

** Первая стадия горения протекает в рабочем пространстве печи, вторая – в боровах (без подогрева воздуха).

*** Подогревается и первичный, и вторичный воздух.

– Режимы сжигания природного газа с использованием в качестве окислителя чистого кислорода (M – 6, M – 8, M – 9) или неподогретого воздуха (K – 1, K – 4) являются наиболее затратными как по стоимости энергоносителей, так по их эксплуатационному ТТЧ. Значительное влияние на экономичность работы печей, особенно для безокислительного нагрева, оказывает величина тепловых потерь. Во всех режимах использование кислорода, приобретаемого по внутренним ценам России, существенно повышает стоимость нагрева металла, несмотря на экономию топлива.

– Наиболее эффективное и оправданное применение кислорода в нагревательных печах безокислительного нагрева – это обогащение подогретого или холодного воздуха, позволяющее повысить температуру первичного факела при $n = 0,48 – 0,5$ до $1750 – 2000 \text{ }^\circ\text{C}$, при которых обеспечиваются достаточная скорость горения и теплообмена в печи.

– Все представленные варианты камерных печей и П – 1 с двухстадийным сжиганием и использованием аэродинамической завесы между зонами горения из подогретого воздуха по своим энерго-экологическим показателям значительно превосходят принятые для сравнения базовые варианты. Исключением явился лишь

вариант К – 3, отличающийся от других переносом второй стадии горения из рабочего пространства в боров, что может быть вызвано, например, необходимостью выключения воздушной завесы из-за опасности перегрева металла приостоях печи.

Выводы. Никакое повышение температуры воздуха горения и его обогащения кислородом, вплоть до использования чистого кислорода, не позволяют реализовать полноценный безокислительный нагрев стали открытым пламенем, по теплотехническим и экономическим показателям конкурентоспособный обычному традиционному нагреву, без аэродинамического разделения зон внутрипечного стадийного сжигания топлива.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шульц Л.А. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2005. № 5. С. 62 – 69.
2. Курносов В.В., Шульц Л.А. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2012. № 3. С. 35 – 39.
3. Рябова Е.В., Шульц Л.А. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2004. № 9. С. 67 – 70.