

УДК. 041:66.012.37

**В.В. Курносков, Л.А. Шульц**

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

**БЕЗОКСИЛИТЕЛЬНЫЙ НАГРЕВ СТАЛИ В КАМЕРНЫХ ПЕЧАХ  
КУЗНЕЧНО-ШТАМПОВОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА<sup>1</sup>**

Кардинальным и испытанным методом снижения окисления металла вплоть до достижения его практически безокислительной термической обработки в подавляющем большинстве случаев является применение контролируемых атмосфер, обладающих определенным окислительно-восстановительным потенциалом.

В условиях различной термической обработки стали с применением контролируемых атмосфер, помимо защиты от окисления собственно железа, традиционно возникают вопросы защиты от внутреннего окисления легирующих элементов, предупреждения обезуглероживания или восстановления углерода в поверхностном слое, решение которых является значительно более сложной задачей.

При относительно высокотемпературном нагреве стали (до 1250 – 1300 °С) перед обработкой давлением в кузнечных и прокатных печах основная цель применения контролируемых атмосфер – предотвращение окисления собственно железа. Окисление стали в таких печах приводит к потерям металла, к ухудшению поверхности проката, штампованных изделий, дополнительному износу валков и штампов.

В соответствии с термодинамическими предпосылками под безокислительным нагревом стали в условиях двухстадийного сжигания природного газа будем понимать в этой работе ее высокотемпературный нагрев в равновесных продуктах неполного сгорания, состав которых соответствует коэффициенту расхода воздуха  $n = 0,48 - 0,5$ . При таких значениях  $n$  железо при температуре более 600 °С не окисляется.

При безокислительном нагреве стали с учетом ее возможного низкотемпературного окисления в печи и окисления на воздухе, как устанавливается многолетней практикой работы термических печей с контролируемой атмосферой, а также опыта соответствующих печей для нагрева перед обработкой давлением, угар металла не превышает 0,1 кг/м<sup>2</sup> (~ 0,01 мм).

Необходимо подчеркнуть, что по термодинамическим и теплотехническим показателям достижение эффективного безокислительного нагрева стали при стадийном сжигании топлива возможно практически только в условиях аэродинамического отделения нагре-

ваемого металла от продуктов вторичного сжигания. Доля использованной химической энергии природного газа при  $n = 0,5$  составляет всего около 35 %. В зависимости от коэффициента расхода воздуха и температуры подогрева воздуха калориметрическая температура продуктов одностадийного горения:

$t_b, ^\circ\text{C}$	Коэффициент расхода воздуха						
	0,4	0,5	0,6	1,0	1,1	1,2	1,4
0	1020	1320	1510	<b>2040</b>	<b>1920</b>	<b>1760</b>	1550
600	1330	1520	<b>1750</b>	<b>2420</b>	<b>2340</b>	<b>2180</b>	<b>2000</b>
1000	1500	<b>1750</b>	<b>2150</b>	<b>2700</b>	<b>2570</b>	<b>2450</b>	<b>2300</b>
1400	<b>1730</b>	<b>2100</b>	<b>2300</b>	–	–	–	–

Выделенные значения калориметрических температур соответствуют условиям работы, при которых могут быть достигнуты традиционные скорости нагрева металла в печах кузнечно-штамповочного или прокатного производств.

Испытания и эксплуатация различных печей малоокислительного нагрева, проведенные в период массового развития таких печей в 1945 – 1965 гг., в целом лишь частично подтвердили возможность практической эффективной реализации постадийного горения природного газа. К основным недостаткам, сдержавшим развитие таких печей, особенностям их работы и конструкций можно отнести:

- в подавляющем большинстве случаев окисление стали снижалось по сравнению с нагревом в обычных печах не более, чем в 1,5 – 2,0 раза, а чаще изменялось на уровне точности эксперимента;
- недостаточная надежность применяемых методов управления режимом горения, образование при неудовлетворительном снижении окисления плохо отстающей при гидросбиве от металла окарины (при прокатке), большое выделение дисперсного углерода, затрудняющего (а часто и исключаящее) обслуживание печей и загрязняющего атмосферу цеха, а в ряде случаев даже ухудшающего теплопередачу;
- значительное недоиспользование тепла и, в связи с этим, увеличение расхода топлива, сложности в достижении высоких температур;
- ненадежность работы отдельных узлов (рекуператоров, промежуточных сводов, завес на окнах,

<sup>1</sup> Работа выполнена по гранту (2010 – 2012 г.) «Создание сквозной энергосберегающей технологии термообработки ответственных изделий атомной энергетики на основе энергоэффективного оборудования», в соответствии с постановлением Правительства РФ № 28 от 09.04.2010 г.

устройств для разделения рабочего пространства и т.д.).

Опыт создания и эксплуатации печей малоокислительного нерекуперативного нагрева в России, накопленный в последующие 1960 – 1985 гг., полученный на печах со стадийным сжиганием прокатного и кузнечно-штамповочного производств, подтвердил основные направления дальнейшего совершенствования конструкции и режимов работы таких печей, прежде всего связанные с улучшением смешения топлива с окислителем через организацию их предварительного смешения, выбором газодинамических параметров режимов сжигания топлива и совершенствованием механики газов в различных зонах.

В частности, например, на этих печах были достигнуты следующие положительные результаты:

- на нерекуперативной толкательной печи стана 2300/1700 Челябинского металлургического комбината (ЧМК) производительностью 60 т/ч [1], располагающей специальной системой подготовки смеси природного газа с воздухом и кислородом, позволяющей достичь практически молекулярного смешения газов и сжигать топливо без образования сажи вплоть до коэффициента расхода окислителя  $n = 0,48 - 0,5$ , при котором высокотемпературное (более 600 °С) окисление железа стали полностью исключается;
- на трех камерных нерекуперативных печах Ступинского металлургического комбината (СМК) [2] для радиационного нагрева относительно небольших заготовок (средней массой около 50 кг каждая, равномерно распределенных на поду) перед штамповкой и ковкой производительностью от 1,0 до 6,0 т/ч, имеющих специальные циклонные системы предварительного смешения природного газа с воздухом и нетрадиционную для таких печей динамику газов, также достигнуто первичное сжигание топлива без выделения сажи вплоть до снижения  $n = 0,48 - 0,5$ ;
- общее снижение окисления стали в печи ЧМК, находящейся при температуре 1200 – 1400 °С, достигало шести-восьмикратного, а в зоне первичного сжигания гомогенизирующей почти часовой выдержки при 1400 °С окисление железа практически полностью подавлялось (наблюдалось лишь приповерхностное внутреннее окисление кремния);
- в камерных печах СМК, в зависимости от сужения – диафрагмирования в месте установки сопел для ввода вторичного воздуха и организации аэродинамического разделения друг над другом расположенных зон первичного сжигания и дожигания топлива, окисление снижалось от пяти-восьмикратного до полного подавления (окисление практически на обнару-

живалось при выдержке заготовок с температурой 1180 – 1240 °С в течение 6 – 8 ч в печи с коэффициентом сужения между зонами сжигания  $\beta = 61$  %).

Остановимся на нерекуперативных печах СМК с аэродинамическим разделением рабочего пространства. В соответствии с различными исследованиями, в зависимости от стесненности струи, разрежение в устье горелки достигает 0,35 – 7,0 % начального скоростного давления струи. По многим данным, в зонах действия факелов печных горелок разрежение может достигать 1,0 % начального кинетического импульса струи газов.

Естественно, чтобы исключить вынужденный поток газов из зоны дожигания в зону первичного горения необходимо, чтобы сопротивление их движению было больше создаваемого разрежения струями первичной газозвушной смеси. При статическом разрежении в корне струй 1 % от начального импульса это условие выполнимо в случае

$$W_2 \geq 0,15 W_1 (\mu_b / \mu_o) (\rho_1 / \rho_2)^{0,5},$$

где  $W_1$  и  $W_2$ ,  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – соответственно скорость и плотность контролируемой атмосферы (первичной газозвушной смеси или продуктов ее сгорания) на входе в печь и в сужении между камерами;  $\mu_o$  и  $\mu_b$  – коэффициенты расхода через недросселированное и дросселированное струями вторичного воздуха сечение между зонами (отношение  $\mu_o / \mu_b$  изменяется в пределах 3 – 5).

Для организации полного дожигания контролируемой атмосферы и создания разделительной атмосферы по высоте печи глубина проникновения вторичного воздуха  $x$ , подаваемого через два встречных ряда сопел, должна быть не менее полуширины камеры в месте установки сопел ( $x = B/2$ ). Пренебрегая действием архимедовых сил, скорость ряда воздушных струй, удовлетворяющая поставленным условиям проникновения их в поток контролируемой атмосферы и учитывая опытные коэффициенты, составит

$$W_3 = 0,33 W_2 B (\rho_2 / \rho_3)^{0,5} / d_3,$$

где  $d_3$  – диаметр сопла завесы (для плоского сопла  $d_3 = 2\delta$ );  $\rho_3$  и  $W_3$  – плотность и скорость воздуха на выходе из воздушных сопел.

Или, учитывая приведенное выше уравнение для  $W_2$ , можно оценить

$$W_3 \geq 0,0125 W_1 B (\rho_2 / \rho_3)^{0,5} / d_3.$$

Таким образом, используя приведенные соотношения, например, при  $B = 2$  м,  $\rho_1 = \rho_2 = 0,2$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_3 = 1,3$  кг/м<sup>3</sup>, расходе природного газа 100 м<sup>3</sup>/ч,  $d_3 = 0,03$  м и установке двух противоположно направленных горелок ГНП-5А для ввода в печь первичной горячей смеси при  $n = 0,5$  и  $W_1 = 50$  м/с, получим:  $W_2 \geq 1,9$  м/с,  $W_3 \geq 16,3$  м/с. Од-

нако выполнить условие  $W_2 \geq 1,9$  м/с возможно только при значительном сужении сечения рабочего пространства в плоскости установки воздушных сопел. Например, при квадратной форме площади сечения рабочего пространства в плоскости установки сопел скорость  $W_2 \geq 1,9$  м/с можно получить только при коэффициенте ее сужения (диафрагмирования)  $\beta = 90$  %, т.е. проем между соплами в этом случае должен быть почти перекрыт, что резко ограничит передачу тепла продуктов дожигания в зону нагрева металла излучением и сделает режим двухстадийного открытого сжигания практически неосуществимым.

Таким образом, если скорость  $W_1$  имеет очень низкое значение, например, 1 – 3 м/с, то коэффициент сужения (диафрагмирования) может быть уменьшен практически до нуля, т.е. при газодинамическом разделении атмосферы печи струями вторичного воздуха, симметрично направленными под углом  $\leq 75^\circ$  к потоку контролируемой атмосферы, основное влияние на эффективность разделения оказывает скорость ввода равномерно распределенных струй контролируемой атмосферы. Практически не лимитируется при этом и выбор скорости  $W_3$ . Воздушные сопла в этом случае рассчитываются в соответствии с их заданным равномерным распределением и заданной скоростью, например, с шагом 100 мм при скорости 10 м/с. Именно такой принцип газодинамического разделения, характеризующий очень низкой скоростью ввода смеси, и был положен в основу выбора конструкции камерных печей кузнечно-штамповочного цеха СМК. Одновременно при этом естественным образом решались и вопросы повышения равномерности нагрева заготовок на поду печи.

При относительно небольших скоростях принудительного движения газов внутри рабочего пространства печи определенное значение приобретает действие объемных гравитационных сил. Так, например, по оценочным расчетам максимальная скорость пристенного потока свободной конвекции из зоны дожигания в зону нагрева металла (при верхнем расположении зоны дожигания) у вертикальной стены с температурой на  $100^\circ\text{C}$  меньше, чем температура газов в печи, достигает 0,45 м/с. При этом толщина пограничного слоя составляет 95 – 100 мм. Устройство на стенах выступа (сужения между зонами), хотя бы на толщину пограничного слоя, может заметно уменьшить пристенный переток газов. Действие объемных гравитационных сил на движение газов должно в большей степени проявляться при нагреве крупных высоких заготовок, особенно, если они располагаются вблизи стен печи, а также на холостом ходу печи.

С учетом предполагаемой динамики газов в кузнечной печи с вертикальным расположением зон горения, как уже отмечалось, были разработаны и построены на СМК три печи. Режимы сжигания газов на них испытывали как с центральными распределителями вторичного воздуха, так и без них. Коэффициент диафрагмирования газового потока составлял 7, 38 и 61 %. Для ввода вторичного воздуха применяли щелевые и круглые сопла. Конструкция первой из них с центральным распределителем воздуха ( $\beta = 61$  %) и полученные на ней результаты исследований представлены на рис. 1 – 6. Вторая и третья печи от первой принципиально не отличались (третья печь была двухкамерной).

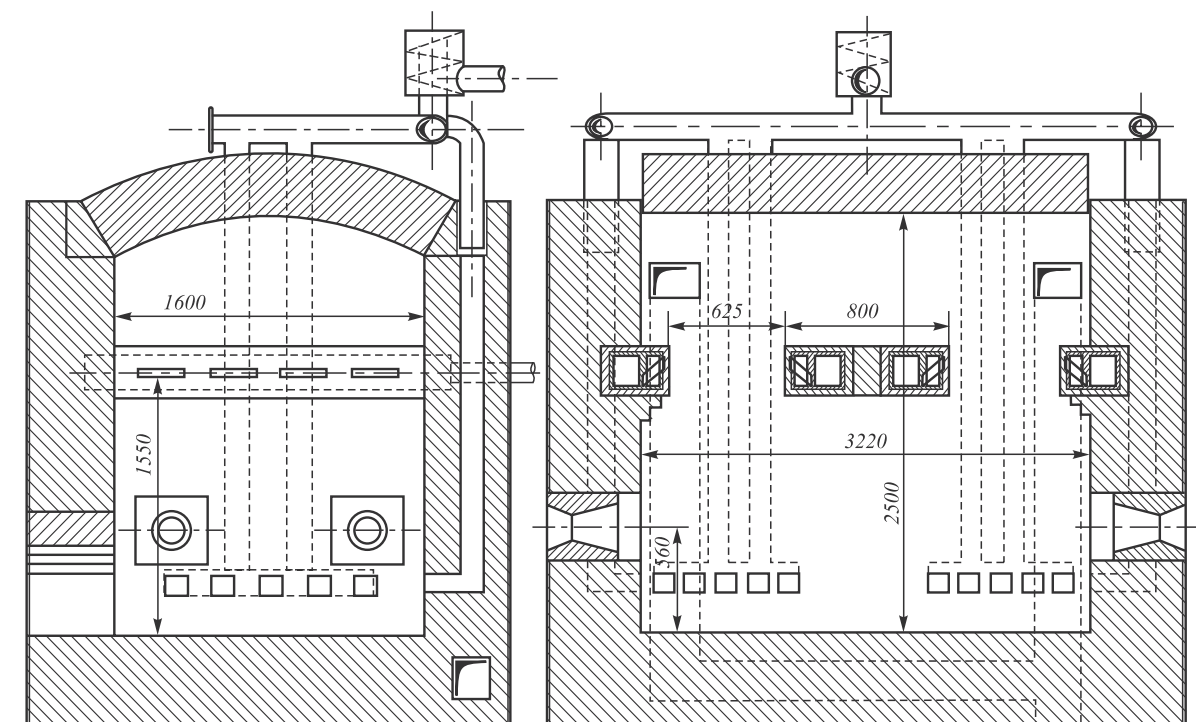


Рис. 1. Схема камерной печи безокислительного нагрева СМК

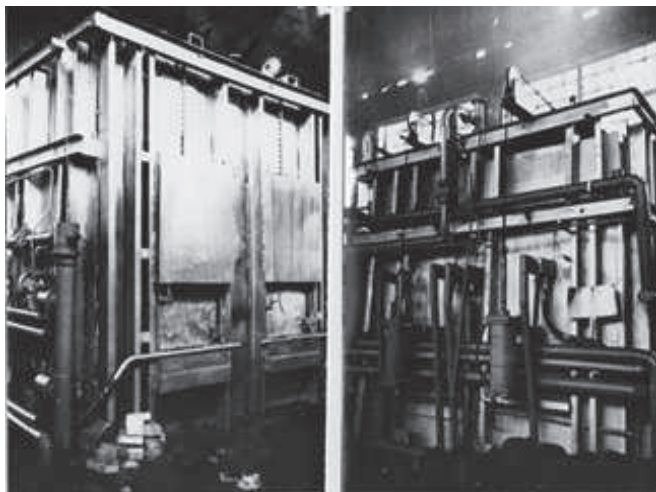


Рис. 2. Вид на камерную печь безокислительного нагрева СМК

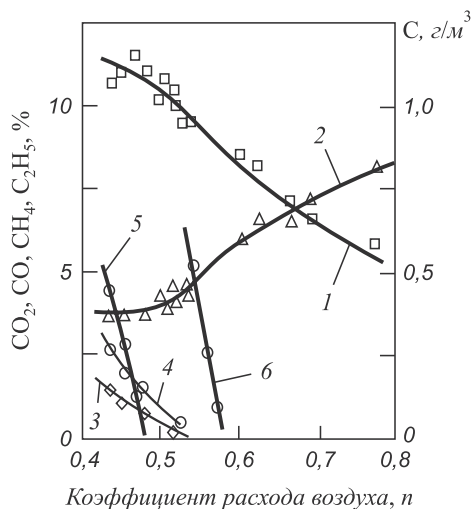


Рис. 3. Концентрация углеродсодержащих компонентов в зоне нагрева металла при 1200 °С:  
1 – CO<sub>2</sub>; 2 – CO; 3 – CH<sub>4</sub>; 4 – C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>; 5 – сажа при работе с циклонным смесителем; 6 – сажа при работе с горелками ГНП-5

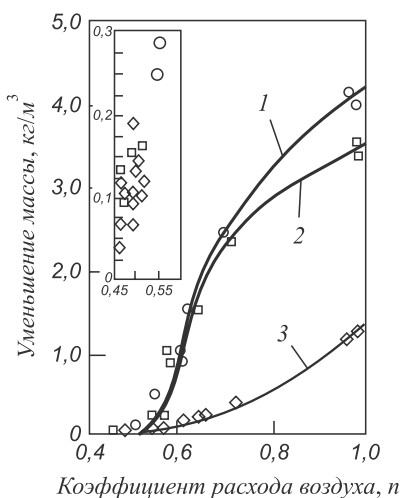


Рис. 4. Окисление стали за 1 ч нагрева и выдержки при 1200 °С:  
1 – 30ХГСА; 2 – ст. 45; 3 – X18H9T. После нагрева образцы охлаждали в воде и очищали от окалины на пескоструйной установке

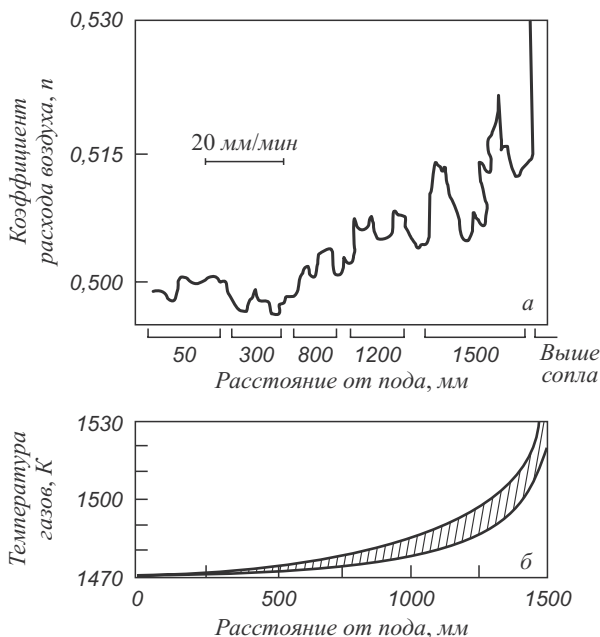


Рис. 5. Изменение коэффициента расхода воздуха (а) и температуры газов (б) по высоте зоны нагрева металла. Расход газа 80 м<sup>3</sup>/ч

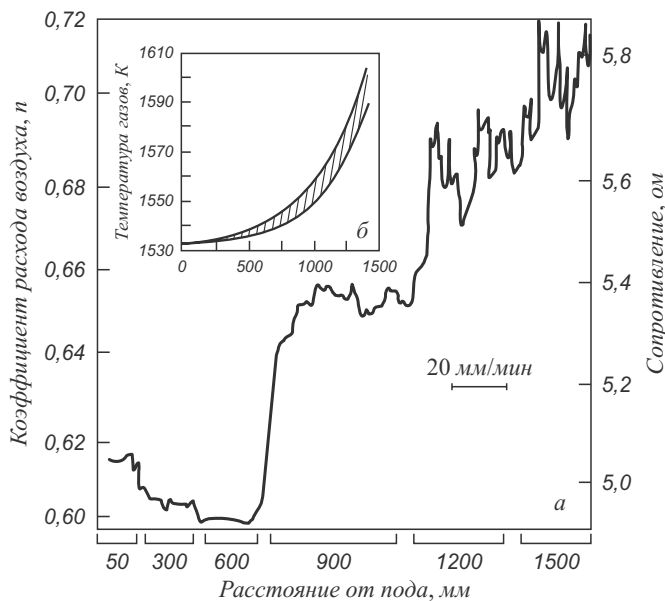


Рис. 6. Изменение коэффициента расхода воздуха, сопротивления датчика из TiO<sub>2</sub> (а) и температуры газов (б) по высоте зоны нагрева металла при работе с горелками ГНП-5А и сохранении завесы из воздушных струй. Расход газа 110 м<sup>3</sup>/ч

Основные элементы печи приведены на рис. 1 и 2. Над печью располагается циклонный домшуватель поступающей в него смеси ( $n = 0,48 - 0,5$ ) природного газа с воздухом, далее смесь направляется в распределительные стальные трубы, в холодной части которых для предупреждения проскака пламени установлены огнепреградители, выполненные в виде дисков из алюминиевой ленты с рифами. По трубам смесь после огнепреградителей распределялась по каналам сечением 115×140 мм в кладке стен печи. Смесь в каналы



поступала только после прогрева печи и достижения в каналах температуры не менее 950 °С. Горение смеси завершалось в каналах, а в зону нагрева металла поступали уже продукты первичного горения. Видимая плотность тепловыделения в каналах достигала 2,0 МВт/м<sup>3</sup>. Из зоны нагрева металла газы поднимались к распределителям вторичного воздуха с плоскими или круглыми соплами. Система струй вторичного воздуха одновременно выполняла роль аэродинамической завесы между зонами. Максимальная объемная плотность тепловыделения в зоне дожигания над соплами составляла 0,2 МВт/м<sup>3</sup>, плотность тепловыделения в сечении между соплами 0,5 МВт/м<sup>2</sup>.

Важнейшие результаты испытаний и эксплуатации этих печей (длительность около трех лет):

- неравномерность распределения температуры нагретого металла на поду печей не превышала 5 – 8 °С (по нормам – не более 10 °С);
- при нормальном режиме работы на второй и третьей печах толщина окисленного слоя металла не превышала 0,01 мм, на первой печи окисление металла практически не обнаруживалось (даже в случае имевших место простоя в течение 6 – 8 ч);
- несмотря на диафрагмирование потока газов до 61 % температура отходящих газов из печи по сравнению с вариантами с диафрагмированием  $\beta = 7$  и 38 % повысилась не более чем на 50 °С (оставалась на уровне 1300 – 1350 °С), что подтверждало относительную стабильность радиационного теплопереноса в рабочем пространстве рассматриваемой печи при  $\beta < 60$  %;
- в условиях принятой на печах СМК (и описанной выше печи ЧМК) технологии смешения компонентов первичного горения начало выделения сажи при снижении  $n$  точно соответствовало  $n = 0,48 - 0,5$  (появление марева обнаруживалось при концентрации сажи 0,01 – 0,05 г/м<sup>3</sup>), что служило надежным визуализированным признаком соответствующего качества атмосферы в зоне нагрева металла и может быть использовано в автоматизированных системах управления процессом безокислительного нагрева стали;
- в отходящих из печи газах химический недожог топлива практически не обнаруживался ( $CO < 50$  мг/м<sup>3</sup>) при  $n \geq 1,1$ , что подтверждало удовлетворительное смешение компонентов и на завершающей второй стадии горения;
- с уменьшением производительности печи, особенно на простоях, и уменьшением расхода газов заброс продуктов дожигания в зону нагрева металла увеличивался (видимо пристенный, свободной конвекцией), что в большей степени обнаруживалось на печах с меньшим пережати-

ем потока ( $\beta = 7$  и 38 %) и меньшими настенными выступами;

- переход с низкоскоростного (почти ламинарного) ввода продуктов неполного сгорания на их факельный ввод от четырех горелок ГНП-5А при сохранении струйного равномерно распределенного ввода вторичного воздуха приводил к образованию сажи и значительному самопроизвольному повышению коэффициента расхода воздуха в нижней зоне (с 0,5 до 0,65) и окислению металла (30ХГСА с 0,1 до 1,0 – 1,5 кг/м<sup>2</sup>). При одновременном же одноструйном вводе вторичного воздуха в зону расположения завесы практически исключался и малоокислительный нагрев заготовок, увеличивалась неравномерность распределения коэффициента расхода воздуха и температуры в зонах, обнаруживался (даже при избытке воздуха  $n > 1,4$ ) химический недожог и повышался расход топлива;
- подтверждена безусловная необходимость установки на загрузочном окне печи герметично прилегающей дверцы и аэродинамической завесы, включающейся при загрузке или выгрузке металла, и вытяжной аспирационной системы от него.

В заключение необходимо подчеркнуть, что общее современное требование к повышению энергетической эффективности работы всего парка печей, прежде всего реализуемое через развитие высокотемпературных рекуперационных процессов, применение современных систем автоматического управления, новых огнеупорных и теплоизоляционных волокнистых материалов, не в меньшей, а скорее в большей мере можно отнести и к печам безокислительного нагрева металла. Применительно к таким печам особо следует отметить и важность организационной стороны их работы. Безусловно, работа таких печей с простоями или сильно заниженной производительностью приведут к нарушению динамики газов, что резко отрицательно скажется на эффективности их эксплуатации.

**Выводы.** Рассредоточенный низкоскоростной ввод первичных газов и аэродинамическое разделение зон стадийного горения встречно направленными струями вторичного воздуха является гарантией создания камерных кузнечных печей безокислительного нагрева с высокими энергетическими показателями их работы.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шульц Л.А. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2005. № 10. С. 62 – 69.
2. Боровиков Е.А., Шульц Л.А., Лебедев Н.Н. Технология легких сплавов. 1977. № 12. С. 65 – 68.

© 2012 г. В.В. Курносов, Л.А. Шульц  
Поступила 3 октября 2011 г.