

технологических параметрах дутьевого режима и по сопоставлению с величиной выхода колошниковога газа на 1 м² сечения колошника, ограниченной установленным диапазоном допустимых ее значений.

На основе предложенного метода выполнена оценка ровности хода доменной печи № 9 в исследуемые периоды ее работы по показателям стабильности опускания шихты по сечению колошника, показавшая, что в период работы печи, характеризующийся наименьшими значениями коэффициентов нестабильности опускания шихты $K_k = 0,20$ ед., были достигнуты согласованные параметры дутьевого режима печи и давления газа под колошником, обеспечивающие близкий к рациональному газодинамический режим плавки, что сопровождалось уменьшением расхода кокса на выплавку чугуна.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Металлургия чугуна: Учеб. для вузов. 3-е изд. перераб. и доп. / Под ред. Ю.С. Юсфина. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 774 с.
2. Жеребин Б.Н. Практика ведения доменной печи. – М.: Металлургия, 1980. – 248 с.
3. Пыжов В.Т. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1984. № 4. С. 5 – 9.
4. Готлиб А.Д. Доменный процесс. – Гостехиздат УССР, 1958. – 165 с.
5. Шулико С.Т., Воронин Г.Ю., Бузоверя М.Т., Хомяков Э.С. // Металл и литье Украины. 1994. № 9 – 10. С. 6 – 8.
6. Большаков В.И., Муравьева И.Г., Семенов Ю.С., Шулико С.Т. Анализ результатов исследований скоростей опускания шихты в доменных печах. // Сб. научн. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». 2006. Вып. 12. С. 109 – 117.
7. Пат. 93975 С2 UA. Способ ведения доменной плавки / Большаков В.И., Шулико С.Т., Муравьева И.Г. // Бюл. изобретений. 2011. № 6.
8. А.с. 827545 СССР. Способ ведения доменной плавки / Некрасов З.И., Бузоверя М.Т., Хомич И.Т. // Бюл. изобретений. 1981. № 17.
9. Бузоверя М.Т., Шулико С.Т., Попов В.Н. Влияние повышенного давления колошниковога газа на работу горна доменной печи объемом 5000 м³. Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Вып. 5. – К.: Наукова думка, 1986. С. 36 – 39.
10. Бузоверя М.Т., Ульянов А.Г., Почекайло Н.Е. и др. Бюл. ин-та «Черметинформация». Черная металлургия. 1995. № 12. С. 47 – 48.
11. Товаровский И.Г. Доменная плавка. 2-е изд. – Днепропетровск: Пороги, 2009. – 768 с.
12. Бочка В.В., Иващенко В.П., Ковшов В.Н. и др. Некоторые особенности работы доменной печи при повышении интенсивности плавки. // Новини науки Придніпров'я, збірка наукових доповідей до науково-практичної конференції, присвяченої 100-річчю Г. А. Воловика, 2010. С. 50 – 53.
13. Бочка В.В. // Сталь. 1999. № 3. С. 4 – 7.
14. Рамм А.Н. О влиянии интенсивности плавки на производительность доменных печей и относительный расход кокса // Сб. Исследование доменного процесса. – М.: Изд. АН СССР, 1957. С. 85 – 87.

© 2012 г. И.Г. Муравьева, В.И. Большаков,
Ю.С. Семенов, Е.И. Шумельчик
Поступила 12 декабря 2011 г.

УДК. 041:66.012.37

В.В. Курносков, Л.А. Шульц

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

КАМЕРНАЯ РЕКУПЕРАТИВНАЯ ПЕЧЬ С АЭРОДИНАМИЧЕСКИМ РАЗДЕЛЕНИЕМ РАБОЧЕГО ПРОСТРАНСТВА ДЛЯ БЕЗОКИСЛИТЕЛЬНОГО ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО НАГРЕВА СТАЛИ В КУЗНЕЧНО-ШТАМПОВОЧНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Безоокислительный нагрев стали открытым пламенем, в случае применения в качестве топлива природного газа, до температуры обработки ее давлением предполагает нагрев металла в продуктах неполного горения при коэффициенте расхода воздуха n не выше 0,5. Доля выделенной химической энергии природного газа при коэффициенте расхода необогащенного кислородом воздуха $n = 0,48 – 0,5$ в равновесных условиях составляет всего около 35 %, а калориметрическая температура – 1300 °С. Естественно, приблизиться как по энергоэффективности, так и по скорости и температуре

нагрева металла к печам с обычным полным сжиганием топлива в таких условиях возможно только в случае стадийного сжигания топлива в них с аэродинамическим разделением рабочего пространства, т.е. открытым для нагрева металла излучением пламени не только первичного, но вторичного сжигания (дожигания) топлива [1]. Если же иметь в виду рекуперативные традиционные печи, достичь сравнимых с ними результатов по интенсивности и экономичности нагрева в условиях безоокислительного нагрева в печах с аэродинамическим разделением возможно только при равнозначном с обычным нагревом использовании тепла отходящих газов.

Учитывая известные трудности при температуре подогрева газов выше 600 °С [2], связанные либо со стойкостью металлических рекуператоров, либо со сложностью работы с регенераторами, либо с образованием

¹ 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 № 218 от 09.04.2010 г.

сажи, остановимся на оценке возможной конструкции и показателях работы рекуперативной безокислительной печи с температурой подогрева воздуха не более 550 – 600 °С и газа до 350 – 400 °С. Как показала практика работы рекуперативных печей, серьезных проблем с таким подогревом газов обычно не возникает.

В печах безокислительного нагрева с аэродинамическим разделением рабочего пространства целесообразен подогрев как первичного, так и вторичного воздуха. Подогрев вторичного воздуха в условиях работы таких печей существенно раздвигает его потенциальные возможности для использования в качестве завесы между зонами первичного и вторичного горения, увеличивает коэффициент использования топлива (КИТ) и тепловой КПД печи, приближая печи безокислительного нагрева по эффективности использования топлива к обычным печам с аналогичным подогревом газов.

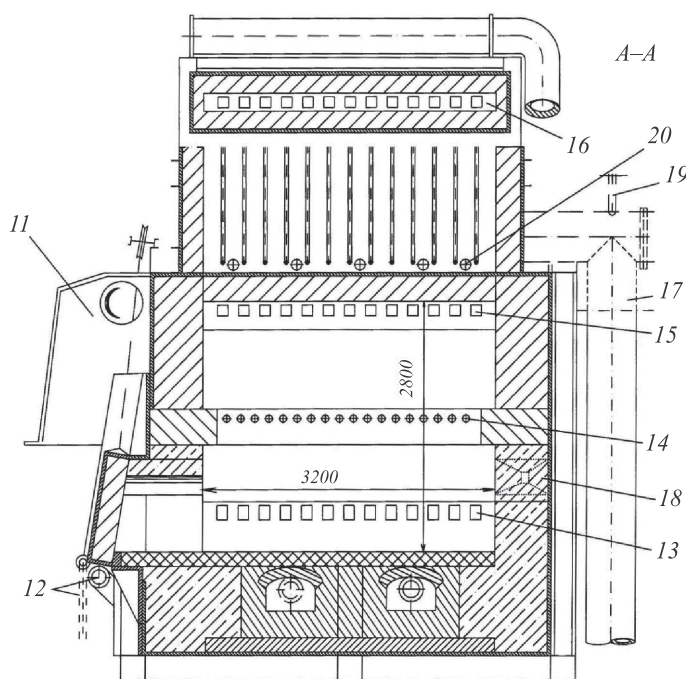
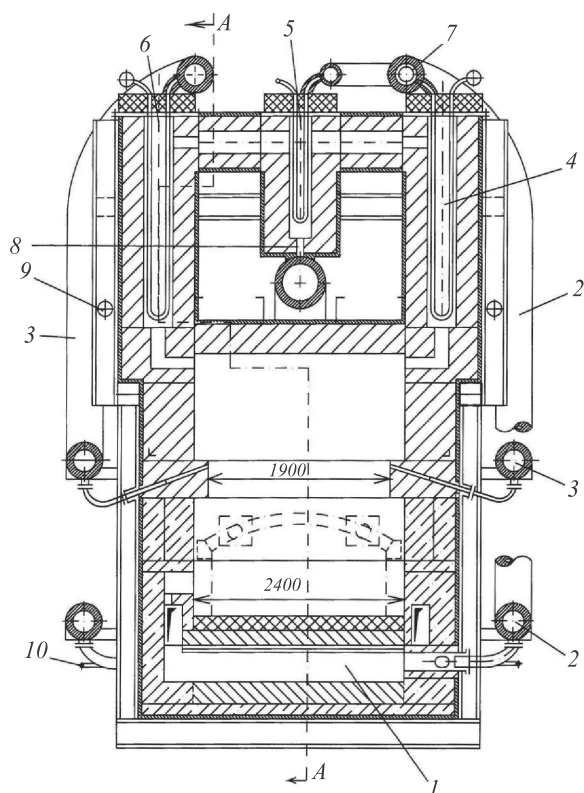
При подогреве первичного воздуха до 600 °С и сжигании природного газа с коэффициентом расхода воздуха 0,48 – 0,5, калориметрическая температура горения составит почти 1500 °С, при подогреве воздуха

до 550 °С и газа до 350 °С (равнозначно подогреву одного воздуха до 675 °С) – 1600 °С, при подогреве воздуха до 600 °С, газа до 400 °С (или одного воздуха до 750 °С) – 1750 °С.

Конструкция и элементы камерной рекуперативной кузнечной печи с предлагаемой технологией подготовки и сжигания природного газа в ней показаны на рисунке.

Ряд обозначенных на рисунке позиций (9, 10, 18, 19, 20) связаны со вспомогательными операциями и режимами работы, в том числе: розжиг печи, работа на холостом ходу, защита рекуператора, защита дымососа.

Расчетные технические характеристики печи в номинальном режиме работы: максимальная температура нагрева металла 1280 °С, температура отходящих из печи газов 1350 °С при $n = 1,1$, производительность 2,2 т/ч (для заготовок размерами от 100 до 300 мм при максимальной массе садки до 3,5 т), тепловой КПД печи 52 %, допустимая неравномерность нагрева заготовок по поду 5 – 8 °С. Удельный расход природного газа при температуре подогрева первичного и вторич-



Схематические разрез камеры рекуперативной печи с аэродинамическим разделением рабочего пространства:

1 – подподовая топка; 2 – трубопровод для подвода горячей газо-воздушной смеси к топкам; 3 – трубопровод для подвода горячего вторичного воздуха к соплам аэродинамической завесы; 4 – 6 – петлевые металлические рекуператоры для подогрева: 4 – первичного воздуха до 550 (580) °С, 5 – природного газа до 350 (380) °С, 6 – вторичного воздуха до 550 °С; 7 – сборный трубопровод первичного горячего воздуха и горячего природного газа; 8 – каналы для отвода отработанных продуктов горения в газоотводящий коллектор; 9 – трубопровод для подачи водяного пара или холодного воздуха в воздушные рекуператоры (используется на режиме холостого хода печи и переходных режимах работы); 10 – природный газ для пуска и розжига печи; 11 – зонт с газоотводящим каналом в цеховую аспирационную систему; 12 – аэродинамическая и цепная завесы окна загрузки и выгрузки металла; 13 – каналы для ввода продуктов первичного горения в зону нагрева металла; 14 – сопла для подачи вторичного воздуха; 15 – каналы для подвода продуктов дожига в воздушные рекуператоры; 16 – канал для продуктов горения, соединяющий рекуператоры; 17 – трубопровод для отвода газов от печи, соединенный с дымососом и дымовой трубой; 18 – амбразура горелки ГНП-5А; 19 – трубопровод для ввода третичного воздуха для защиты дымососа; 20 – каналы для ввода пара или воздуха

ного воздуха 550 °С, газа 350 °С и суммарном коэффициенте расхода воздуха в печи 1,1 не превысит 45 м³/т.

При выборе материалов теплоограждений печи безокислительного нагрева были использованы их традиционные характеристики без учета взаимодействия с атмосферой [3].

Основная часть стен, свод рабочего пространства и ограждения рекуператоров, включая и участки с каналами для перетока газов, с отверстиями для сопел подачи вторичного воздуха и козырьки на стенах (они уменьшают естественное пристенное «сползание» газов) выполнены из муллитокремнеземистого волокна – керамволокна типа HTZ – 1425 в сочетании с клеевыми композитами и специальными элементами для крепления.

От характера движения газов в рабочем пространстве печей с аэродинамическим разделением рабочего пространства в первую очередь зависит качество их работы, т.е. подавление окисления металла в условиях полного использования химической энергии топлива. Оно определяется струями входящих в него газов, их расположением, кинетическими характеристиками, направлением, равномерностью компоновки. В этой части рассматриваемой печи элементы рабочего пространства и параметры вводимых в него газовых струй в значительной степени заимствованы из конструкции и материалов по эксплуатации нерекUPERATивных печей Ступинского металлургического комбината (СМК), натурные испытания которых показали эффективность их работы [1].

Для достижения термодинамического равновесия продуктов горения при сжигании природного газа с $n = 0,48 - 0,5$ и организации их равномерного выхода в рабочее пространство с низкой скоростью (до 3 м/с) на печи предусмотрены две закрытые с одной стороны подподовые топки. К топкам по трубопроводам (2) подводится горячая газозоудная смесь. Смешение газов организовано в сборном коллекторе горячего воздуха (7), по всей длине которого поступает горячий природный газ через отверстия в перфорированной кооксиально расположенной в нем трубы. Материал труб 12X18H9T. С целью улучшения смешения газов в газоподводящем к топкам трубопроводе предусматриваются диафрагмы, для предотвращения проскока пламени – перед топками устанавливаются огнепреградительные сетки или вставки из свернутой металлической ленты с рифами. Максимальная температура в топках не превысит 1550 °С. Длина каждой топки равна ширине пода печи, объем 0,4 м³, видимая плотность тепловыделения при номинальном режиме 0,42 МВт/м³. Часть тепла топок непосредственно расходуется на подогрев пода (печь с «теплым подом»). В конце топок газы распределяются по двум горизонтальным соединительным каналам и 26 амбразурам размером 116×140 мм, равномерно размещенным в боковых стенах печи, как показано на рисунке. В режиме номинальной мощности печи около 1 МВт через каналы в

печь поступит $100 \cdot 6,62 / 3600 = 0,183$ м³/с продуктов неполного горения, действительная скорость газов в них составит 2,9 м/с, общая кинетическая мощность струй 0,8 Вт. Скорость по оси струй продуктов неполного горения, с учетом их небольшого остывания и некоторого искривления силами естественной конвекции и Коанда, по достижению центра рабочего пространства уменьшится почти вдвое, расход же газов через их сечение увеличится на 50 – 60 %. Очевидно, что такие струи могут быть причиной лишь относительно малоинтенсивного рециркуляционного движения газов, которое не нарушит целостности и состава защитной атмосферы на поду рабочего пространства с загруженным на него металлом.

Ввод вторичного воздуха в рабочее пространство организован через 50 отверстий, равномерно размещенных, как и каналы для продуктов неполного горения, в боковых стенах печи на расстоянии от пода 1,5 м. Начальный диаметр воздушных струй 25 мм, температура 550 °С, шаг между струями 130 мм, угол наклона к горизонтальной плоскости 20 – 22°. Расход воздуха для дожига газов (и организации внутривспечной завесы) при номинальном режиме и суммарном $n = 1,1$ составит 0,16 м³/с, действительная начальная скорость струй – 20 м/с, общая кинетическая мощность струй – 86 Вт. К моменту встречи пламенных струй вторичного воздуха скорость газов на их оси точно определить практически невозможно, ориентировочно она составит около 2 м/с, присоединенный расход газов – трех-пяти кратный к начальному расходу вторичного воздуха. Очевидно, струи вторичного воздуха, выполняющая роль завесы между зонами, одновременно являются весьма мощными турбулизаторами движения газов в зоне их смешения с продуктами неполного горения и над ними. Естественно, они же ответственны и за относительно развитое циркуляционное движение в этих зонах, что наряду с положительными его последствиями, связанными с улучшением смешения и дожига газов, может привести и к разбавлению газов на поду печи. В режимах работы печей СМК скорость струй вторичного холодного воздуха в различных вариантах их конструкций изменялась от 6 до 20 м/с. Во всех случаях работы с такими скоростями вторичного воздуха достигалось полное дожигание газов в рабочем пространстве печи при общем n не выше 1,1, а атмосфера в зоне нагрева металла практически не загрязнялась продуктами дожига. В настоящей же конструкции существенно повышена равномерность отвода газов из зоны дожига, что в свою очередь увеличит гарантии эффективного использования топлива в ней.

Весьма существенно на работу печи безокислительного нагрева металла может повлиять режим ее работы при загрузке и выгрузке металла. Как показывает опыт их эксплуатации, а особенно опыт работы термических печей с контролируемой атмосферой, сохранить качественную атмосферу в печи при открытии окна невоз-

можно, если печь не имеет специальных механических или газовых завес на окнах, тамбуров и пр. Для того, чтобы избежать частого открывания окна и ухудшения атмосферы в печи, иногда конструируются печи с выдачей металла через под печи, что существенно усложняет их обслуживание.

Впервые выбивание горячих газов через загрузочные окна печей – «газосливы» было рассмотрено В.Е. Грум-Гржимайло в его «гидравлической теории печей». Решение задачи «незатопленного газослива» было дано еще в начале прошлого века И.Г. Есьманом [4]. По его многократно проверенным данным, количество выходящих через открытое загрузочное окно продуктов горения может быть рассчитано по формуле

$$V_t = 1,37BH^{1,5} \left(\frac{t_d - t_b}{T_b} \right)^{0,5}, \text{ м}^3/\text{с}.$$

В соответствии с данными И.Г. Есьмана, действительное количество выбивающихся дымовых газов V_t при высоте окна $H = 0,9$ м, ширине $B = 1,8$ м, температуре продуктов горения $t_d = 1300$ °С, температуре наружного воздуха $t_b = 20$ °С ($T_b = 293$ К) составляет $4,4$ м³/с, что более чем в 4 раза превышает действительное количество технологических продуктов неполного горения, поступающих в зону нагрева металла рассматриваемой печи. Одновременно через нижнюю часть окна, составляющую около 35 % его высоты («высоты газослива»), в печь неизбежно будет поступать атмосферный воздух. Очевидно, выгрузка и загрузка металла через незащищенное открытое окно настолько дезорганизует создание в печи необходимого атмосферного режима, что в условиях работы кузнечных печей с относительно небольшим весом нагреваемых заготовок (до 200 кг) и частым открытием окна практически исключит осуществление не только безокислительного, но малоокислительного нагрева, независимо от используемых в ней технологических режимов и газо-горелочного оборудования.

На кузнечных печах СМК использовали воздушные и паровые завесы, располагаемые вплотную к порогу окна. Воздух (или водяной пар) выходил вертикально вверх из толстостенного трубного коллектора завесы через ряд отверстий диаметром 3 – 5 мм со скоростью до 30 м/с. Расстояние между центрами отверстий не превышало 10 – 15 мм. В печах нагревали относительно не крупные заготовки (до 50 кг), их переносили с помощью подвесных малогабаритных клещей, что позволяло открывать окна на высоту не более 0,2 – 0,3 м и повышало эффективность работы завес. При этом печи на одно рабочее пространство имели по два окна, что также уменьшало количество выбивающихся и подсаживаемых газов.

При необходимости использования для загрузки и выгрузки из печи металла напольных машин с крупногабаритными манипуляторами, окна приходится открывать на полную их высоту, что предъявляет повышенные

требования к завесам. Особенно высокие требования к завесам предъявляются в электрических печах с контролируемой атмосферой. Их главное назначение – предотвратить доступ кислорода в рабочее пространство, попадание которого в термическую относительно низкотемпературную печь приводит не только к ухудшению состава контролируемой атмосферы, но и может привести к образованию взрывоопасной смеси. Основной тип завес для таких печей с периодически или постоянно открытыми проемами – пламенные завесы. Они в значительной степени позволяют сохранить в рабочем пространстве требуемый состав атмосферы. В качестве пламенных завес чаще других используются трубчатые горелки с отверстиями диаметром 3 – 5 мм, наибольшее расстояние между которыми не должно превышать размера их трех диаметров. К ним подается смесь топлива с воздухом при коэффициенте его расхода $n = 0,3 - 0,5$. Скорость смеси в отверстиях горелки составляет 5 – 10 м/с (обязательно больше скорости распространения пламени, для природного газа – 0,38 м/с). Если следовать рекомендациям выбора параметров пламенных завес на природном газе [5], максимальный расход газа для перекрытия проема окна камерной печи, изображенной на рисунке, составит около 45 м³/ч. Столь высокий расход топлива на завесу в период открытия окна, достигающий примерно 50 % от поступления его в печь при номинальном режиме, вряд ли можно считать приемлемым. К недостаткам пламенных завес, особенно кузнечных печей, следует также отнести значительное выделение тепла и увеличение температуры у окна, затрудняющее их обслуживание.

Предполагается, что комплексная механо-аэродинамическая завеса для кузнечных камерных печей безокислительного нагрева может представлять наибольший интерес, тем более, что встречаясь с высокотемпературным горючим газом, покидающим рабочее пространство, воздушная завеса частично превращается в пламенную и в ней также начинают действовать силы естественной конвекции. Основное назначение аэродинамической завесы и подвешенных к заслонке окна сплошного ряда цепей – дополнительное сопротивление, снижающее интенсивность газообмена и теплообмена между печью и окружающей атмосферой. Место подобной завесы показано на рисунке. Газы из зонта над завесой удаляются через цеховую аэрационную систему. Конечно, проблемы уменьшения габаритов окна, габаритов обслуживающих такие печи манипуляторов и при установке завесы остаются очень важными для печей безокислительного нагрева металла.

В качестве материала труб высокотемпературных металлических рекуператоров обычно применяется жаростойкая ферритная легированная сталь 15Х25Т (ЭИ 439). Она характеризуется следующей глубиной коррозии при выдержке в атмосфере воздуха в течение одного года: при температуре 800 °С – 0,1 мм, 850 °С – 0,175 мм, 950 °С – 0,294 мм, 1050 °С – 0,490 мм. По-

видимому, опираясь на приведенные данные и опыт эксплуатации теплообменников из этого металла, максимальную температуру применения стали 15X25T в рекуператорах целесообразно ограничить 900 °С, что позволяет гарантировать срок ее службы при толщине стенок 2,5 мм не менее 10 лет.

В рекуператорное пространство продукты горения поступают через каналы, равномерно размещенные в боковых стенах под сводом печи. Петли рекуператора (трубы 25×2,5 мм) располагаются вертикально, как показано на рисунке. Продукты горения поднимаются вверх вдоль труб со скоростью 0,42 м/с. Расстояние между стенами рекуператора около 250 мм, степень черноты газов в его нижней части при температуре 1350 °С – 0,129, в верхней части при температуре 1000 °С – 0,159, приведенный коэффициент излучения внизу – 1,97 Вт/(м²·К⁴), вверху – 2,33 Вт/(м²·К⁴). Соответственно коэффициент теплоотдачи излучением от газов, с участием ограждений, к поверхности рекуператора: внизу при температуре металла 1000 °С – 240 Вт/(м²·К), вверху при температуре металла 800 °С – 150 Вт/(м²·К). Коэффициент теплоотдачи конвекцией со стороны продуктов горения 5 – 12 Вт/(м²·К), со стороны воздуха на начальном участке при скорости 20 м/с – 52 Вт/(м²·К), на сгибе внизу петли – 93 Вт/(м²·К), на выходе – 125 Вт/(м²·К).

В соответствии с приведенными оценочными результатами расчета коэффициентов теплоотдачи температура стенки трубы $t_{ст}$ в нижней части рекуператора при температуре продуктов горения $t_d = 1350$ °С, воздуха $t_b = 300$ °С составит

$$t_{ст} = t_b + \frac{t_d - t_b}{1 + \alpha_b / \alpha_d} = 300 + \frac{1350 - 300}{1 + 93 / 250} = 1065 \text{ °С.}$$

Соответственно, на выходе газов при $t_d = 1000$ °С, $t_b = 550$ °С температура стенки $t_{ст} = 795$ °С.

Очевидно, без значительной интенсификации внутреннего теплообмена в рекуператорах для подогрева воздуха избежать перегрева его стенок выше 900 °С при температуре входящих в него продуктов горения 1350 °С невозможно. В условиях высокотемпературного теплообмена оптимальным решением повышения внутреннего эффективного коэффициента теплоотдачи является применение лучевоспринимающих (частично турбулизирующих) вставок в трубы рекуператора. Использование вставок при температуре стенки 850 – 1050 °С типа шнек, секторные или засыпка из колец (сталь 12X18H10T) позволяет в 2 – 4 раза увеличить коэффициент теплоотдачи [6]. Соответственно в рассматриваемом режиме тепловой работы рекуператора для подогрева воздуха температура его стенки достигнет: при $\alpha_b = 250$ Вт/(м²·К) – 825 °С, при $\alpha_b = 200$ Вт/(м²·К) – 883 °С, при $\alpha_b = 150$ Вт/(м²·К) – 956 °С. Средний коэффициент теплопередачи $K_F = \alpha_b \alpha_d / (\alpha_b + \alpha_d)$ при использовании ре-

куператора со вставками и максимальной температуре стенки не выше 900 °С в анализируемых условиях его работы составит около 75 Вт/(м²·К). Активная поверхность нагрева двух рекуператоров для воздуха с прямооточно-противоточным движением газов при таких условиях его работы $F_{акт} = 100 \cdot 10,37 \cdot 1,39 / (3,6 \cdot 75) = 5,33$ м², общая поверхность $F_{общ} \approx 7,8$ м².

Температура стенок газового рекуператора (без вставок) не превысит 800 °С, активная поверхность – 1 м².

Альтернативой вставок в трубы воздушных рекуператоров может быть снижение температуры продуктов горения примерно до 1100 °С путем ввода холодного воздуха (разбавление до $n \approx 1,4$) или пара, что привело бы к увеличению их активной поверхности почти в 2,5 раза. Такой вариант для выбранной конструкции печи также возможен, так как и в этом случае компоновка рекуператоров практически бы сохранилась.

Выводы. Предлагаемый вариант камерных печей для безокислительного нагрева стали по тепловому КПД, сложности обслуживания и выбору материалов для строительства практически не отличается от обычных современных печей с одностадийным сжиганием топлива и высокой степенью рекуперации тепла отходящих газов, что при соответствующей доработке системы автоматического управления и стабилизации коэффициента расхода воздуха будет надежной основой перехода от опытной эксплуатации подобных печей к постоянной и широкому внедрению их в кузнечно-штамповочном производстве. Важнейшим условием эффективной работы таких печей, помимо соблюдения принятой технологии сжигания топлива, является и обеспечение сохранности качества атмосферы в рабочем пространстве при загрузке и выгрузке металла. Решение этой проблемы неизбежно связано с необходимостью установки на окнах завес, а также с разработкой малогабаритных манипуляторов для захвата и перемещения заготовок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Курносое В.В., Шульц Л.А. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2012. № 1. С. 9 – 13.
2. Исследование, проектирование и опыт эксплуатации печей для машиностроения: Сб. статей. – М.: ВНИПИ Теплопроект, 1967. – 35 с.
3. Леонидова М.Н., Шварцман Л.А., Шульц Л.А. Физико-химические основы взаимодействия металлов с контролируемыми атмосферами. – М.: Металлургия, 1980. – 264 с.
4. Есьман И.Г. // Журнал русского металлургического общества. 1914. № 1. С. 725 – 770.
5. Петрук А.П. Взрывобезопасность электротермического оборудования с контролируемыми атмосферами. – М.: Энергия, 1979. – 108 с.
6. Ващенко А.И., Шульц Л.А., Селезнев Н.П. // Уменьшение окисления и обезуглероживания стали. Ч. 1. – М.: Черметинформация. 1968. С. 15 – 20.

© 2012 г. В.В. Курносое, Л.А. Шульц
Поступила 20 декабря 2011 г.