



There is presented the review of constructions of the heating furnaces regenerative heating systems. The calculated analysis of different factors influence on air heating temperature and hydraulic resistance of checker is carried out with the help of the mathematical model. There is given the construction of chamber furnace with checkers from corundum balls for heating of titanium alloys, which is incorporated in VSMPO.

*И. М. ДИСТЕРГЕФТ, Г. М. ДРУЖИНИН, В. И. ЩЕРБИНИН, ОАО «ВНИИМТ»,
В. А. САВЕЛЬЕВ, С. В. ЗВОНАРЕВ, В. Б. ПЕТУХОВ, ОАО «ВСМПО»*

УДК 662.611.25

РЕГЕНЕРАТИВНЫЕ СИСТЕМЫ ОТОПЛЕНИЯ ДЛЯ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ ПРОКАТНОГО И КУЗНЕЧНОГО ПРОИЗВОДСТВ (ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ, ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА)

Известно, что в нагревательных печах прокатного и кузнечного производств до 40 – 60 % тепла теряется с уходящими продуктами сгорания, поэтому одним из наиболее эффективных средств экономии топлива является использование этого тепла для предварительного подогрева воздуха, поступающего в горелочные устройства. Возврат обратно в печь части физического тепла обеспечивается специальными устройствами – рекуператорами и регенераторами. В настоящее время в основном используются металлические рекуператоры, позволяющие на практике обеспечить температуру подогрева воздуха не выше 250–550 °С. К недостаткам рекуператоров следует отнести их низкую стойкость и газоплотность при высоких температурах дыма, повышенный механический износ, а также относительно высокие капитальные затраты.

Более высокая температура подогрева воздуха достигается в регенераторах. Принцип подогрева воздуха для горения с помощью керамических (из огнеупорного кирпича) регенераторов известен уже более ста лет и широко применяется в доменных, мартеновских, стекловаренных печах, а также в нагревательных колодцах.

Имеется опыт [1] использования их в нагревательных печах прокатного и кузнечного производств. Так, в 30 – 40-х годах на Златоустовском, Чусовском металлургических и Первоуральском Новотрубном заводах работали методические печи, снабженные двумя регенераторами из огнеупорного кирпича, каждый из которых обслуживал половину имеющихся на печах горелочных устройств. Печи с двухсторонним регенеративным отоплением и выдвижным подом использовали также в кузнечных цехах «Уралмаша» [2]. Благодаря подогреву газа и воздуха в двух регенеративных насадках из огнеупорного кирпича обеспечивался равномерный нагрев садки из слитков крупных размеров от 2 до 100 т, на 10 – 20 % увеличивалась производительность печи и эконо-

мия топлива. Температура подогрева воздуха в таких регенераторах для нагревательных печей достигала 900 °С.

Основные причины, по которым нагревательные печи с регенеративными насадками, изготавливаемыми из огнеупорного кирпича не получили широкого применения при нагреве металла, известны:

- большие габаритные размеры насадок (объем насадки из кирпича, приходящийся на 1 м² пода нагревательной печи, составлял ориентировочно 0,75 – 1,5 м³) и потери тепла через наружные ограждения;
- значительные капитальные затраты на устройство глубоких котлованов для регенераторов и установку перекидных клапанов;
- прерывание отопления печей при перекидке воздушно-дымовых потоков и неравномерность нагрева металла;
- достаточно быстрое разрушение кладки при частых теплосменах и неритмичной работе печи и значительные затраты на их ремонт.

Заслуживают внимание выводы, которые были сделаны в работе [1]: «Регенеративные методические печи являются пройденным этапом в печестроении и в настоящее время только консерваторы могут настаивать на постройке новых регенеративных печей».

В 50-х годах была сделана попытка заменить громоздкие кирпичные регенеративные насадки на более компактные, состоящие из пластин жаропрочной стали (регенераторы Блау-Нокса), стальных труб и металлических шаров. Общий объем насадок удалось снизить почти в 30 раз. В работе [3] приведена конструкция кузнечной печи (разработчик Теплопроект) с насадками из стальных труб (температура подогрева воздуха 900 °С), а в работе [4] упоминается конструкция (ЦНИИТМАШ) опытной камерной печи с четырьмя горелками-регенераторами из металлических шаров диа-

метром 7,35 – 8,00 мм (температура подогрева воздуха 1000 °С), в работе [5] – конструкция карусельной печи производительностью 10 т/ч, оборудованная такими же регенераторами, установленными на своде печи. Однако по ряду причин, скорее всего, из-за интенсивного окисления материала насадки, ее высокого гидравлического сопротивления, отсутствия надежных механизмов перекидки воздушно-дымового потоков и отсечки газа это техническое решение было на время забыто.

В 1982 г. работа в этом направлении была продолжена. Английские фирмы «British Gas Corporation» и «Hotwork Development Ltd.» разработали и запатентовали горелочную систему с индивидуальными регенераторами, в которых в качестве материала для засыпки использовались корундовые шары.

Позже создают свои конструкции насадок с корундовыми шарами французские фирмы «Gas de France», «Stein Heurtey» и американская «North American Manufacturing». К середине 90-х годов этот список пополняется фирмами «Blomm Engineering», «Hauck Mfg. Co.», «Loi Thermprocess Gmdh». Фирма «Jasper GmbH» усовершенствовала хорошо известную в 30-х годах конструкцию регенератора Юнстрема с вращающейся насадкой, снабдив ее вместо гофрированных стальных листов корундовыми шарами. В Японии регенеративные системы отопления выпускает фирма «Chugai Ro Co. Ltd»

Дальнейшее развитие конструкций регенеративных горелок с корундовыми шарами зарубежные фирмы ведут по пути использования их различных тепловых агрегатов, разработки типового ряда устройств, в том числе горелок малой мощности, для сжигания низкокалорийного газа и жидкого топлива, а также использования конструкций, которые обеспечивают пониженный выход оксидов азота. На сегодняшний день зарубежными фирмами изготовлено и внедрено на нагревательных, термических и плавильных печах более тысячи регенеративных систем отопления.

В России первые работы, связанные с разработкой компактной регенеративной системы отопления, следует отнести к 60 – 70-м годам, когда в научно-исследовательском институте металлургической теплотехники (ОАО «ВНИИМТ») создавалась теория регенеративных теплообменных аппаратов [6,7] и, в частности, математическая модель расчета теплообмена в блочной и насыпной насадках [8].

В математической модели периодический процесс теплообмена в регенеративной насадке описывали нестационарным уравнением теплопроводности с соответствующими начальными и граничными условиями. Значения температуры газовых сред разлагали в степенные ряды по времени и сводили задачу к решению системы

линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами в простых производных. При составлении теплового баланса учитывали тепловые потери через наружные ограждения, а также в тракте горячего дутья, которые, в свою очередь, зависят от его геометрии, расхода дутья и уровня температуры. При расчете теплообмена в насадке считали, что конвективный коэффициент теплоотдачи зависит от геометрии насадки, свойств газовых сред и их расхода, уровня температуры, а коэффициент теплоотдачи излучением – от геометрии насадки, оптических свойств газовых сред и температуры.

По высоте насадку разделяли на определенное количество расчетных слоев, каждый из которых представляли в виде тонкого тела с коэффициентом массивности, зависящим от параметров процесса. Кроме того, высоту насадки разбивали на четыре зоны, в каждой можно было задавать свой огнеупорный материал с различными теплофизическими свойствами, соответствующие габариты насадки и геометрические размеры засыпки.

В результате расчетов (с использованием конечно-разностного метода) получали распределение температур газовых сред по высоте насадки в период нагрева и дутья, а также величину гидравлического сопротивления насадки.

Расчетный анализ теплообмена в насыпной насадке, состоящей из шаров, которая обогревалась продуктами сгорания природного газа с расходом 28–150 м³/ч, позволил установить следующие закономерности.

1. Влияние площади поперечного сечения насадки на ее характеристики. На рис. 1 представлено изменение гидравлического сопротивления насадки высотой 0,6 м в зависимости от ее поперечного сечения и расхода воздуха, а на рис. 2 – распределение температуры по высоте слоя засыпки. При этом температура дымовых газов на входе в насадку составляет 1250°С, а температура воздуха – 20°С, температура воздуха на выходе из насадки находится в пределах 1050–1160°С, температура дымовых газов на выходе из насадки: средняя – в пределах 200–340°С, максимальная – 205–400°С. Как показали расчеты, для данной высоты насадки рациональной является площадь поперечного сечения, равная 0,34 м².

2. Влияние времени реверсирования воздушно-го и дымового потоков. Для указанных выше габаритов насадки уменьшение времени перекидки с 5 до 0,5 мин снижает колебания максимальной температуры подогрева воздуха с 250 до 65°С (средняя температура находится на уровне 1090°С). При этом средняя температура дыма падает с 322 до 193°С (максимальная температура снижается почти на 200°С). Гидравлическое сопротивление насадки изменяется незначительно.

3. Влияние высоты насадки. Увеличение высоты слоя насадки от 0,6 до 1,0 м (при постоянном

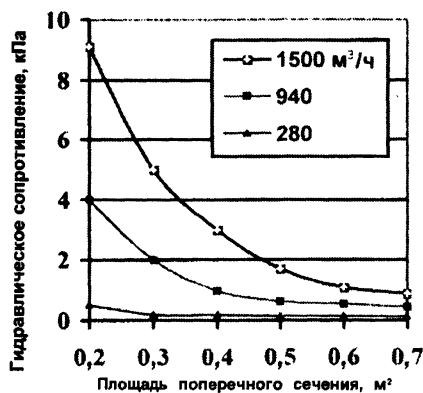


Рис. 1. Изменение гидравлического сопротивления насадки из корундовых шаров диаметром 20 мм в зависимости от ее поперечного сечения при различных значениях расхода воздуха

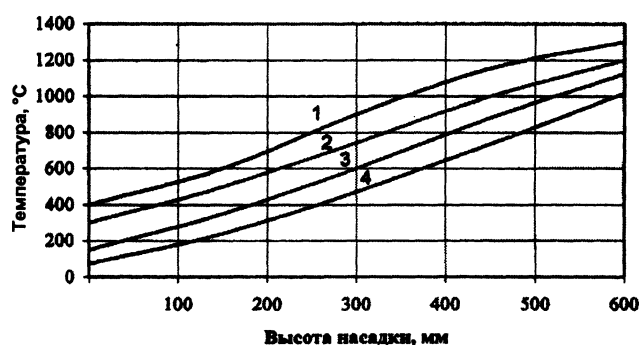


Рис. 2. Изменение температуры воздуха (4) и материала насадки (3) в конце дутьевого периода, дымовых газов (1) и шаров (2) в конце периода нагрева

поперечном сечении 0,34 м²) приводит к повышению средней температуры подогрева воздуха на 70°C и снижению температуры уходящих газов: средней – на 70°C, максимальной – на 65°C. При этом сопротивление насадки возрастает на 40 %.

4. Влияние формы слоя насадки. Исследовали насадки с постоянным по высоте поперечным сечением (0,34 м²) и с переменным (в верхней части на высоте 0,3 м площадь поперечного сечения – 0,5 м², а в нижней части на высоте 0,3 м – 0,182 м²). Холодный воздух входит в насадку снизу, а дым – сверху. Результаты расчетов показали, что подогрев воздуха и температура уходящих продуктов сгорания в том и другом случаях практически одинаковые, а сопротивление второй насадки (из-за уменьшения размера проходного сечения в ее нижней части) возрастает в 2 раза и более.

5. Влияние температуры рабочего пространства печи. Изменение температуры дымовых газов на входе в оснастку с 1250 до 800°C приводит к уменьшению сопротивления насадки с 3,07 до 2,24 кПа, снижению средней температуры дымовых газов за насадкой с 304 до 200°C и понижению температуры подогрева воздуха на 400°C (данные приведены для расхода воздуха 1500 м³/ч).

6. Влияние диаметра шаров. Изменение во всем объеме насадки диаметра корундовых шаров

от 5 до 35 мм приводит к большим изменениям, как по температуре нагрева воздуха, так и по величине гидравлического сопротивления слоя насадки. Уменьшение диаметра шаров с 20 до 5 мм сопровождается увеличением температуры воздуха на 150°C, которая достигает 1240°C, но при этом гидравлическое сопротивление насадки возрастает почти в 5 раз. При увеличении диаметра шаров от 20 до 35 мм подогрев воздуха и сопротивление слоя насадки уменьшаются примерно на 15 % и в 1,5 – 2,0 раза падает сопротивление насадки. Такое же влияние диаметра шаров наблюдается и при использовании других материалов для насадки. На рис. 3, 4 показана зависимость гидравлического сопротивления насадки и температуры подогрева воздуха от диаметра корундовых шаров (температура дыма на входе в насадку равна 1250°C).

При существующих в настоящее время ценах на природный газ и электроэнергию минимум приведенных затрат получается при использовании в насадке шаров диаметром 20 мм. Применение корундовых шаров диаметром 5 и 35 мм увеличивает годовые затраты в среднем на 750 тыс. руб.

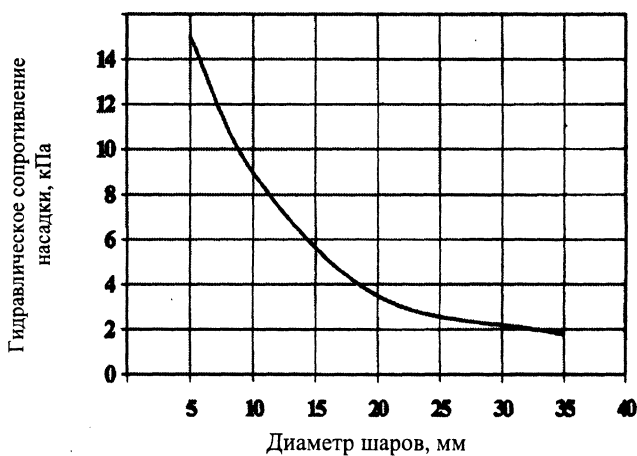


Рис. 3. Изменение гидравлического сопротивления насадки в зависимости от диаметра корундовых шаров

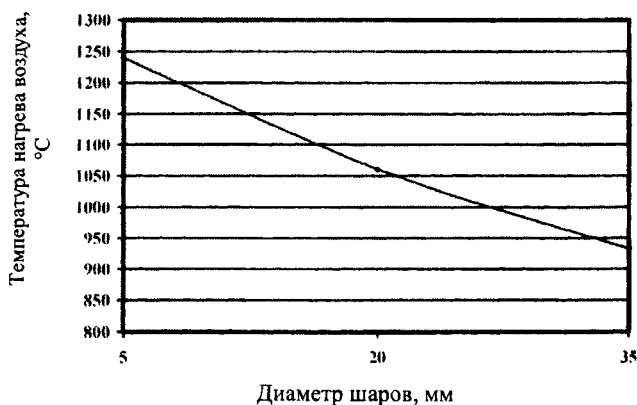


Рис. 4. Изменение температуры подогрева воздуха в насадке высотой 0,6 м в зависимости от диаметра шаров

7. Влияние материала, используемого для насадки. Использование шаров диаметром 5 – 20 мм из различного материала (диоксида циркония ZrO_2 , чугуна, титана, бронзы) не приводит к большим изменениям температуры подогрева воздуха и гидравлического сопротивления слоя насадки по сравнению с корундовыми шарами. Различие в температурах составляет не более 1,5%. Влияние материала становится заметным при диаметре шаров в 35 мм, когда подогрев воздуха в насадке из диоксида циркония выше на 38 °С, чем для корунда (при температуре дыма на входе в насадку в 1250 °С).

В конце 80-х годов ОАО «ВНИИМТ» совместно с «Уралгипрометом» создает [9] проект системы отопления печи для плавки пированадата кальция для Чусовского завода, в то же время строится экспериментальный стенд, на котором обрабатываются конструктивные и режимные параметры будущего регенеративного горелочного устройства. В 1990 г. разрабатывается, изготавливается и исследуется конструкция регенеративной системы отопления для радиационной U-трубы с корпусом диаметром 210 мм. Годом позже проектируется горелочный блок для методической печи Ревдинского метизно-металлургического завода, изготавливается опытно-промышленный образец, на котором проводятся исследовательские работы. В 1992 г. совместно с ВИЛс¹ разрабатывается опытно-промышленный вариант новой системы отопления для плавно-литейного агрегата цеха №36 КУМЗ. В результате промышленных испытаний при плавке алюминиевых сплавов получены обнадеживающие результаты. В 1993 г. ОАО «ВНИИМТ» оснащает новой опытно-промышленной системой отопления печь с выкатным подом в цехе №16 Верхне-Салдинского металлургического производственного объединения (ВСМПО), которая была предназначена для нагрева слябов из титановых сплавов до температуры 1250 °С.

В 1995 г. ОАО «ВНИИМТ» совместно с НПФ «Горелочный центр» выполняет рабочий проект камерной печи с выносной механизацией для нагрева круглых слитков и прутков различного диаметра из титановых сплавов для пресса

207 в цехе №37 ВСМПО, техническая характеристика которой приведена в таблице. В феврале 2001 г. печь введена в промышленную эксплуатацию.

Печь снабжается тремя зонами теплового регулирования, которые отапливаются природным газом с помощью четырех одинаковых горелочных блоков. Первая зона (у заслонки) включает в себя один блок, вторая (в середине рабочего пространства) – два блочных устройства, третья зона аналогична первой. Один горелочный блок объединяет в себе по два горелочных устройства, каждое из которых, в свою очередь, состоит из газовой фурмы с запальным устройством и индивидуального регенератора.

В состав компактного регенератора входит корпус, который футерован шамотным кирпичом и засыпан корундовыми шарами диаметром 20 мм. В нижней части корпуса насадки находится разделительная коробка. Верхняя поверхность короба представляет собой перфорированную перегородку с отверстиями, через которые в насадку поступает либо холодный воздух, либо удаляются продукты сгорания. В верхней части насадки (над корундовыми шарами) расположено отверстие для удаления из насадки нагретого воздуха или для подачи в нее горячих продуктов сгорания. Это отверстие соединено с каналом, который выполнен в кладке футеровки стены и ведет к месту установки горелочного устройства. Насадки komponуются под монолитной подиной печи. Для чистки насадки от окалины в нижней части боковой стенки корпуса насадки предусмотрено ложное окно, а в ее верхней части – люк для засыпки чистых корундовых шаров.

В канал, в месте установки горелочного устройства, помещаются горелочный камень и газовая фурма специальной конструкции с вмонтированным в нее электрическим запальником, работающим в режиме дежурной горелки, и устройством контроля факела.

Подвод газа к газовой фурме и запально-дежурной горелке осуществляется отдельно. Розжиг запально-дежурной горелки производится дистанционно с местного пульта управления.

В каждом блоке через одно горелочное устройство подается и сжигается природный газ, а второе выполняет в этот момент времени функцию дымоотводящего канала, через который обеспечивается отвод горячих продуктов сгорания для разогрева насадки регенератора. Система функционирует в импульсном режиме, при котором попеременно (через 30–45 с) включается в работу то одно, то другое горелочное устройство. Горелки одного блока разнесены по разным боковым стенам печи и установлены относительно друг друга в шахматном порядке. В полуцикле перекидки потоков воздуха и продуктов сгорания два горелочных устройства (четные) на одной стене печи работают «на факел», нечетные – на дымо-

¹ Примерно в это же время ВИЛс создает кузнечную печь с размерами рабочего пространства: под – 1,7х1,8 м, высота – 1,7 м, максимальным расходом природного газа 70 м³/ч. Печь оснащена одним блоком с двумя регенеративными горелками, у которых насадки состоят из корундовых шаров диаметром 20 мм. Вывод, который сделан в результате испытаний: «...использование регенеративной системы отопления наиболее рационально при расходе топлива на печах не менее 100–1150 м³/ч. В противном случае из-за относительно низкой стоимости газа срок окупаемости такой системы будет достаточно высок». Следующая работа ВИЛс в этом направлении – перевод на газообразное топливо низкотемпературной конвекционной электрической печи для обработки полуфабрикатов из алюминиевых сплавов с использованием регенеративной системы отопления.

Техническая характеристика печи

Наименование параметра	Величина
Назначение печи	Нагрев и подогрев слитков и прутков перед ковкой
Размеры внутреннего пространства печи, мм:	
ширина	3200
длина	5100
высота	1940
Площадь пода, м ²	16,6
Высота подъема заслонки, мм	1100
Нагреваемый металл	Титановые сплавы
Размеры слитков и прутков, мм:	
диаметр	950–180
максимальная длина	до 4000
Максимальная масса слитка, т	5,0
Максимальная масса садки, т	7,0
Вид топлива и его calorийность, ккал/м ³	Природный газ, 8500
Конечная температура нагрева металла, °С	1250/800
Разность температур по сечению слитка, °С	5 при нагреве до 800 °С 10 при нагреве до 1250 °С
Количество горелок и регенеративных насадок, шт.	8
Количество зон теплового регулирования, шт.	3
Система отопления	Регенеративные горелки с компактными шаровыми индивидуальными насадками
Количество горелок и насадок в зонах теплового регулирования, шт.:	
зона 1	2
зона 2	4
зона 3	2
Максимальный расход газа на печь, нм ³ /ч	320
Давление газа перед печью, кПа	30
Максимальный расход воздуха на печь, нм ³ /ч	6000
Давление воздуха перед насадкой, кПа	8
Максимальный расход продуктов сгорания, нм ³ /ч	6320
Тип материала засыпной насадки	Шары диаметром 20 мм (96% Al ₂ O ₃)
Объем одной насадки, м ³	0,232
Высота слоя засыпки шаров в насадке, мм	500
Скорость движения газа – дыма в насадке, м/с	1,7
Объем всех насадок на печи, м ³	1,856
Максимальная температура подогрева воздуха в регенеративной насадке, °С	1050

удаление, в следующем полуцикле картина меняется на противоположную. Отсечка газа к газовым фурмам осуществляется с помощью спаренных электромагнитных клапанов.

Подвод воздуха в каждую насадку и отвод продуктов сгорания из нее производится по одному трубопроводу, который, в свою очередь, соединен с общим трубопроводом зоны теплового регулирования печи. На трубопроводе зоны установлен четырехходовой поворотный клапан с

механическим приводом конструкции ОАО «ВНИИМТ». К каждому клапану подведены трубопроводы для подачи в насадку воздуха от вентилятора и для отвода дымовых газов из них к дымососу, которые находятся за печью, в районе ее задней торцевой стенки рядом с перекидными клапанами.

Продукты сгорания из печи удаляются через горелочный тоннель, насадку, дымопровод, перекидной клапан, дымосос и дымовую трубу. Избы-

ток продуктов сгорания (около 10%), полученных за счет работы дежурных горелок и возможных неорганизованных подсосов холодного воздуха, сбрасывается напрямую через дымоотводящий канал в боров печи, в котором установлен шибер. Для предотвращения перегрева дымососа предусмотрено разбавление дыма до температуры 200 °С окружающим воздухом с помощью специального клапана.

Управление температурным и тепловым режимами производится логическим программируемым контроллером SLC 5/04 американской фирмы ALLEN BRADLEY и соответствующим программным обеспечением. Вывод и отображение основных параметров осуществляется с помощью панели графического отображения информации Panel View 9000.

Автоматическая система управления работой печи выполняет следующие функции:

- контроль, управление и индикацию положения исполнительных механизмов печи;
- управление чередованием включения горелочных фурм;
- управление розжигом и контроль факела запальных горелок;
- управление тепловым и температурным режимами печи;
- поддержание заданного соотношения «газ–воздух» по зонам печи;
- регулирование давления в печи;
- переход на работу при минимальных расходах топлива при загрузке и выгрузке заготовок из печи;
- регулирование температуры дымовых газов перед дымососом.

Аварийное отключение печи с выводом информации об аварии, списком аварийных ситуаций (произошедших ранее) с указанием даты и времени возникновения и сопровождением звуковым сигналом также производится автоматической системой управления.

Аварийные ситуации, возникающие при работе печи, условно можно разделить на:

основные аварии – аварии, при возникновении которых автоматика безопасности немедленно отключает всю печь;

аварии зон – аварии, при возникновении которых отключается та зона, где произошла аварийная ситуация;

не основные аварии – второстепенные аварийные ситуации, при которых контроллером выдается сообщение оператору, при этом автоматически никаких действий не производится.

Основные аварийные ситуации: повышение давления газа выше 0,28 кгс/см²; понижение давления газа ниже 0,15 кгс/см²; понижение давления воздуха ниже 400 кгс/м²; уменьшение разрежения перед дымососом ниже 60 кгс/м²; увеличение температуры дымовых газов свыше

300 °С (за регенератором для защиты перекидного клапана); снижение давления воды ниже 1 кгс/см² или нарушение притока воды (с задержкой в 20 мин); отключение электрического питания схемы автоматического управления работой печи.

К авариям зон относятся: неисправность перекидного клапана, обрыв термопары зоны или одного из регенераторов зоны, отсутствие пламени запальника, неисправность МЭО газа или воздуха, а также превышение температуры в зоне и после регенератора.

Печь оснащена приборами КИПиА для регистрации температуры в зонах печи 1,2,3; температуры подогрева воздуха после регенератора и дымовых газов перед регенераторами; температуры дымовых газов после регенератора и температуры воздуха до регенератора; температуры дымовых газов перед дымососом; температуры засыпки в нескольких горизонтах насадки; давления газа перед печью; давления воздуха перед печью; давления воды перед печью; давления в печи и разрежения перед дымососом; давления воздуха перед насадкой; расхода газа на печь и по зонам; расхода воздуха на печь и по зонам; разности давлений воздуха перед и после насадки; времени перекидки клапанов.

Эксплуатация печи предусмотрена в автоматическом режиме управления. Ручной режим используется только для выполнения режимно-наладочных работ. Контроль и изменение параметров (задание) осуществляются оператором (нагревальщиком) посредством терминала контроллера.

В результате пусконаладочных работ и длительной промышленной эксплуатации печи получены следующие данные. Печь позволяет нагревать широкую номенклатуру заготовок без применения на поду печи дорогостоящих жаропрочных подставок, а система автоматического управления улучшает условия обслуживания и безопасной эксплуатации печи. Использование на печи регенеративной системы отопления позволяет за счет высокой теплоемкости корунда и развитой поверхности теплообмена (180 м² на 1 м³ объема) обеспечить глубокую утилизацию тепла уходящих продуктов сгорания в небольшом объеме насадки. Экономия природного газа составила 34% по сравнению с печью, оборудованной металлическим рекуператором и более 50% по сравнению с работой печи на холодном воздухе. При этом снизилось количество вредных выбросов в атмосферу за счет уменьшения объема продуктов сгорания. Новая система отопления обеспечивает нагрев металла в соответствии с требованиями технологии. Температура подогрева воздуха составила 1050 °С, температура уходящих из насадок продуктов сгорания – 190 °С. При значениях коэффициента избытка воздуха в пределах 1,1 – 1,5 содержание СО в продуктах сгорания не превышает 50 мг/м³, NO_x – 900 мг/м³.

Хорошо себя зарекомендовала конструкция поворотного перекидного клапана. Каждый из трех клапанов выполнил за время эксплуатации более 1 млн переключений без единого сбоя. Конструкция газовой фурмы впоследствии была упрощена с целью ее ремонтнопригодности. Претерпело изменение и техническое решение запального устройства, которое позволило повысить его стойкость при высоких температурах и обеспечить надежность в работе. В процессе эксплуатации печи было установлено, что эвакуация указанного объема продуктов сгорания также может быть проведена через регенеративные насадки, что дает возможность в дальнейшем существенно упростить конструкцию печи.

Заключение

1. Пущена в промышленную эксплуатацию первая в России отечественная нагревательная печь с регенеративной системой отопления с компактными насыпными насадками, выполненными из корундовых шаров. Данная система отопления позволяет получить максимальную температуру подогрева воздуха 1050 °С (температура уходящих из насадок продуктов сгорания — 190 °С) и обеспечивает нагрев металла в соответствии с заданной технологией с минимальными затратами природного газа.

2. В ОАО «ВНИИМТ» разработана математическая модель теплообмена в компактной регенеративной шаровой насадке, результаты расчетов по которой полностью подтвердились на практике.

3. Непрерывная эксплуатация печи в течение более 1,5 лет указывает на правильный выбор технических решений при проектировании регенеративных насадок; надежность конструкций перекидного поворотного клапана (каждый из трех клапанов выполнил за время эксплуатации

более 1 млн переключений без единого сбоя); постоянство гидравлического сопротивления регенеративных насадок и отсутствие в них пыли и окалины; устойчивую и надежную работу КИПиА, базой которой служит логический программируемый контроллер SLC 5/04 американской фирмы ALLEN BRADLEY.

Кроме того, установлено, что эвакуация 10 % объема продуктов сгорания через специальный дымоотводящий канал и боров (минуя регенеративные насадки) оказалась излишней и весь поток продуктов сгорания можно направлять через насадки, что существенно упростит конструкцию печи.

Литература

1. Печи для нагрева металла / Под ред. Н.Н.Доброхотова. М., Л.: Гос. науч.-техн. изд-во машиностр. лит., 1941.
2. Зобин Б. Ф. Нагревательные печи. М.: Машиностроение, 1964.
3. Куроедов В. А. Безокислительный нагрев стали в печах открытого пламени // Кузнечно-штамповое производство. 1959. № 1.
4. Касенков М. А. Нагревательные устройства кузнечного производства. М.: Машгиз, 1962.
5. Dr. Veh. Gas in der Gesensschmiede // Gaswerme. 1958. № 1.
6. Тимофеев В. Н., Малкин В. М., Шкляр Ф. Р. Регенеративный теплообмен // Сб. науч. тр. ВНИИМТ. Свердловск. 1962. № 8. С. 16–32.
7. Малкин В. М., Шкляр Ф. Р., Тимофеев В. Н. Приближенный метод расчета температурных полей в доменных воздушнонагревателях // Сб. науч. тр. ВНИИМТ. Свердловск. 1969. № 19. С. 53–60.
8. Шкляр Ф. Р., Малкин В. М., Агафонова М. И. и др. Теплообмен в насыпной насадке и ее гидравлическое сопротивление // Сталь. 1978. № 10. С. 887–889.
9. Дистергефт И. М., Дружинин Г. М., Шербинин В. И. Опыт ВНИИМТ в разработке регенеративных систем отопления для металлургических агрегатов // Сталь. 2000. № 7. С. 84–91.