

М.П. Ревун, профессор, д.т.н.

Ю.Н. Каюков, ассистент

А.И. Чепрасов, профессор, к.т.н.

В.И. Иванов, ст. научн. сотрудник

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ СХЕМ ОТОПЛЕНИЯ ПЛАМЕННЫХ ПЕЧЕЙ КАМЕРНОГО ТИПА

Запорожская государственная инженерная академия

Подано результати досліджень теплової роботи термічних і нагрівальних полум'яних печей камерного типу ПАТ «Електрометалургійний завод «Дніпрспецсталь». Розроблено раціональні схеми опалювання печей даного типу, що дозволяють понизити питому витрату газоподібного палива та підвищити якість обробленого металу.

Представлены результаты исследований тепловой работы термических и нагревательных пламенных печей камерного типа ПАО «Электрометаллургический завод «Днепрспецсталь». Разработаны рациональные схемы отопления печей данного типа, которые позволяют снизить удельный расход газообразного топлива и повысить качество обработанного металла.

Введение. Переход к энергосберегающим технологиям нагрева качественных сталей в пламенных печах камерного типа можно осуществлять как за счет совершенствования тепловой работы данных агрегатов и их горелочных устройств, так и способов управления процессами нагрева.

На ПАО «Электрометаллургический завод «Днепрспецсталь» крупногабаритные листовые слитки качественных сталей, полученные методом электрошлакового переплава, подвергают отжигу в рециркуляционных печах с выдвижным подом по сложным многоступенчатым температурно-временным режимам [1]. В печах осуществляют одностороннее вращательное движение потоков продуктов горения вокруг садки слитков по длине рабочего объема. Вдоль боковых стен печей несимметрично размещены шестнадцать (восемь верхних и восемь нижних) двухпроводных горелок типа ГНП-3. Горелки типа ГНП-1, расположенные в закрытых топках, служат запальными устройствами для горелок ГНП-3 и обеспечивают расширение пределов регулирования температуры в печи при малых тепловых нагрузках.

Рабочий объем печей разделен на восемь зон регулирования температуры по показаниям стационарных датчиков (хромель-алюмелевых термоэлектрических термометров в чехлах), расположенных в верхних зонах (под сводом) и в нижних зонах (над подом печи) в местах пересечения осей зон с продольной осью печи. Штатную садку формируют из семи-восьми слитков размерами $(1800...2000) \times (800...1200) \times (500...600)$ мм и массой 8...12 т, загруженных на подовые подставки, которые при рабочем положении пода размещаются между осями горелок и обеспечивают циркуляцию продуктов сгорания под садкой. Слитки устанавливают на узкую грань с расстоянием 300...400 мм друг от друга в один ряд по длине пода.

Нагрев стальных заготовок перед ковкой осуществляют в пламенных нагревательных печах конструкции института «Стальпроект», выполненных из двух независимых камер, разделенных стенкой и оборудованных индивидуальными системами отопления и отвода продуктов горения. Каждая печная камера содержит восемь горелок, размещенных на боковой стенке в два ряда по ее высоте: в верхнем ряду установлены четыре горелки типа ГНП-5, в нижнем ряду – четыре горелки типа ГНП-3.

Постановка задачи. Проведение исследований тепловой работы термических и нагревательных пламенных печей с целью разработки рациональных схем их отопления в условиях ПАО «Электрометаллургический завод «Днепроспецсталь».

Основная часть исследований. Исследовали качество отжига слитков высоколегированной стали марки ст. 69 по режиму: выдержка при температуре 250 °С (3 ч), подъем температуры со скоростью 40 град/ч до 820 °С, выдержка (14 ч), охлаждение со скоростью 30 град/ч до температуры 550 °С и дальнейшее охлаждение на воздухе (12 ч), выдержка при температуре 250 °С (3 ч), нагрев со скоростью 50 град/ч до температуры 620 °С, выдержка (16 ч) и охлаждение со скоростью 30 град/ч до температуры 450 °С. В садке – возле заслонки печи и в центре ее рабочего объема – размещали два контрольных слитка. Замеры температуры металла выполняли хромель-алюме-левыми термоэлектрическими термометрами, зачеканенными в трех точках по вертикальной оси указанных слитков: на расстоянии 150 мм от поверхности верхней (точки 1 и 4) и нижней (точки 3 и 6) части слитков, а также в их геометрическом центре (точки 2 и 5). Тепловое состояние контрольных слитков в период выдержки при проведении ряда отжигов представлено в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты контрольных отжигов слитков I (возле заслонки) и II (в центре рабочего объема) в рециркуляционной печи при существующей схеме отопления

Масса садки, т	Температура выдержки, °C	Температура в контрольном слитке (I) в конце выдержки, °C			Перепад температуры, °C	Температура в контрольном слитке (II) в конце выдержки, °C			Перепад температуры, °C	Макс. расход топлива на печь при нагреве, м ³ /ч
		Точка замера				Точка замера				
		1	2	3		4	5	6		
96	820±10	780	780	780	0	800	800	800	0	360
	620±10	580	580	580	0	600	600	590	10	300
96	820±10	775	765	775	15	795	790	795	5	380
	620±10	595	590	590	5	615	610	605	10	300
96	820±10	785	775	780	15	810	800	800	10	370
	620±10	580	575	580	5	615	610	600	15	290
74	820±10	780	770	780	10	800	790	790	10	360
	660±10	650	650	650	0	660	660	650	10	280

Как установлено проведенными экспериментами, величина перепада температуры по высоте слитков в конце периодов выдержки не превышает 10...15 °С, а температура на поверхности слитка, размещенного в центре рабочего объема печи, не более чем на 10...25 °С выше, чем для слитка, расположенного возле заслонки, то есть имеет место реализация заданного температурного режима. Однако необходимость предварительного розжига (за 2...3 ч до начала нагрева) закрытых топок и их непрерывная работа на протяжении всего отжига приводят к неоправданным затратам топлива.

В связи с этим горелки типа ГНП-3 заменяли разработанными на их базе горелками частичного предварительного смешения топлива и воздуха [2]. Последующие стендовые и производственные испытания зафиксировали устойчивую работу новых горелок в диапазоне изменения тепловой мощности 1:25 и возможность регулирования температуры в рабочем объеме печи в широких пределах (150...1350 °С), при этом достигается значительное упрощение розжига данных горелок и исключение необходимости установки запальных устройств.

При оценке качества отжига контрольного слитка из стали ст. 69, размещенного возле заслонки печи, оборудованной горелками частичного предварительного смешения, выявлено, что на завершающих этапах периодов подъема температуры в печи до 820 и 620 °С технологические термометры верхней и нижней зон в месте расположения слитка практически одновременно фиксировали заданный уровень температуры. Сопоставление полученных результатов с данными отжигов (см. табл. 1) указывает на их удовлетворительное совпадение, а исключение из схемы отопления печи закрытых топок позволяет получить экономию топлива (природного газа) в количестве 20 кг условного топлива на тонну металла [3].

Нагрев металла в печи камерного типа оценивали по результатам замера температуры в поковках из стали марки Р6М5 размерами 400×360×1600 мм и массой 1,7...2,0 т, размещенных на подовых подставках в один ряд по длине камеры. Контрольные поковки размещали возле горелок (поковка I, точки замера 1-3) и боковой разделительной стены (поковка II, точки замера 4-6) и нагревали по режиму: подъем температуры печи до 700 °С без ограничения скорости, выдержка (4 ч), подъем температуры печи со скоростью 45 град/ч до 1160 °С и выдержка (6 ч). Тепловое состояние контрольных поковок в период выдержки при температуре 1160 °С представлено в табл. 2.

Таблица 2 – Уровень температуры поковок из стали Р6М5 в нагревательной

Длительность выдержки при температуре 1160 °С, ч	Температура металла, °С						Максимальный перепад температуры, °С
	Поковка I			Поковка II			
	1	2	3	4	5	6	
0	1140	1125	1150	1115	1100	1130	50
2	1155	1150	1165	1135	1125	1140	40
4	1160	1160	1170	1140	1135	1145	35
6	1165	1160	1170	1140	1135	1145	35

Примечание: точки 1,4 и 3,6 – на расстоянии 50 мм от поверхности поковок;
точки 2,5 – в геометрическом центре поковок

Результаты исследований показали, что при выходе печи на режим выдержки максимальная величина перепада температуры составляет 50 °С. Через четыре часа его значение понижается до 35 °С и остается на данном уровне до

завершения периода выдержки. При этом температура поверхности поковки, размещенной возле горелок, превышает на 10 °С ее заданное значение, что свидетельствует о ее перегреве. Степень равномерности распределения температуры в рабочем объеме печной камеры оценивали по величине отклонения температуры поверхности поковки от заданной температуры выдержки: для поковок I и II на завершающей стадии данного периода величина отклонения в верхней зоне отопления составляет соответственно 10 и 15 °С, в нижней зоне – 5 и 20 °С.

Наличие неравномерности нагрева поковок обусловлено существующей схемой отопления пламенной камерной печи. Так, горелки типа ГНП обеспечивают сжигание топлива в факелах, которые размещаются в пределах первой половины рабочего объема печи. На стадии выдержки металла в печи снижение расхода топлива сопровождается последующим уменьшением длины факела, и, как следствие, смещением зоны интенсивного выделения теплоты к устью горелок, что приводит к неравномерному распределению тепловых потоков на поверхности металла.

Последующие исследования тепловой работы камерных печей данного типа с использованием математического моделирования [4] позволили установить, что повышение равномерности нагрева металла в период выдержки может быть достигнуто при реализации импульсной схемы отопления. Однако надежная работа горелок типа ГНП, установленных на данных печах, достигается только в диапазоне регулирования тепловой мощности 1:8 и значениях коэффициента расхода воздуха $\alpha = 1,05 \dots 1,15$ [5], что при ступенчатом изменении расхода топлива или соотношения «топливо-воздух» достигнуть практически невозможно.

Для расширения диапазонов изменения тепловой мощности и коэффициента расхода воздуха разработали еще одну конструкцию горелки частичного предварительного смешения [6].

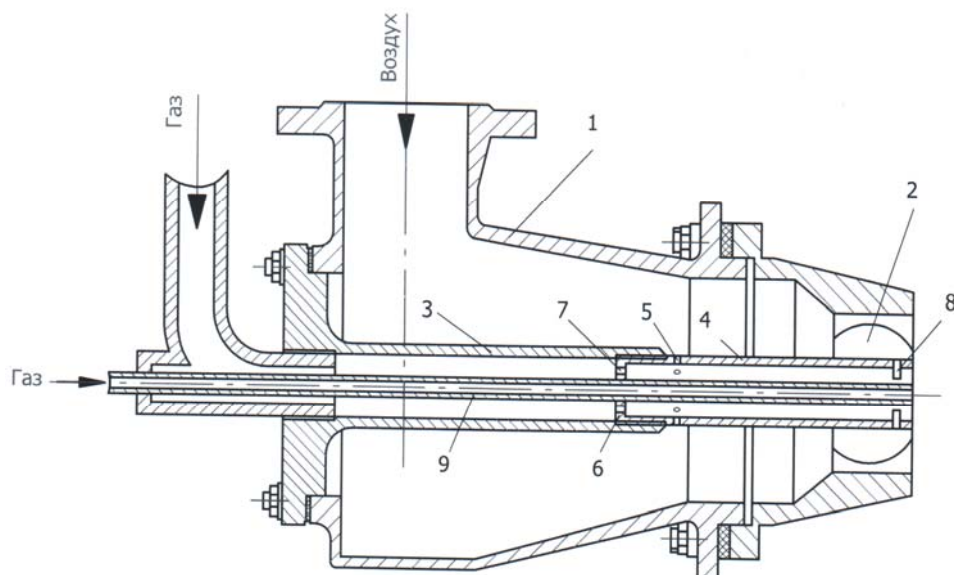


Рисунок 1 – Схема горелки частичного предварительного смешения
(обозначения в тексте)

Горелка (рис. 1) содержит корпус 1 с завихрителем 2, центральную газовую трубу 3 с наконечником 4, в котором выполнены отверстия 5, а также перегородка 6 с отверстиями 7 и рассекатели 8. На оси центральной газовой трубы 3,

коаксиально к ней, размещена внутренняя газовая труба 9, выходное сечение которой расположено в плоскости выходного сечения наконечника 4. Перегородка 6 с отверстиями 7 выполняет разделение потока газообразного топлива на отдельные струи, вблизи которых образуются зоны разрежения.

При работе данной горелки топливо (природный газ) подают по внешнему 3 и внутреннему 9 каналам. Часть топлива, вводимого по внешнему каналу, поступает в наконечник 4. Из канала, образованного корпусом 1 и наконечником 4, первичный воздух через радиальные отверстия 5 поступает внутрь наконечника и равномерно перемешивается струями топлива, которые его инжeksiруют. По внутреннему каналу часть топлива в виде отдельной струи поступает в выходное сечение наконечника, где образуются два осесимметричные потоки, которые отличаются содержанием окислителя: внешний поток содержит весь первичный воздух, во внутреннем потоке окислитель отсутствует. Горение указанных потоков осуществляется вне горелки в струе вторичного воздуха, при этом длину факела регулируют путем создания двух потоков топлива с различной степенью предварительного смешения с воздухом и изменения соотношения их подачи.

Разработанную горелку подвергали испытаниям на огневом стенде и действующей нагревательной печи. На огневом стенде стабильная работа горелок достигается при коэффициенте расхода воздуха в интервале 1...4, что свидетельствует о высокой устойчивости их факелов к отрыву пламени при работе на малом расходе топлива и позволяет стабильно работать в условиях использования импульсной схемы отопления.

В условиях работы действующей печи определяли пределы регулирования тепловой мощности данных горелок. Выполняли пятикратное ступенчатое изменение величины расхода топлива (природного газа) от мощности холостого хода печи до ее максимальной величины. Результаты испытаний схемы отопления в таких условиях позволили установить, что горелки устойчиво работают как при розжиге на холодной печи (пределы регулирования тепловой мощности горелочных устройств – 1:25), так и при ступенчатом изменении тепловой нагрузки.

Оценку качества нагрева металла при импульсной схеме отопления осуществляли по результатам замера температуры в поковках, выполненных аналогично эксперименту при существующей схеме отопления. Тепловое состояние поковок в период выдержки при температуре 1160 °С представлено в табл. 3.

Таблица 3 – Уровень температуры поковок из стали Р6М5 в нагревательной печи в период выдержки при импульсной схеме отопления

Длительность выдержки при температуре 1160 °С, ч	Температура металла, °С						Максимальный перепад тем- пературы, °С
	поковка I			поковка II			
	1	2	3	4	5	6	
0	1150	1140	1160	1130	1115	1135	45
2	1155	1145	1160	1145	1140	1150	20
4	1155	1150	1160	1145	1145	1150	15
6	1155	1150	1160	1145	1145	1150	15

Для периода выдержки печи при импульсной схеме отопления наблюдается колебание ее температуры около среднего значения в пределах ± 10 °С, при этом

зафиксировано сближение уровня температуры металла в контрольных точках поковок: величина максимального ее перепада по садке поковок снижается с 45 °С в начальный момент периода выдержки до 20 °С через 2 ч, до 15 °С – через 4 ч и в дальнейшем не превышает данную величину.

Установлено, что при импульсной схеме отопления нагревательной печи достигается более равномерное распределение температуры в поковках за счет периодической интенсификации теплообменных процессов по всему объему рабочей камеры. Наличие пульсирующего факела постоянной максимальной возможной длины способствует повышению уровня температуры поверхности металла, расположенного во второй по ходу движения продуктов сгорания половины рабочего объема печи (для поковки II зафиксировано практически двухкратное понижение перепада температуры поверхности относительно заданной температуры выдержки). Также практически отсутствует перегрев поверхности поковки, расположенной возле горелок. Следовательно, результаты испытаний импульсной схемы отопления нагревательной печи камерного типа соответствуют результатам математического моделирования ее тепловой работы [4].

Выводы.

1. Испытания схемы отопления рециркуляционной термической печи с выдвижным подом, оборудованной горелками частичного предварительного смешения газообразного топлива (природного газа) и воздуха, показали возможность снижения расхода газа при ее реализации.

2. Результаты промышленных испытаний горелок частичного предварительного смешения в нагревательной печи камерного типа позволили установить, что пределы регулирования их тепловой мощности обеспечивают реализацию импульсной схемы отопления.

3. При использовании импульсной схемы отопления в нагревательной печи камерного типа достигается повышение уровня температуры металла, расположенного во второй половине ее рабочего объема для периода выдержки, а, следовательно, и улучшение качества его нагрева.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Повышение эффективности тепловой работы рециркуляционных термических печей [Текст] / Ю. А. Герасимов, В. И. Иванов, В. С. Баздырев и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 1991. – № 3 (161). – С. 58-60.
2. А.с. 870856 СССР, МПК F 23D 15/00. Газовая горелка [Текст] / Ревун М. П., Байбуз А. Н., Андриенко А. Н. и др. (СССР). – № 2875662/24-06 ; заявл. 17.01.80 ; опубл. 07.10.81, Бюл. № 37.
3. Чепрасов, А. И. Применение горелок частичного предварительного смешения на рециркуляционных термических печах [Текст] / А. И. Чепрасов, М. П. Ревун, Ю. Н. Каюков // *Теплотехнология металлургического производства : сб. научн. трудов*. – Киев : УМК ВО, 1988. – С. 4-7.
4. Математическое моделирование нагрева металла в пламенной печи камерного типа [Текст] / М. П. Ревун, Ю. Н. Каюков, А. И. Чепрасов, В. И. Иванов // *Металургія : наукові праці Запорізької державної інженерної академії*. – Запоріжжя : ЗДІА, 2009. – Вип. 20. – С. 130-140; 2011. – Вип. 23. – С. 163-171.
5. Гусовский, В. Л. Сожигательные устройства нагревательных и термических печей [Текст] : справочник / В. Л. Гусовский, А. Е. Лифшиц, В. М. Тымчак. – М. : Металлургия, 1981. – 272 с. – Библиогр. : с. 269-270.

6. Пальниковий пристрій [Текст] : пат. 30517 Україна : МПК F 23D 15/00 / *Ревун М. П., Каюков Ю. М., Чепрасов О. І., Андрієнко О. М.* ; заявник і патентовласник Запорізьк. держ. інж. академія. – № U 200713056 ; заявл. 26.11.2007 ; опубл. 25.02.2008, Бюл. № 4. – 4 с.

Стаття надійшла до редакції 21.03.2012
р.

Рецензент, проф. В.М. Голубцов