

Губинский В.И. – д-р техн. наук, проф., НМетАУ

АКТУАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ РЕКОНСТРУКЦИИ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

В настоящей статье дается анализ современных тенденций реконструкции нагревательных печей непрерывного и периодического действия с целью энерго- и ресурсосбережения, а также повышения их производительности и качества тепловой обработки металла.

Постановка задачи

Действующие нагревательные и термические печи в металлургии и машиностроении нуждаются в улучшении показателей использования топлива и других ресурсов [1]. Представляет практический интерес на основе анализа информации и опыта научно-исследовательских работ кафедры металлургических печей НМетАУ наметить наиболее эффективные направления совершенствования конструкций и систем отопления нагревательных печей. Накопленный материал дает основание прогнозировать технико-экономические результаты реконструкции печей с точки зрения энерго- и ресурсосбережения.

Результаты исследования

Наиболее перспективна и актуальна реконструкция действующих печей прокатных станков для достижения более эффективного использования топлива, огнеупоров, уменьшения потерь металла в окалину.

Из анализа теплового баланса печи, записанного в форме, предложенной И.Д. Семикиным [2], следует вывод о том, что на величину удельного расхода теплоты топлива " v " влияют четыре фактора:

1. Коэффициент использования теплоты топлива – $\eta_{ит}$;
2. Потери теплоты через футеровку и окна печи, а также на разогрев футеровки до рабочей температуры;
3. Тепловой дефицит металла;
4. Производительность печи.

Если целью реконструкции печи непрерывного действия, например методической, является энергосбережение, то наиболее эффективным средством уменьшения " v " является первый фактор – повышение $\eta_{ит}$. Для этого используют, главным образом, два способа:

– утилизация теплоты уходящих печных газов и возврат её в печь с нагретыми в рекуператорах или в регенераторах компонентами горения;

– снижение температуры уходящих из печи газов путем нагрева металла в неотопливаемой зоне или в камере предварительного подогрева металла.

В обоих случаях величина $\eta_{ит}$ будет зависеть от температуры и объема газов, уходящих в атмосферу:

$$\eta_{ит} = 1 - \frac{Q_{ух.атм}}{Q_H^p} = 1 - \frac{\nu_d \cdot c_d \cdot t_{ух.атм}}{Q_H^p}, \quad (1)$$

где $t_{ух.атм}$ – температура газов в дымовом канале перед дымовой трубой, °С; ν_d , c_d – удельный объем продуктов горения на единицу топлива и их удельная объемная теплоемкость; Q_H^p – теплота сгорания топлива.

Тепловой дефицит металла и производительность печи определяются условиями производства и технологией нагрева металла и, как правило, не подлежат изменению.

Для термических печей периодического действия, наряду с утилизацией теплоты уходящих газов, значимым резервом экономии топлива может быть и второй фактор – уменьшение потерь теплоты на разогрев футеровки путем применения малотеплоемких и низкотеплопроводных волокнистых огнеупорных изделий. В качестве иллюстрации приведем результаты балансовых расчетов закалочной печи с выкатным подом фасонно-сталелитейного цеха, характеристика которой приведена в таблице 1.

Таблица 1

Характеристика закалочной печи с выкатным подом

Площадь пода	13,8 м ²
Масса садки металла	20 т
Температура закалки	1100 °С
Вид топлива	Природный газ
Часовой расход топлива (максимальный)	350 м ³ /ч
Продолжительность цикла термообработки	20 ч

Между циклами термообработки кладка печи охлаждается до 300 °С. В результате замены шамотной футеровки лёгкими, малотеплоёмкими волокнистыми плитами масса футеровки уменьшилась с 76,5 до 10,5 тонн, поглощение теплоты футеровкой при нагреве снизилось в 9 раз – с 43000 МДж до 4700 МДж. Удельный расход услов-

ного топлива за цикл сократился с 220 до 73 кг.усл.т/т, экономия топлива составила 67 %, КПД печи повышен с 12 до 36 %.

При реконструкции нагревательных печей непрерывного действия, или печей периодического действия без существенного охлаждения футеровки между циклами, уменьшение потерь теплоты через футеровку дает менее существенный результат. Благодаря применению современной тепловой изоляции потери теплоты через футеровку печей непрерывного действия снижают до 3 – 5 % от величины общей тепловой мощности печи.

Остановимся подробнее на вопросе повышения $\eta_{ит}$ путем нагрева воздуха и газообразного топлива в рекуператорах и регенераторах.

В рекуператорах доля теплоты, передаваемой воздуху, по отношению к теплоте уходящих газов составляет 30 – 40 %. Остальная теплота дымовых газов выносится в атмосферу.

Причины низкой эффективности существующих рекуператоров таковы:

1. Температура дымовых газов перед металлическим рекуператором не может быть выше 900 – 1000 °С по условиям его долговечности.

2. Фактически температура дыма на входе в металлический рекуператор значительно ниже в результате подсоса холодного воздуха в дымовой канал за печью, поэтому температура подогрева воздуха (либо газа), как правило, не превышает 300 – 400 °С.

3. Керамические рекуператоры способны подогреть воздух до более высокой температуры, однако они громоздки и негерметичны. Утечки воздуха через неплотности достигают 50 %, в результате чего снижается тепловая мощность печи и нарушается регулирование горения.

Перспективным направлением развития конструкций нагревательных печей в XXI веке является применение для утилизации теплоты печных газов малогабаритных, в частности, шариковых регенераторов. Регенеративные печи нового типа получают распространение в мире по мере накопления опыта их эксплуатации [3, 4, 5]. Насадка малогабаритных регенераторов, применяемых в промышленных нагревательных печах, состоит из корундовых окатышей диаметром 20 – 25 мм, содержащих 98 % Al_2O_3 . Поверхность нагрева 1 м³ такой насадки в 10 – 15 раз больше, чем кирпичной насадки типа Сименс. Поэтому шариковый регенератор имеет небольшие габариты и может устанавливаться в стенах печи или в так называемой регенеративной горелке. Чтобы вернуть в печь с нагретым воздухом и, при необходимости, с газом как можно больше теплоты, уносимой дымом, на-

садка регенератора не должна прогреваться по всей высоте, поэтому через 1 – 3 минуты делают перекидку клапанов – дымовоздушных и газовых, при этом температура дыма на выходе из регенератора не превышает 150 – 200 °С. Температура подогрева воздуха примерно на 100 °С ниже температуры дыма на выходе из печи. Расход топлива на печь сокращается в 1,5 – 2,0 раза. Наибольший эффект относится к печам, которые до реконструкции не имели рекуператоров.

Для примера, исходя из формулы (1), дадим числовую оценку $\eta_{ит}$ и $\eta_{пд}$ (КПД) печи непрерывного действия, работающей на природном газе с $Q_H^p = 35000$ кДж/м³ при температуре дыма за регенератором $t_{ух.атм} = 200$ °С, $v_d = 11$ м³/м³ топлива, $c_d = 1,5$ кДж/м³,

$$\eta_{ит} = 1 - \frac{11 \cdot 1,5 \cdot 200}{35000} \cong 0,9.$$

Если принять величину относительных потерь теплоты через футеровку печи и окна $M_{пот}/M_{общ} = 5$ %, то коэффициент полезного действия печи будет равен

$$\eta_{пд} = \eta_{ит} - M_{пот}/M_{общ} = 0,9 - 0,05 = 0,85.$$

Таким образом, нагревательные печи непрерывного действия с компактными регенераторами, отапливаемые природным газом (или мазутом), могут иметь очень высокие показатели использования топлива.

В 2003 году на Украине введена в эксплуатацию первая нагревательная печь с шариковыми регенераторами. На комбинате "Криворожсталь" реконструирован типовой рекуперативный нагревательный колодец с отоплением из центра подины, в результате чего трубчатые керамические рекуператоры заменены шариковыми регенераторами для подогрева воздуха. Опыт первой кампании промышленной эксплуатации колодца описан в статье [6].

Система утилизации теплоты печных газов в компактных регенераторах изменяет облик печей. Существующие сертифицированные горелки из металла рассчитаны на температуру воздуха до 500 °С и поэтому не применимы в регенеративных печах, где температура воздуха может достигать 1200 °С и более. Факельное сжигание топлива с высокотемпературным воздухом в нагревательных печах нецелесообразно, поскольку излишне высокая температура горения вызывает местный перегрев металла и повышает образование термических оксидов азота. Факельное сжигание должно уступить место распределенному по объему печи или отдельной зоны, так называемому, объемному сжиганию топлива.

В связи с этим возникает необходимость конструирования новых

сжигательных устройств, их взаимного расположения и рациональной организации реверсивного движения печных газов. Проектирование печей нового типа становится наукоёмкой задачей, включающей физическое и компьютерное моделирование сжигания топлива и циркуляции печных газов.

В методических регенеративных печах не нужна неотапливаемая зона, в которой понижали температуру уходящих газов с целью экономии топлива. В печах с регенеративными горелками удельный расход топлива не зависит от температуры уходящих газов в связи с глубокой утилизацией их теплоты в шариковых регенераторах, предусматривающей охлаждение дыма до 150 – 200 °С.

Дымовые газы уходят из печи через горелочные отверстия, расположенные в каждой зоне. Поэтому температурный режим каждой зоны регулируется автономно. В каждой зоне печи обеспечивается высокое значение $\eta_{ит}$ (до 90 %).

Если нет ограничения по скорости нагрева металла из-за термических напряжений, то по всей длине печи можно поддерживать одинаковую, максимально возможную по технологии, температуру. Такой камерный температурный режим обеспечит повышение производительности печи или сокращение её длины при той же производительности.

Отпадает необходимость в строительстве материалоемких огнеупорных дымовых каналов за печью. Дым с температурой 150 – 200 °С удаляется из регенераторов по трубам из обычной углеродистой стали.

Становится более разрешимой старая проблема малоокислительного нагрева стали в печах с открытым пламенем путем неполного сжигания топлива, поскольку дожигание может происходить в насадке регенератора. Реально сократить потери металла в окалину за один нагрев с 1,0 – 1,2 % до 0,5 % от массы нагреваемого металла с соответствующим повышением выхода годного.

Наряду с энерго- и ресурсосбережением, актуальной задачей реконструкции печи может быть достижение более высокого качества тепловой обработки металла. Качественный уровень продукции прокатного, кузнечно-прессового, литейного производства во многом зависит от точности выполнения требований технологии по температуре, равномерности и стандартности нагрева металлоизделий.

Температура нагрева характеризует достижение заданной температуры на поверхности изделия в момент выдачи его из печи. Равномерность нагрева оценивают допустимым перепадом температуры по поверхности изделия и по его поперечному сечению в момент выдачи

из печи. Стандартность нагрева означает выполнение требования идентичности температуры и равномерности нагрева всех изделий, выдаваемых из печи.

Требования к температуре и равномерности нагрева по толщине изделия выполняются путем соответствующей выдержки металла при определенной температуре печи. Практика работы печей показывает, что для равномерного по поверхности и стандартного нагрева изделий необходимо управлять температурным полем в объеме рабочего пространства печи с помощью циркуляции газов и условий сжигания топлива [7]. Наиболее трудно решается эта задача в камерных садочных печах, когда требуется обеспечить одинаковую температуру печных газов по объему печи.

Средствами выравнивания температуры в камерных печах служат внутренняя и внешняя рециркуляция, реверс печных газов, регулируемое перемешивание топлива с воздухом путем пульсирующей подачи этих компонентов горения, перемещение факела в камере печи путем качания горелки или воздействия на него струей компрессорного воздуха.

В проходных печах с движущейся садкой стандартный нагрев заготовок обеспечивается тем, что при стабильной работе печи каждая заготовка находится в одинаковых условиях нагрева. В ряде случаев, например, при нагреве заготовок большой длины в методических печах возникает необходимость выравнивания температуры по длине заготовок в нижней зоне печи. Эта задача успешно решена при расположении горелок в боковых стенах путем управления движением печных газов поперек печи с помощью придания подине треугольного профиля [8].

Исходя из требования повышения качества тепловой обработки металла в нагревательных и термических печах, актуально конструирование печей с управляемым температурным полем. Информация из области теории и практики работы печей позволила сформулировать в общих чертах принцип локальности внешнего теплообмена в топливных печах: нагрев поверхности материала или футеровки на каком-либо участке печи определяется излучением и конвекцией от газовых объемов, расположенных в непосредственной близости от этой поверхности [7]. Если учесть, что перенос теплоты излучением в газовой фазе печи на один-два порядка меньше по сравнению с конвективным переносом теплоты движущимся газом, то нетрудно понять, что управлять температурным полем печи – значит управлять движением газов, с помощью которого теплота должна быть доставлена ко всем локальным участкам поверхности металла и футеровки.

Заключение

Таким образом, нагревательные печи металлургии и машиностроения в результате реконструкции могут обеспечить:

– глубокую утилизацию теплоты уходящих газов на уровне $\eta_{ит} = 90\%$, в частности с применением малогабаритных регенераторов для нагрева воздуха и, в случае необходимости, газообразного топлива с соблюдением экологических требований;

– минимальные потери теплоты на разогрев футеровки и через элементы конструкции печей в окружающую среду путем использования огнеупорных и теплоизоляционных волокнистых изделий;

– высокую равномерность и стандартность нагрева изделий на основе управления процессами движения газов и сжигания топлива;

– малоокислительный режим нагрева со снижением потерь металла в окалину до 0,5 % массы нагреваемых изделий.

Актуальным научным направлением реконструкции нагревательных печей является разработка новых горелочных устройств для объемного сжигания топлива с высокотемпературным воздухом, а также систем отопления с малогабаритными регенераторами.

Литература

1. Губинский В.И. Нагревательные печи металлургии – сегодня и завтра // Теория и практика металлургии. – 2004. – № 6. – С. 56 – 60.

2. Румянцев В.Д., Ольшанский В.М. Теплотехника: Учебное пособие / Под ред. В.И. Губинского. – Днепропетровск: Пороги, 2002. – 325 с.

3. Сезоненко Б.Д., Орлик В.Н., Алексеенко В.В. Повышение эффективности использования природного газа при отоплении промышленных печей регенеративными горелками // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 1996. – № 1. – С. 14 – 18.

4. Хоу Чэн Лян. Современное состояние и перспективы развития высокопроизводительных регенеративных печей в КНР // Металлургическая теплотехника: Сборник научных трудов Государственной металлургической академии Украины. В 2-х томах. Т. 1. – Днепропетровск: ГМетАУ, 1999. – С. 195 – 199.

5. Дистергефт И.М., Дружинин Г.М. и другие. Регенеративные системы отопления для нагревательных печей прокатного и кузнечного производства (История развития, теория и практика) // Металлургическая теплотехника: Сборник научных трудов Национальной металлургической академии Украины. Том 5. Днепропетровск: НМетАУ, 2002. – С. 44 – 57.

6. Губинский В.И., Ерёмин А.О., Сибирь А.В., Шеремет В.А., Бабенко М.А., Коротченков В.М., Тряпичкин М.Г. Работа нагревательного колодца с шариковыми регенераторами // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2005. – № 1. – С. 103 – 105.

7. Губинский В.И., Лу Чжун-У. Теория пламенных печей. – М.: Машиностроение, 1995. – 256 с.

8. Ольшанский В.М., Сурядная С.Л., Гупало В.И. Реконструкция и совершенствование теплового режима работы методических печей стана 1700 комбината им. Ильича // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 1992. – № 3. – С. 62 – 63.

Рукопись поступила 16.03.05.