

# НАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ ПЕЧИ МЕТАЛЛУРГИИ – СЕГОДНЯ И ЗАВТРА

В.И.Губинский

Нагревательные пламенные печи являются основным видом печей для нагрева и термообработки металлоизделий в металлургии и машиностроении.

История развития теории и конструкций пламенных печей, отапливаемых газообразным или жидким топливом, насчитывает 100 лет и начинается с трудов В.Е.Грум-Гржимайло [1].

Современные нагревательные печи представляют собой высокомеханизированные агрегаты, удовлетворяющие технологическим и экологическим требованиям, однако жизнь выдвигает новые задачи развития печной техники.

Требования к работе нагревательных печей включают в себя:

- обеспечение заданной производительности;
- обеспечение качества нагрева, удовлетворяющего технологов по структуре и по механическим свойствам металла, по степени окалинообразования и обезуглероживания;
- эффективное использование топлива, характеристикой которого служит удельный расход энергии на единицу продукции в кг.условного топлива на 1 тонну продукции;
- соответствие экологическим нормам по предельно допустимому выбросу в атмосферу пыли и вредных газов: CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, C<sub>20</sub>H<sub>12</sub> и других углеводородов;
- механизация труда при эксплуатации и ремонте печи и автоматизация её теплового режима.

Интегральным экономическим показателем технологии нагрева и конструкции печи является себестоимость нагрева и срок окупаемости капиталовло-

жений в строительство или реконструкцию печи при гарантированном качестве продукции и соответствии экологическим нормам.

Актуальность требований к работе печей с течением времени претерпевает трансформацию. Например, в период индустриализации СССР, в годы Великой Отечественной войны и послевоенного восстановления народного хозяйства наиболее актуальной была задача повышения производительности печей главным образом путем увеличения их тепловой мощности. Решающее влияние уровня тепловой мощности на производительность печи в то время убедительно обосновал автор энергетической теории печей, профессор Днепропетровского металлургического института И.Д.Семикин [2].

В настоящее время производительность печи является варьируемым фактором. Одну и ту же производительность можно обеспечить при работе одной или нескольких печей. Существует понятие оптимальной производительности печи, соответствующей минимуму расхода энергии на нагрев металла, либо минимуму себестоимости нагрева.

На передний план при конструировании печей выдвигается требование эффективного использования топлива и других ресурсов, т.е. проблема энерго- и ресурсосбережения. В связи с этим меняется актуальность научных проблем печестроения. Например, утратила своё значение задача интенсификации теплообмена в печах, как средство повышения скорости нагрева, а, значит, и производительности нагревательных печей. Скоростной нагрев и высокая производительность сегодня не являются самоцелью, поскольку промышленной практике нужны не рекорды, а экономическая целесообразность.

Из анализа теплового баланса печи, записанного в форме, предложенной И.Д.Семикиным [2], следует вывод о том, что возможны три направления энергосбережения:

1. Уменьшение теплового дефицита металла  $\Delta i$ , т.е. количества теплоты, которое должен поглотить 1 кг металла в печи, чтобы нагреться от начальной до конечной температуры.

2. Уменьшение потерь теплоты из рабочего пространства печи через футеровку и окна в окружающую среду, а также на разогрев футеровки до рабочей температуры.

3. Повышение коэффициента использования теплоты топлива (КИТ), т.е. доли теплоты сгорания топлива, которую удастся использовать в пределах рабочего пространства печи. Расход топлива на печь обратно пропорционален величине КИТ.

Рассмотрим конкретные способы реализации каждого из трёх направлений энергосбережения в современных печах металлургии и машиностроения.

*1 способ.* Уменьшение  $\Delta t$  достигается на практике путем повышения начальной температуры металла при посадке его в печь. Так называемый "горячий посад" возможен при сохранении в металле теплоты, полученной им в предыдущем переделе, в том числе теплоты кристаллизации слитков. Применяемая на комбинате "Запорожсталь" технология посадки в нагревательные колодцы слитков с незатвердевшей сердцевиной обеспечивает, по свидетельству комбината [3], сокращение удельного расхода топлива на 40%, с 51,7 до 30,7 кг.условного топлива на тонну слитков. Подобные результаты получены на комбинате "Криворожсталь". Согласно расчетам, в момент посадки слитков в колодцы примерно 30% их объема занимает жидкая сердцевина.

Необходимо как можно меньше охлаждать заготовки, полученные на МНЛЗ, перед посадом в нагревательные печи для последующей прокатки. Примером осуществления такой энергосберегающей технологии являются литейно-прокатные модули.

В ряде случаев удаётся вообще исключить промежуточный нагрев металла между двумя последовательными прокатными станами, т.е. довести тепловой дефицит до нуля благодаря уменьшению потерь теплоты раскатами при транспортировке от одного стана к другому. На комбинатах "Запорожсталь" и им. Ильича (Мариуполь) внедрена технология "транзитной" прокатки слябов на непрерывных листовых станах, при которой 95% слябов прокатываются без

промежуточного нагрева в методических печах [3,4]. В данном случае удельный расход условного топлива в методических печах сокращен с 85 до 15 кг/т.

Уменьшить  $\Delta i$  можно также путем снижения температуры нагрева металла в печи. Однако надо учитывать, что это повлечет за собой не только уменьшение расхода топлива, угара и обезуглероживания металла, но и увеличит расход электроэнергии на прокатку и, вероятно, сократит срок службы прокатных валков. Таким образом, выбор температуры нагрева заготовок представляет собой задачу оптимизации по минимуму всех затрат на процессы нагрева и прокатки.

*2 способ.* Потери теплоты из рабочего пространства имеют место в любых печах, но они особенно существенны в нагревательных и термических печах циклического действия, когда в цикл термообработки входит охлаждение печи до низкой температуры или когда такое охлаждение обусловлено длительными промежутками между циклами нагрева садки. Футеровка таких печей, выполненная из шамотного кирпича, поглощает примерно в 3 раза больше теплоты, чем садка металла. Уменьшение количества теплоты на разогрев футеровки достигается путем замены шамотных огнеупоров муллитокремнеземистыми волокнистыми плитами, производство которых налажено на Украине и в России.

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 <sup>2</sup>
Масса садки металла	20 т
Температура закалки	1100°С
Вид топлива	природный газ
Часовой расход топлива (максимальный)	350 м <sup>3</sup> /ч
Продолжительность цикла термообработки	20 ч

Между циклами нагрева кладка печи охлаждается до 300°C. 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 с 43000 МДж до 4700 МДж, т.е. в 9 раз. Удельный расход условного топлива за цикл сократился с 220 до 73 кг.усл.т/т, экономия топлива составила 67%, КПД печи повышен с 12 до 36%.

В проходных печах с шагающими балками благодаря применению волокнистых материалов для тепловой изоляции стен и водоохлаждаемых балок в сочетании с бетонной оболочкой потери теплоты из рабочего пространства сокращают до 3-5% от тепловой мощности печи.

*3 способ.* Для повышения КИТ применяют следующие мероприятия:

- снижение температуры уходящих газов в методических и кольцевых печах путем теплообмена с металлом в неотопливаемой зоне;
- уменьшение объема продуктов сгорания на единицу топлива с помощью обогащения воздуха кислородом, путем повышения теплоты сгорания топлива, а также путем полного сжигания топлива при минимальном избытке воздуха;
- уплотнение рабочего пространства и регулирование давления газов в печи с целью устранения подсосов атмосферного воздуха.

Однако наиболее эффективным средством повышения КИТ и экономии топлива является утилизация теплоты уходящих из печи газов, в частности, путем нагрева воздуха и газообразного топлива в рекуператорах или регенераторах.

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

На печах большой мощности устанавливают энергетические котлы-утилизаторы. Однако присущая нагревательным печам работа с переменной производительностью создает ненормальные условия для эксплуатации дорогостоящих котлов-утилизаторов.

Причины низкой эффективности существующих рекуператоров таковы:

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

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

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 [5,6,7]. Насадка малогабаритных регенераторов, применяемых в промышленных нагревательных печах, состоит из корундовых окатышей диаметром 20-25 мм, содержащих 98%  $Al_2O_3$ . Поверхность нагрева 1 м<sup>3</sup> 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, насадка регенератора не должна прогреться 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°C.

Шариковые регенераторы возвращают в печь 85-90% теплоты уходящих из печи газов. Температура подогрева воздуха примерно на 100°C ниже температуры дыма на выходе из печи. Расход топлива на печь сокращается в 1,5-2,0 раза. Наибольший эффект относится к печам, не имевшим рекуператоров. Перевод действующих печей на регенеративное отопление требует установки ды-

мососа для преодоления аэродинамического сопротивления шариковой насадки.

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 [8]. Корундовые шарики изготавливаются Белокаменским огнеупорным заводом (Украина). Реконструкция выполнена с минимальным изменением существующей кладки колодца.

Для переключения регенераторов с дыма на воздух и с воздуха на дым через каждые 3 минуты служит один перекидной клапан.

Новизна конструкции состоит в том, что имеется по-прежнему одна постоянно включенная горелка в центре подины вследствие чего отсутствует перекидной газовой клапан, характерный для регенеративных печей.

Эксплуатация колодца с шариковыми регенераторами показала следующие его преимущества по сравнению с рекуперативными колодцами:

- температура нагрева воздуха на входе в горелку составляет  $1200^{\circ}\text{C}$  вместо  $600^{\circ}\text{C}$ , КИТ повысился с 50 до 75%, расход топлива на нагрев слитков сократился на 30%;

- благодаря высокотемпературному подогреву воздуха возможно отопление колодцев доменным газом вместо коксо-доменной смеси с теплотой сгорания  $8,5 \text{ МДж/м}^3$ ;

- снижается расход огнеупоров и стоимость ремонтов, так требующие замены через 2-3 года фасонные огнеупоры трубчатых керамических рекуператоров заменяются корундовыми окатышами, стойкость которых в условиях нагревательных печей фактически не ограничена.

Система утилизации теплоты печных газов в компактных регенераторах изменяет облик печей. Существующие сертифицированные горелки из металла рассчитаны на температуру воздуха до  $500^{\circ}\text{C}$  и поэтому не применимы в реге-

неративных печах, где температура воздуха может достигать 1200°C и более. Фактическое 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 сожигательных устройств, их взаимного расположения и рациональной организации реверсивного движения печных газов. Проектирование печей нового типа становится наукоёмкой задачей, включающей физическое и компьютерное моделирование объемного сжигания топлива и циркуляции печных газов.

В методических и кольцевых регенеративных печах не нужна неотопливаемая 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°C.

Дымовые газы уходят из печи через горелочные отверстия, расположенные в каждой зоне. Поэтому температурный режим каждой зоны регулируется автономно.

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 сокращение длины печи при той же производительности.

Отпадает необходимость в строительстве материалоемких огнеупорных дымовых каналов за печью. Дым с температурой 150-200°C 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, печи завтрашнего дня должны обеспечить более высокое качество 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 выполняют 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 [9]. Наиболее трудно решается эта задача в камерных садочных печах, когда требуется обеспечить одинаковую температуру печных газов по объему печи.

Средствами управления движением газов и сжиганием топлива с целью 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 факел струей компрессорного воздуха [9].

В проходных печах с движущейся садкой стандартный нагрев заготовок обеспечивается тем, что при стабильной работе печи каждая заготовка находит-

ся в одинаковых условиях нагрева. В ряде случаев, например, при нагреве заготовок большой длины возникает необходимость выравнивания температуры по длине заготовок в нижней зоне печи. Эта задача успешно решается при расположении горелок в боковых стенах путем управления движением печных газов поперек печи с помощью придания подине треугольного профиля [10].

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 [9]. Если учесть, что перенос теплоты излучением в газовой фазе печи на один-два порядка меньше по сравнению с конвективным переносом теплоты движущимся газом [9], 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 сегодня и в ближайшем будущем должны обеспечивать:

- высокую равномерность и стандартность нагрева изделий на основе управления процессами движения газов и сжигания топлива;
- глубокую утилизацию теплоты уходящих газов на уровне КИТ = 85-90%, 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;

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

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

### Литература

1. Грум-Гржимайло В.Е. Пламенные печи. М.-Л. Госмашметиздат, 1932.
2. Румянцев В.Д., Ольшанский В.М. Теплотехника: Учебное пособие / Под ред. В.И.Губинского. – Днепропетровск: Пороги, 2002. – 325 с.
3. Сацкий В.А. Технический прогресс – залог высокопроизводительной работы комбината. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*, 2000, № 4. – С. 1-3.
4. Царицын Е.А. Техническое развитие ММК им. Ильича // *Металлургическая и горнорудная промышленность*, 2000, № 4. – С. 3-6.
5. 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.
6. 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. – 214 с.
7. 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. – 196 с.

8. Патент 61495А Украина, С21D 9/70. Нагревательный колодец с шариковыми регенераторами / Сокуренок А.В., Шеремет В.А., Кекух А.В. и другие. Опубл. 17.11.2003. Бюллетень № 11.
9. Губинский В.И., Лу Чжун-У. Теория пламенных печей. – М.: Машиностроение, 1995. – 256 с.
10. Ольшанский В.М., Сурядная С.Л., Гупало В.И. Реконструкция и совершенствование теплового режима работы методических печей стана 1700 комбината им. Ильича // Metallургическая им горнорудная промышленность, 1992, № 3. – С. 62-63.