



The problem of guarantee of gas-air correlation at the example of flame brazing furnace of forging production with several burners, operating on different capacities, is examined.

А. А. ОЗНОБИШИН, Научно-исследовательское и проектное РУП «БЕЛТЭИ»

УДК 669.012-52

ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГОРЕНИЕМ В ГАЗОПЛАМЕННЫХ ПЕЧАХ ДЛЯ НАГРЕВА ЗАГОТОВОК ПЕРЕД ШТАМПОВКОЙ

В настоящее время проблема обеспечения энергоресурсами страны становится ключевой для безопасности нашего государства. Наряду с принимаемыми мерами по созданию и реализации новых направлений дальнейшего развития энергетики (атомная энергетика, использование угольных энерготехнологий) необходимо в нынешних условиях концентрировать внимание на мероприятиях по энергосбережению в отраслях народного хозяйства страны, в первую очередь, в промышленных теплотехнологиях.

Как показывает анализ статистических данных, применяемые сегодня на белорусских предприятиях технологии тепловой обработки материалов чрезвычайно энергозатратны, тепловой коэффициент полезного действия газопламенных нагревательных и термических печей крайне низок и составляет в подавляющем большинстве случаев 5–15%. Другими словами, из каждой 1000 м³ газа эффективно используется лишь 50–150 м³, а остальные 850–950 м³ просто сжигаются и выбрасываются в атмосферу.

При этом конструкции нагревательных печей почти не модернизировались в течение последних 30 лет. Использование морально и физически устаревшего нагревательного и термического оборудования приводит к повышению доли энергозатрат в цене конечной продукции. Все это снижает не только конкурентоспособность продукции белорусского машиностроения, но и энергетическую, а, следовательно, и экономическую безопасность республики.

За 2008–2009 гг. в рамках программы переоснащения и модернизации литейных, термических, гальванических и других энергоемких производств на 2007–2010 гг. (Постановление Совета Министров РБ № 1421 от 31 октября 2007 г.) спе-

циалистами РУП «БелТЭИ» был разработан проект современной печи производительностью до 2,5 т/ч для нагрева заготовок перед штамповкой. В проекте печи были предусмотрены использование современных футеровочных материалов, газогорелочных устройств и системы автоматического управления, что дало возможность достижения КПД свыше 50%. Указанные энерготехнологические характеристики подтверждены в процессе пусконаладочных работ и опытно-промышленной эксплуатации печи.

Следует отметить, что печь также оснащена вспомогательными механизмами, предназначенными для формирования и загрузки пакета заготовок в печь. Количество заготовок в пакете и ход штока пневмотолкателя определяется системой АСУ ТП в зависимости от диаметра и длины заготовок. Алгоритм работы оборудования следующий.

Заготовки с вибростола попадают на вращающийся барабан (рис. 1), где они ориентируются и затем транспортируются на стол загрузки, где поперечным толкателем *l* формируется пакет заготовок. Когда пакет сформирован, он проталкивается в печь пневматическим толкателем. После загрузки пакета в печь и возврата толкателя в исходное положение начинается формирование нового пакета. Таким образом, печь заполняется путем проталкивания одного пакета другим. Контроль набора пакета, ход поперечного толкателя, количество заготовок в пакете осуществляются при помощи различного рода датчиков, сигналы которых обрабатываются контроллером. Заготовки последовательно проходят через отапливаемые зоны, поддержание заданной температуры в которых путем управления работой горелок также является одной из функций АСУ ТП. К моменту попадания

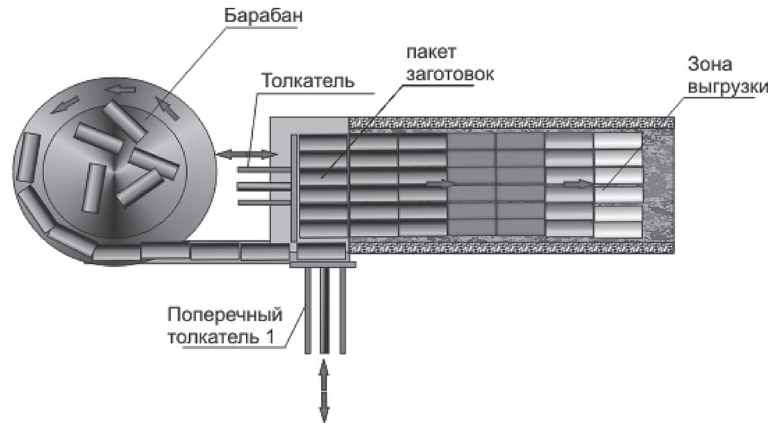


Рис. 1. Схема ПНП-300, вид сверху

пакета в зону выгрузки металл нагревается до температурыковки – около 1250 °С.

На практике при реализации некоторых функций АСУ ТП и в работе отдельных систем печи возникло ряд проблем.

1. Нестабильность коэффициента избытка воздуха при изменении температуры его подогрева в рекуператоре, а также при использовании нескольких горелок, работающих с разной степенью загрузки для поддержания заданных температур в отапливаемых зонах печи.

2. В нагревательной печи ПНП-300 рабочее пространство разделено на три зоны нагрева и, следовательно, на три зоны управления. В каждой зоне находятся горелка и датчик температуры, опираясь на показания которого система регулирует мощность горелки. Технологический цикл проходной печи предполагает различные температуры в зонах управления. В такой ситуации возникают затруднения при получении оптимального (требуемого) состава газо-воздушной смеси, вызванные тем, что реализация обратной связи по анализу дымовых газов проблематична. Это обусловлено тем, что по результатам анализа продуктов сгорания на выходе из печи невозможно определить, какая конкретно из горелок нуждается в корректировке расхода газа и воздуха. Приготовление газо-воздушной смеси происходит посредством пневматических импульсных регуляторов, которые не дают нам представления о массовом расходе газа

и исключают настройку соотношения по каким-либо расчетным таблицам и алгоритмам.

На рис. 2 показана упрощенная принципиальная схема работы такого регулятора. Регулятор соединен с воздушной магистралью импульсной трубкой и в зависимости от расхода воздуха изменяет расход газа. Расход воздуха изменяется управляемой заслонкой в зависимости от температуры в рабочем пространстве печи.

Анализ работы аналогичного устройства, установленного на печи ПНП-300, показал, что при изменении температуры подогрева воздуха в рекуператоре изменяется соотношение «газ–воздух». Указанные результаты были получены путем многократного анализа состава дымовых газов при разогреве печи с помощью газоанализатора Testo 335. По мере повышения температуры воздуха от 0 до 400 °С фактический показатель соотношения топлива/воздух уменьшается от 1,35–1,4 до 1,0–1,05. Следовательно, при температуре воздуха менее 400 °С затрачивается дополнительное количество топлива на нагрев избыточного воздуха в рабочем пространстве печи. Кроме того, в том случае, когда изначально соотношение топливо/воздух установлено ниже 1,35, мы можем получить при высокой температуре подогрева окислителя химический недожог газа, а это, в конечном итоге, также приведет к увеличению расхода топлива.

В данной ситуации возникают две проблемы, которые необходимо решить в процессе проведения пусконаладочных работ:

1) обеспечить стабильный розжиг горелки при «холодном» пуске (температура воздуха равна температуре окружающей среды, начальное значение коэффициента избытка воздуха определяется экспериментальным путем и зависит от максимальной температуры подогрева воздуха в рекуператоре);

2) обеспечить стабильную работу и возможность повторного розжига горелочного устрой-

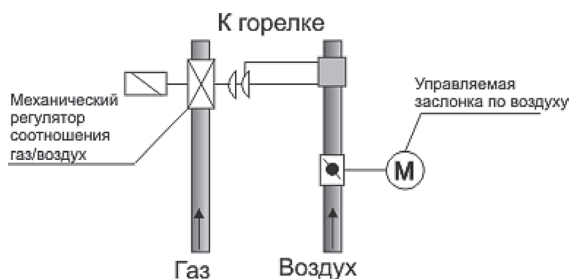


Рис. 2. Принципиальная (упрощенная) схема работы регулятора соотношения «газ-воздух»

ства при максимальной температуре подогрева воздуха.

Следует отметить, что наличие в рабочем пространстве печи избыточного количества окислителя приводит не только к увеличению расхода топлива, но, кроме того, отрицательно влияет на величину потерь металла с окалиной. В соответствии с рекомендациями, приведенными в технической литературе, скорость образования (расход) окалины при инженерных расчетах определяется исходя из толщины окислившегося слоя [3]:

$$m_o = \rho_o S_{\text{мет}} \delta_o \text{ и } G_{\text{окал}} = \frac{dm_o}{d\tau} = \rho_o S_{\text{мет}} \frac{d\delta_o}{d\tau}, \quad (1)$$

где $S_{\text{мет}}$ – площадь поверхности металлической заготовки, м^2 ; ρ_o – плотность окалины, $\text{кг}/\text{м}^3$; δ_o – толщина окислившегося слоя, м .

Опыт экспериментальных исследований тепловой работы нагревательных печей [3, 4] показывает, что толщина окислившегося слоя металла с приемлемой точностью может быть определена по формуле [4]:

$$\frac{d\delta_o^2}{d\tau} = 0,5K_2^2, \quad (2)$$

где $K_2 = \exp(7,25 - 10125/T_m)$ – постоянная окисинообразования при температуре поверхности металла T_m .

Как видим, приведенные соотношения не учитывают химический состав атмосферы печи. В тоже время экспериментальные исследования, выполненные в процессе эксплуатации нагревательной печи ПНП-300 в условиях кузнечного цеха ОАО «МАЗ», показали, что при температуре подогрева воздуха около 150–250 °С толщина окислившегося слоя на поверхности заготовки на 5–15% больше, чем в случае, когда печь разогрета, работала с производительностью, близкой к максимальной, а воздух нагревался до 350–400 °С, что свидетельствует об избытке воздуха при работе с низкими температурами подогрева.

В качестве наиболее перспективного решения описанной проблемы, на наш взгляд, следует рассматривать прямое управление устройствами, регулирующими массовый расход газа и воздуха. При этом необходимо определить закон регулирования, который будет представлять собой зависимость массового расхода газа от массового расхода воздуха. Причем указанное соотношение будет корректироваться при изменении температуры подогрева воздуха и фактической температуры газа, а также давления газа и давления воздуха на входе в горелочное устройство.

Искомый закон регулирования может быть сформулирован на основе известной формулы, применяемой для расчета плотности реального газа:

$$\rho = 10^3 Mp / (RTz), \quad (3)$$

где M – молярная масса одного киломоля вещества, кг ; p – абсолютное давление газа, кПа ; T – температура газа, К ; R – универсальная газовая постоянная; z – фактор (коэффициент) сжимаемости.

Для природного газа, представляющего собой смесь различных газов, наиболее трудоемкой задачей является расчет коэффициента сжимаемости. Методика расчета данного параметра приведена в ГОСТ 30319.2-96 «Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение коэффициента сжимаемости».

Для воздуха, параметры которого могут изменяться в процессе работы печи в более широком диапазоне, чем параметры природного газа, для организации рациональных условий сжигания топлива необходимо учитывать зависимость плотности от температуры, давления и влажности.

Плотность влажного воздуха может быть рассчитана как смесь идеальных газов. В этом случае парциальное давление из водяного пара известно как давление паров. Используя этот метод, погрешность расчета плотности менее 0,2% в диапазоне от –10 до 50 °С. Плотность влажного воздуха находим по формуле:

$$\rho_{\text{humid_air}} = \frac{P_d}{R_d T} + \frac{P_V}{R_V T},$$

где $\rho_{\text{humid_air}}$ – плотность влажного воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$; P_d – парциальное давление сухого воздуха, Па ; R_d – удельная газовая постоянная для сухого воздуха, 287,058 Дж / ($\text{кг} \cdot \text{К}$); T – температура, К ; p_V – давление водяного пара, Па ; R_V – удельная газовая постоянная для водяного пара, 461,495 Дж/($\text{кг} \cdot \text{К}$).

Давление паров воды может быть рассчитано из давления паров насыщения и относительной влажности воздуха:

$$p_V = \varphi p_{\text{sat}},$$

где p_V – давление паров воды; φ – относительная влажность воздуха; p_{sat} – давление насыщенного пара:

$$p(mb)_{\text{sat}} = 6,1078 \cdot 10^{\frac{7,5T - 2048,625}{T - 35,85}}.$$

Таким образом, используя приведенные формулы, можно расчетным путем определить коли-

чество природного газа и воздуха в зависимости от их параметров.

Управление массовыми расходами газов позволит обеспечить требуемое соотношение «газ–воздух».

Выводы

Очевидно, что с целью сокращения расхода топлива и потерь металла с окалиной целесообразно обеспечить поддержание заданного соотношения «газ–воздух» при изменении количественных и ка-

чественных характеристик процесса (температура, давление и расход воздуха и газа).

Для реализации сформулированной задачи система АСУ должна быть оснащена датчиками контроля температуры и давления воздуха перед горелочным устройством (либо перед группой горелок – при незначительной длине воздушного коллектора и подводящих воздухопроводов) и аналогичными устройствами, позволяющими контролировать параметры газа.

Литература

1. Тимошпольский В. И., Герман М. Л. Концепция реконструкции и модернизации парка нагревательных печей металлургических и машиностроительных предприятий Республики Беларусь: от теории к практике // *Литье и металлургия*. 2007. № 2. С. 21–28.
2. Тимошпольский В. И., Самойлович Ю. А., Трусова И. А. *Стальной слиток. Т. 3. Нагрев*. Мн.: Белорусская наука, 2001.
3. Математическое моделирование сопряженного теплообмена в нагревательных печах с подвижным подом / В. И. Тимошпольский, М. Л. Герман, П. С. Гринчук, С. М. Кабишов // *Инженерно-физический журнал*. 2006. Т. 79. № 3 (май–июнь). С. 3–11.
4. К а з а н ц е в Е. И. *Промышленные печи: Справ. руководство для расчетов и проектирования*. М.: Металлургиздат, 1975.