

5. Федина, В. В. Разработка энергосберегающего режима плав-
ления металлизированных окатышей в дуговой сталеплавильной
печи с целью повышения эффективности производства: дис. ...
канд. техн. наук: 05.16.02. / В.В. Федина. – М., 2003.

УДК 559.041

И.А. ТРУСОВА, д-р техн. наук,
И.Н. ПЛЮЩЕВСКИЙ, канд.техн.наук,
П.Э РАТНИКОВ, канд.техн.наук,
Н. Г. МАЛЬКЕВИЧ, канд. техн. наук (БНТУ)

ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ НАГРЕВА МЕТАЛЛА В ПРОХОДНЫХ ПЕЧАХ ПОД ОБРАБОТКУ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

В кузнечных цехах машиностроительных предприятий Респу-
блики Беларусь в настоящее время используются нагревательные пе-
чи проходного типа (толкательные печи) устаревшей конструкции.
Модернизация парка нагревательных печей, помимо ввода нового
оборудования, предполагает также реконструкцию действующих
печей, которая в большинстве случаев подразумевает максимально
возможное сохранение самой конструкции печи (чаще всего метал-
локонструкции). Учитывая, что нагревательная печь предназначена
для обеспечения нагретыми заготовками какого-либо агрегата –
пресса, прокатного стана, молота и др., основным ее показателем
является производительность, которая должна согласовываться с
производительностью конкретного агрегата. Вместе с тем интен-
сификация процессов теплообмена в нагревательной печи, и как след-
ствие, повышение производительности, может привести к необхо-
димости после нагрева заготовок выдерживать их в печи для под-
держания ее температуры на уровне, необходимой для дальнейшего
передела, что приведет к перерасходу топлива. Это требует разра-
ботки оптимальной технологии нагрева, обеспечивающей как топ-
ливосбережение, так и требуемые свойства заготовок для дальней-
шей обработки. Основными статьями, влияющими на себестои-

мость получения металлопродукции в кузнечном цехе, являются стоимость металла, потери с окалиной, а также стоимость топлива, израсходованного на нагрев.

При расчете непрерывно действующих малых нагревательных газопламенных печей кузнечных цехов обычно используют следующие исходные данные: производительность печи G , т/ч; начальная температура металла t_0 , °С; конечная температура поверхности металла t_k , °С; конечный перепад температур по сечению заготовок, Δt_M^k ; способ нагрева (односторонний, двусторонний, трехсторонний) и соответствующая ему расчетная толщина заготовки $s_{расч}$; теплота сгорания топлива, Q , кДж/м³ (кг).

Температура печи $t_{печ}$, соответствующая конечному перепаду температур по сечению заготовки, рассчитывается через удельный тепловой поток к поверхности металла в конце нагрева [3] и расчетную температуру газов в печи:

$$q = \frac{2\lambda_M^k \Delta t_M^k}{s_{расч}}, \quad (1)$$

где q – удельный тепловой поток к поверхности металла; λ_M^k – теплопроводность обрабатываемой марки стали при конечной температуре заготовки.

Расчетная температура газов в печи определяется по выражению:

$$t_g = 100 \sqrt[4]{\frac{q}{\sigma} + \left(\frac{T_p^k}{100}\right)^4} - 273, \quad (2)$$

где σ – коэффициент излучения при степени черноты металла $\epsilon_M = 0,8$.

Температура уходящих газов $t_{y,r}$ находится во взаимосвязи с температурой печи:

$$t_{y.g.} = \sqrt{t_{печ} t_{п}^k}. \quad (3)$$

Температуру уходящих газов небольших печей кузнечных производств рассчитывают исходя из заданной производительности печи и активной площади пода печи [4]:

$$t_{yx} = 625 + 0,68 p_{a.п} \frac{nl}{B} \left(1 + \frac{B}{nl}\right) - 300 \frac{nl}{B},$$

где $p_{a.п}$ – напряженность активного пода, кг/(м²·ч); n – число рядов заготовок в печи; l – длина заготовки, м; B – ширина печи, м.

Расход топлива определяют из уравнения теплового баланса, после чего рассчитывается удельный расход топлива по формуле:

$$b = \frac{BQ_H^p}{G}, \quad (5)$$

где Q_H^p – низшая теплотворная способность топлива; G – производительность печи; B – расход газа.

Коэффициент полезного действия печи:

$$\eta = \frac{Q_M}{BQ_H^p}, \quad (6)$$

где Q_M – теплота, поглощенная металлом при нагреве.

Максимальная температура рабочего пространства печи определяется стойкостью футеровки, технологией нагрева и не может быть выше действительной температуры горения топлива.

Снижение затрат тепловой энергии обеспечивается снижением требуемых температур нагрева для обработки металлов давлением, проведением мероприятий, направленных на уменьшение потерь через конструкцию печи и с отходящими газами, применением современных систем управления тепловым режимом. Энергосберегающие режимы нагрева предусматривают оптимизацию затрат топлива на нагрев за счет организации оптимального распределения пода-

чи топлива во времени и по длине рабочего пространства печи, оптимизации процесса сжигания топлива и гидравлического режима печи.

Нагревательные печи машиностроительных производств часто работают в переходных режимах, вызванных изменением сортамента, марки нагреваемых заготовок, темпа их выдачи, что вызывает трудности с определением теплового режима нагревательной печи при обработке разнономенклатурных изделий. Поэтому требуют решения следующие основные задачи:

- обеспечение требуемых температурных параметров нагреваемых заготовок при минимизации расхода энергии;
- реализация гибкого режима нагрева с учетом требований минимальной температуры выдачи заготовок;
- оптимизация режимов работы печи при простое агрегатов обработки давлением;
- полное сжигание топлива.

Для их решения применяются различные способы управления нагревательными печами, различающиеся как по структуре, так и по техническим средствам. Так как нагревательная печь и агрегаты обработки давлением связаны между собой темпом выдачи из печей и температурой заготовок, выданных из печи, то при автоматизации нагревательных печей должно быть предусмотрено управление как транспортировкой заготовок, так и тепловым режимом печи. Основные функции управляющих процессоров должны быть следующие:

- слежение за положением заготовок и управление транспортировкой заготовок;
- управление процессом нагрева заготовок;
- управление процессом сжигания топлива и гидравлическим режимом рабочего пространства печи.

Задачей системы управления нагревом заготовок является выбор и поддержание такого теплового режима печи, который обеспечит нагрев заготовки до заданных температур при колебаниях производительности молота и изменении теплофизических параметров заготовок. При этом система должна обеспечить график нагрева заготовок, основываясь на принятой стратегии управления и предлагаемом времени нагрева с соблюдением нормированных показателей по расходу топлива. Система управления сжиганием топлива и гидравлическим режимом должна обеспечивать качественное сжигание топлива, достижение оптимальных условий теплообмена фа-

кела с металлом и кладкой, поддержание в печи газовой атмосферы определенного состава.

Комплексное управление нагревательными печами позволяет синхронизировать работу печи и агрегатов обработки металлов, в частности обеспечить своевременную выдачу заготовок с заданной температурой. В условиях нагрева заготовок с переменными геометрическими и теплофизическими параметрами, а также при переменном темпе выдачи заготовок из печи, получение требуемого качества нагрева заготовок возможно лишь при эффективном управлении работой участка нагревательных печей. Под качеством нагрева следует понимать получение заданного распределения температуры по сечению заготовки. В более широком смысле качественный нагрев металла можно характеризовать следующими показателями:

- температура поверхности заготовок на выходе из печи соответствует заданному значению с точностью $\pm 10^{\circ}\text{C}$;

- заготовки прогреты по сечению так, что перепад температур по толщине крупных отливок не превышает допустимых значений ($20\text{--}30^{\circ}\text{C}$) и соответствует применяемой технологии ковки-штамповки;

- скорость нагрева металла от исходного теплового состояния до температур $500\text{--}700$ град не превышает максимально допустимую величину.

Требуемый график нагрева определяется скоростью продвижения заготовок, ее размерами, маркой стали. Чем выше средняя температура заготовки на выходе из печи, тем больше пластичность металла, меньше усилие деформации и расход электроэнергии на его деформацию. Для каждой марки стали имеется максимально допустимые значения данной температуры, исключающей перегрев. Минимальная температура ограничивается мощностью прессы.

При увеличении средней температуры нагрева металла повышается расход топлива на нагрев, возрастают потери металла с окалиной и степень обезуглероживания поверхности заготовок, возрастает риск оплавления окалины и свариваемости заготовок, а также увеличивается износ печи. Вследствие этого возрастает количество металла, который, будучи нагрет за счет расходования топлива и использования производственных мощностей, отбраковывается, то есть возникают дополнительные затраты. Перепады температур по толщине повышаются с уменьшением времени нагрева металла и с

увеличением толщины заготовки. Равномерный нагрев обычно обеспечивается тем, что для заготовки каждой толщины и каждой марки стали устанавливается минимальный предел допустимого времени нагрева.

При интенсивном нагреве заготовок большой толщины из высокоуглеродистых или легированных сталей, обладающих низкой теплопроводностью, между сердцевиной и поверхностью заготовки возникает большой перепад температур, который приводит к появлению значительных термических напряжений. Поэтому скорость нагрева таких сталей до температур 500 – 700°C ограничивается. В целом, существует три области нагрева стали для последующего обработки металлов или термообработки. Начальная область соответствует температурам до 730°C, характерная для нагрева стали с холодного или теплого состояния. Промежуточный интервал температур нагрева составляет 730 – 900°C и сопровождается протеканием фазовых превращений. Особенностью данного периода является замедление скорости роста температуры металла в области фазовых превращений (перлитно-аустенитного) во временном интервале. Замедление скорости нагрева связано с эндотермическим эффектом при фазовых превращениях. Неодновременность протекания эндотермического эффекта по толщине нагреваемого изделия может привести к формированию значительной неравномерности температурного поля. Конечный период нагрева (900 – 1100 – 1300°C) показателен тем, что интенсифицируются процессы окисления, обезуглероживания, роста зерна, обеспечивается необходимая пластичность и сопротивление пластической деформации, возникает опасность перегрева и пережога.

Значительному сокращению расхода топлива способствует применение специального подхода управления печью во время простоев и в периоды, предшествующие простоям и последующие за ним. Также сокращению расхода топлива способствует осуществление динамически согласованной производительности агрегата для пластической деформации и печи с целью компенсации случайного изменения производительности печи. Оптимизация режимов нагрева металла в период простоя агрегата позволяет получить значительную экономию топлива за счет снижения температуры печи по сравнению с рабочим режимом. В работе [2] отмечается, что при оптимизации управления печью во время простоев экономия топли-

ва может достигать до 4 – 7%. На практике бывают запланированные и незапланированные простои. Длительность запланированных простоев регламентирована, но не всегда соблюдается. Незапланированные простои происходят при возникновении аварийных ситуаций и их длительность – величина случайная. Поэтому актуальным является задача расчета и реализации такой подачи топлива по зонам печи во время простоев, при которой можно минимизировать его расход и в то же время иметь нагретый металл сразу же после простоя.

Следует отметить, что эффект по экономии топлива может наблюдаться при равномерно-распределенном нагреве за счет применения сводового отопления плоскопламенными горелками. Согласно данным [5] реальная экономия топлива в этом случае составляет до 5 – 6 %. Экономия топлива до 10 % может быть получена в печах, характеризующихся высокими тепловыми потерями из рабочего пространства печи на охлаждение элементов печи.

Поскольку при нагреве в печах для непосредственного измерения доступна только температура поверхности металла, то информация о температуре внутренних слоев заготовки может быть получена только с помощью математических моделей, адаптированных к реальным процессам, либо по разработанному на ее основе алгоритму контроля процесса. В принципе экономически целесообразным является режим нагрева, при котором основной нагрев происходит в конце назначенного времени нагрева. Сдвиг тепловых нагрузок в зону выдержки проходной печи позволяет сократить расход топлива на нагрев и добиться уменьшения окалинообразования. Оптимальная кривая нагрева должна рассчитываться при соблюдении ограничений, налагаемых на процесс нагрева.

Функция энергосберегающего оптимального управления нагревом заготовок в проходных печах сводится к расчету или температур греющей среды, или температуры поверхности металла в каждой зоне печи и передачи рассчитанных значений в качестве задания в систему автоматического регулирования, где осуществляется управление расходом газа в зоне. При этом основная задача управления нагревом металла состоит в экономии энергоресурсов (топлива) при заданном качестве нагрева и обеспечении наилучших условий сжигания топлива, что определяется оптимальным показателем коэффициента избытка воздуха.

Литература

1. Бутковский, А. Г. Управление нагревом металла / А. Г. Бутковский, С. А. Малый. – М.: Metallurgy, 1981.
2. Кламмер, Г. Системы управления процессом в камерных печах / Г. Кламмер, В. Шуппе // Черные металлы. – 1984. – № 19. – С.10-17.
3. Григорьев, В. Н. Повышение эффективности использования топлива в промышленных печах / В.Н. Григорьев. – М.: Metallurgy, 1977. – 282 С.
4. Мастрюков, Б. С. Теория, конструкции и расчеты металлургических печей / Б.С. Мастрюков. – М.: Metallurgy, 1986. – 370 С.
5. Лазич, Л. Влияние высоты печи на ее характеристики при косвенном радиационном теплообмене / Л. Лазич, Н.П. Свинолобов, В.Л. Бровкин // Сб науч. трудов: Металлургическая теплотехника. – Днепропетровск, 2006. – С. 194 – 208.

УДК 669.04

И.А. ТРУСОВА, д-р техн. наук,
Д.В. МЕНДЕЛЕВ,
П.Э. РАТНИКОВ, канд. техн. наук,
С.В. КОРНЕЕВ, канд. техн. наук (БНТУ)

ПОДБОР КОНСТРУКТИВНЫХ И ТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОХОДНОЙ НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ ПЕЧИ ДЛЯ НАГРЕВА ЗАГОТОВОК ПОД ШТАМПОВКУ С ЦЕЛЬЮ СОЗДАНИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ

Выбор оптимальных конструктивных и технических параметров проходной нагревательной печи должен базироваться на математическом моделировании процессов, происходящих при нагреве металла, проведении соответствующих расчетов и анализе полученных результатов.

В типовых нагревательных проходных печах машиностроительного производства заготовки конструктивно располагаются в виде длинных ручьев (расположение заготовок: торец к торцу). На-