

НЕКОТОРЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ АГРЕГАТОВ ВЫСШЕГО ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ

**Докт. техн. наук, проф. ТИМОШПОЛЬСКИЙ В. И.,
канд. техн. наук, проф. ТРУСОВА И. А., канд. техн. наук КОЗЛОВ С. М.,
канд. техн. наук ФИЛИППОВ В. В., докт. техн. наук СТЕБЛОВ А. Б.**

*Белорусская государственная политехническая академия,
Республиканское унитарное предприятие «Белорусский металлургический завод»*

На современном этапе развития металлургической промышленности в условиях необходимости реализации выпускаемой продукции на рынках ближнего и дальнего зарубежья проблема производства высококачественных изделий, внедрения качественно новых, экономически выгодных технологических режимов работы действующего оборудования является актуальной научно-технической проблемой отрасли.

Республиканское унитарное предприятие «Белорусский металлургический завод» (РУП «БМЗ») – флагман отечественного металлургического производства – реализует стратегию повышения общей экономической эффективности путем комплексного подхода к решению поставленной задачи: производит реконструкцию печного и прокатного оборудования с целью увеличения его производительности; разрабатывает и внедряет оптимальные (рациональные) технологии термообработки металла; использует средства контроля и автоматизации управления тепловыми процессами; стремится к увеличению в выпускаемом ассортименте доли наукоемкой продукции, имеющей более высокие цену и качество и пользующейся возрастающим спросом на рынке. Подобный комплексный подход логично подтверждается априорным фактом бессмысленности внедрения нерациональных технологических режимов работы на металлургических агрегатах высшего технического уровня (высокий удельный вес потерь и непроизводительных затрат при таком подходе сводит на нет достоинства современных металлургических агрегатов). Термин «высший технический уровень» предполагает следующие металлургические агрегаты и технологии: сверхмощные электродуговые сталеплавильные печи, агрегаты внепечной обработки и вакуумирования; сортовые машины непрерывной разливки; печи современной конструкции с механизированным подом.

Наиболее действенными мерами, предпринимаемыми с целью совершенствования тепловой работы функционирующего оборудования, являются анализ существующих и разработка более эффективных технологических режимов работы исследуемых устройств. Изменение режимов может быть основано на:

1) модификации собственно технологического подхода (например, замене части потребляемой при выплавке стали в ДСП электроэнергии альтернативными энергоносителями [1]);

2) изменении температурного режима работы нагревательного оборудования путем варьирования температур и нормирования расхода топлива в технологических зонах печи [2, 3];

3) совершенствовании теплотехнических показателей и технологических параметров совмещенных теплотехнологических процессов (на-

пример, «затвердевание–охлаждение–нагрев непрерывнолитых заготовок» [4]);

4) учете ряда факторов, оказывающих влияние на критерий оптимизации [5, 6].

Разработка новых ресурсо- и энергосберегающих технологий базируется на широком применении методов оптимального управления [7]. Практическое использование математического аппарата для решения задач оптимального управления техническими системами и технологическими процессами обычно предполагает выполнение ряда последовательных этапов:

1) формализацию задачи, во время которой с той или иной точностью учитываются свойства управляемого объекта (описывается динамика исследуемого нагрева, определяются управляющие параметры и управляемые характеристики, накладываются технологические ограничения на управляющие воздействия и фазовые ограничения), выбирается критерий оптимальности. В отношении выбора критерия оптимальности можно выделить задачи:

- о быстродействии (наискорейший нагрев) [8];
- о точности нагрева (достижение заданной технологической температуры и уменьшение температурного перепада по толщине слитка в момент выгрузки его из печи) [4];
- минимизации топливо- и энергопотребления [2, 4];
- на минимум окалинообразования и обезуглероживания [3, 9];
- с технологическими ограничениями (снижение возникающих температурных напряжений по сечению нагреваемого слитка, нагрев с заданной скоростью) [10, 11] и др.;

2) определение принципиальных путей решения, нахождение условий оптимальности задачи, построение схемы вычислительного алгоритма;

3) установку в рабочие параметры алгоритма, обеспечение требуемой скорости сходимости и анализ полученного решения.

Существующие методы оптимизации можно разделить на аналитические и численные. Выбор того или иного метода определяется видом и характером целевой функции, наличием и типом накладываемых ограничений. Зависит он также от математического описания самого объекта оптимизации.

Аналитическому решению задачи оптимального управления поддаются лишь в самых простейших случаях при принятии ряда ограничений и допущений. Для решения более сложных задач, учитывающих целый спектр технологических особенностей поведения исследуемого объекта, как правило, требуется использование современных быстродействующих компьютеров.

Среди всего многообразия методов оптимального управления отдельно следует отметить разработанный и введенный в практику расчетов рациональных режимов нагрева стали в Белорусской государственной политехнической академии метод магистральной асимптотической оптимизации.

Основная концепция метода состоит в том, что при наличии избытка времени функционирования исследуемой системы оптимальная траектория ее поведения будет стремиться находиться в той области фазового пространства, где это выгодно с точки зрения критерия оптимальности. Возможность использования данного математического аппарата в задачах

управления процессами термообработки металла вытекает из того факта, что время нахождения заготовок в печи часто оказывается намного больше минимально необходимого времени нагрева до заданной конечной температуры. Появляется возможность провести декомпозицию исходной задачи на три более простые: центральный (магистральный) участок траектории, определяемый асимптотическими свойствами оптимальных траекторий и два крайних (выход на основной режим и сход с него), учитывающие граничные условия задачи.

С применением математических методов магистральной асимптотической оптимизации или на их основе решен широкий спектр задач управления нагревом металла [12]: минимизации окисления металла, снижения толщины обезуглероженного слоя, уменьшения топливopотребления, оптимизации нагрева металла по расходу теплоты, наискорейшего нагрева и др.

Метод магистральной асимптотической оптимизации выгодно отличается от других методик (например, принципа максимума, метода вариационного исчисления) отсутствием ряда недостатков, свойственных последним. Преимущества метода магистральной оптимизации позволяют в некоторых случаях получать более эффективные траектории поведения исследуемых систем [13].

Методика определения оптимального температурного режима работы печи использовалась при усовершенствовании режимов нагрева высокоуглеродистых марок сталей (70К) в нагревательной печи стана 320/150 РУП «БМЗ» [13]. Полученный на основе метода магистральной асимптотической оптимизации двухступенчатый режим изменения температуры печи (вначале идет монотонный нагрев металла с минимально возможной температурой греющей среды, а затем – форсированный нагрев до заданной температуры)

$$T_{\text{пч}}(t) = \begin{cases} T_{\text{min}}, & 0 \leq t \leq t^*; \\ T_{\text{max}}, & t^* < t \leq t_{\text{к}} \end{cases}$$

позволяет снизить величину окалины с 3,4 (базовый режим) до 2,4 кг/м² (оптимальный режим). Здесь $T_{\text{пч}}(t)$ – температура греющей среды в момент времени t ; T_{min} , T_{max} – минимально и максимально допустимые температуры печи, определяемые из технологических соображений; $t_{\text{к}}$ – продолжительность нагрева; t^* – момент переключения, обеспечивающий нагрев металла до требуемой температуры с заданной точностью. Для реализации теоретического двухступенчатого графика нагрева в практических условиях режим был трансформирован к четырехступенчатому.

В [2] аналогичный подход к решению задачи рационализации топливopотребления в нагревательной печи дуоревверсивного стана 850 РУП «БМЗ», основанный на использовании величины расхода топлива в качестве функции управления, приводит также к двухступенчатому режиму

$$B(t) = \begin{cases} B_{\text{min}}, & 0 \leq t \leq t^*; \\ B_{\text{max}}, & t^* < t \leq t_{\text{к}}, \end{cases}$$

где B – расход топлива.

В силу невозможности изоляции технологических зон печи друг от друга реализация теоретически обоснованного оптимального режима нагрева металла в реальной печи требует обязательного учета ограничений на скорость изменения температуры печных газов в течение всей продолжительности нагрева. Опытно-промышленное опробование нового режима нагрева металла позволяет получить значительное снижение удельного расхода топлива за счет перераспределения расхода топлива в технологических зонах печи: с 49,4 (действующий режим) до 46,7 кг у. т./т (рациональный режим), а также уменьшение величины окалины с 1,1 до 0,9 %.

При решении задачи минимизации угара металла в нагревательных печах патентирования сталепроволочных цехов РУП «БМЗ» [3] имела место следующая сложная проблема: с одной стороны, требовалось получить наименьшую величину окалины, с другой – окалина должна быть достаточно «рыхлой» и пористой для облегчения процесса ее травления.

Разработка оптимального режима нагрева высокоуглеродистой проволоки включала в себя следующие этапы:

1) построение двухступенчатого режима работы печи с использованием температуры греющей среды в качестве управляющего параметра. Это позволило уменьшить фактическую толщину слоя печной окалины по сравнению с базовым вариантом на 2–3 % (с 3,5 до 3,4 мкм);

2) трансформация двухступенчатого температурного режима к двухзонному, позволяющему избежать мгновенного изменения температуры греющей среды. При этом угар металла возрастает на 0,5 % по сравнению с теоретическим оптимальным режимом (однако оказывается меньшим относительно базового);

3) учет других факторов, оказывающих существенное влияние на динамику процесса окисления [14], в частности реализация максимально возможного для действующего оборудования варианта снижения соотношения «топливо–воздух» в различных технологических зонах печи патентирования.

Внедрение нового технологического режима нагрева проволоки позволило снизить толщину слоя окалины от 8 до 18 % (в зависимости от диаметра исследуемого образца).

Следует отметить, что разработка представленных в данной работе высокоэффективных технологических режимов нагрева металла стала возможной благодаря использованию комплексного подхода исследований металлургических процессов (математическое моделирование оптимизируемых процессов, проведение экспериментов в промышленном потоке, широкое использование средств вычислительной техники).

ЛИТЕРАТУРА

1. Р а с ч е т потребного количества кислорода для поддержания заданной температуры стали в период ее кипа в ДСП / И. Г. Биох, С. А. Фоменко, С. М. Козлов и др. // *Литье и металлургия*. – 2000. – № 3. – С. 74–76.

2. Р а з р а б о т к а рациональной теплотехнологии нагрева кордовой стали в проходной печи стана 850 РУП «БМЗ» / В. В. Филиппов, В. И. Тимошпольский, В. А. Тищенко и

др. // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2001. – № 2. – С. 80–86.

3. Р а з р а б о т к а высокоэффективных режимов термической обработки кордовой стали в печах патентирования / В. И. Тимошпольский, В. В. Филиппов, А. Н. Савенок и др. // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2001. – № 4. – С. 61–67.

4. Ф и л и п п о в В. В. Разработка ресурсосберегающих теплотехнологических процессов при производстве кордовых марок сталей: Дис. ... канд. техн. наук / БГПА. – Мн., 2001. – 48 с.

5. Р а с ч е т н ы й анализ технологии выплавки и выбор режимов продувки кислородом кордовых марок сталей с целью уменьшения содержания азота / В. В. Филиппов, В. И. Тимошпольский, С. А. Фоменко и др. // Литье и металлургия. – 2001. – № 2. – С. 106–112.

6. П у т и сокращения расхода топлива в дуговых сталеплавильных печах / А. Д. Шевченко, Н. А. Свидуневич, И. Г. Биох и др. // Металлургия: Сб. науч. тр. – Вып. 25. – Мн.: Выш. шк., 2001. – С. 171–176.

7. О с н о в н ы е методы оптимизации режимов нагрева металла / С. М. Козлов, В. И. Тимошпольский, В. Б. Ковалевский и др. // Литье и металлургия. – 2000. – № 3. – С. 68–71.

8. К в о п р о с у о быстродействии нагрева металлической садки в нагревательных и термических печах / В. И. Тимошпольский, В. Б. Ковалевский, А. П. Несенчук и др. // Литье и металлургия. – 1999. – № 1. – С. 47–49.

9. Т е п л о т е х н о л о г и металлургических мини-заводов / В. И. Тимошпольский, Ю. В. Феоктистов, А. Б. Стеблов и др. – Мн.: Наука і тэхніка, 1992. – 158 с.

10. У п р а в л е н и е режимом нагрева массивного цилиндра с учетом ограничений на упругопластические напряжения / В. И. Тимошпольский, В. Б. Ковалевский, И. А. Трусова и др. // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1987. – № 9. – С. 81–86.

11. Т р у с о в а И. А. Расчет напряжений в цилиндрической заготовке при оптимальном температурном режиме печи // Металлургия и литейное производство: Сб. науч. тр. – Мн.: Беларуская наука, 1998. – С. 35–37.

12. Р е ш е н и е задач управления нагревом металла на основе метода магистральной асимптотической оптимизации / В. И. Тимошпольский, С. М. Козлов, В. Б. Ковалевский и др. // Литье и металлургия. – 2000. – № 4. – С. 103–108.

13. В ы б о р температурного режима нагрева металла по минимуму окисления на основе метода магистральной оптимизации / В. И. Тимошпольский, В. Б. Ковалевский, В. М. Ольшанский и др. // ИФЖ. – 2000. – Т. 73. – № 6. – С. 1320–1323.

14. В л я н и е различных факторов на процесс окисления сталей при нагреве в пламенных печах / С. М. Козлов, В. И. Тимошпольский, И. А. Трусова и др. // Литье и металлургия. – 2001. – № 2. – С. 127–129.

Представлена техническим советом

РУП «Белорусский металлургический завод»,
кафедрой «Металлургические технологии» БГПА

Поступила 14.11.2001