

С. М. КОЗЛОВ, В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ,
В. Б. КОВАЛЕВСКИЙ, БГПА,
В. В. ФИЛИППОВ, Ю. В. ДЬЯЧЕНКО, РУП "БМЗ",
И. А. ТРУСОВА, БГПА

The article describes a range of problems of optimal metal heating control. Analysis of main industrial technologies optimization methods in automobile construction and metallurgical production is conducted. The article shows effectiveness and advantages of the trunk asymptotic optimization method in solution of industrial optimization tasks.

ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ НАГРЕВА МЕТАЛЛА

УДК 669.012.9

Нагрев стали — одна из важнейших технологических операций, поскольку металлургическое производство служит основным поставщиком сырья для легкого и тяжелого машиностроения, станкостроения, транспортной, химической промышленности, а участки тепловой обработки металла (нагрев, отпуск, закалка, нормализация) стали неотъемлемой частью практически каждого современного предприятия. В связи с этим вопрос разработки и внедрения новых прогрессивных технологий управления режимами работы нагревательных устройств был, есть и будет актуальной задачей современной металлургической промышленности.

Наряду с проблемой получения изделий самого высокого качества научно-технический прогресс на нынешнем этапе ставит конкретные задачи по экономии и рациональному использованию металла и топливно-энергетических ресурсов.

Одной из таких задач является проблема улучшения качества нагрева, снижения потерь металла окалиной, уменьшения толщины обезуглероженного слоя. Эффективность и экономичность работы печей при нагреве стали открытым пламенем определяется тем, насколько рационально реализовано сжигание топлива в технологических зонах.

Тепловая обработка стали, несомненно, является весьма энергоемким производством. Кроме того, долгосрочные прогнозы указывают на устойчивую тенденцию роста доли стоимости энергоресурсов в общей себестоимости продукции. Наличие в Республике Беларусь крупного машиностроительного и металлургического производства наряду с отсутствием разрабатываемых месторождений железной руды, нефти и природного газа диктует необходимость освоения качественно более новых оптимальных ресурсосберегающих промышленных технологий, применения современных достижений науки и передового опыта.

Определение условий тепловой обработки металла с целью управления формированием его структуры и свойств, снижения непроизводительных потерь энергии и затрат сырья основано на применении точных методов расчета и прогнозирования теплового состояния заготовки с помощью ЭВМ.

Печные участки термообрабатывающих цехов машиностроительных и металлургических предприятий следует рассматривать в качестве автоматизированного теплотехнического комплекса, в состав которого входят:

- собственно печное оборудование;
- реализуемая теплотехнология;
- средства автоматизированного управления.

Очевидна тесная взаимосвязь между качественными уровнями технологии, оборудования и ресурсозатратами производства. Доказательством тому служит тот априорный факт, что любую, даже самую технически совершенную технологию нельзя реализовать на физически или морально устаревшем оборудовании, а внедрение несовершенной технологии на лучшем современном оборудовании просто бессмысленно.

Поэтому повышение общей экономической эффективности производства осуществимо лишь при комплексном подходе путем оптимизации (рационализации) теплотехнологий обработки металла, использования современных конструкций нагревательных устройств и автоматизации тепловых процессов.

Решение задач оптимального управления системами с сосредоточенными и распределенными параметрами ведется с середины 50-х годов XX в. Первые исследования в этом направлении были проведены Л. С. Понтрягиным, А. И. Егоровым, К. А. Лурье. Значительный вклад в теорию этого вопроса применительно к задачам нагрева металла внесли А. Г. Бутковский, С. А. Малый, Э. М. Гольдфарб, В. М. Олышанский и др.

В комплексной научно-производственной лаборатории "Проблемы металлургического производства" БГПА под руководством доктора технических наук, профессора В. И. Тимошпольского проводятся теоретические исследования, направленные на изучение закономерностей высокотемпературных процессов металлургического производства с целью разработки оптимальных ресурсо- и энергосберегающих теплотехнологий.

Из всего многообразия существующих разработок по проблемам оптимизации тепловой работы нагревательных устройств можно выделить три основные группы по:

- 1) общности математической формулировки задачи теплообмена;
- 2) выбору критерия оптимальности;
- 3) методике решения задачи оптимизации.

При практическом использовании математического аппарата для решения задач оптимального управления обычно выделяют ряд последовательных этапов.

На первом этапе происходит формализация задачи, во время которой с той или иной точностью учитываются свойства управляемого объекта (описывается динамика процесса нагрева, накладываются ограничения на управляющие воздействия и фазовые ограничения), выбирается критерий оптимальности. В отношении выбора критерия оптимальности можно выделить:

- задачи о быстродействии (наискорейший нагрев);
- задачи о точности нагрева (достижение заданной технологической температуры и уменьшение температурного перепада по толщине слитка в момент выгрузки его из печи);
- задачи минимизации топливо- и энергопотребления;
- задачи на минимум окалинообразования и обезуглероживания;
- задачи с технологическими ограничениями (снижение возникающих температурных напряжений по сечению нагреваемого слитка, нагрев с заданной скоростью);
- задачи общего критерия оптимальности.

После того, как определены связи между искомыми переменными, ограничения, характеризующие область их изменения и др., переходят ко второму этапу — определению принципиальных путей решения. Здесь находят условия оптимальности задачи, намечают схему вычислительного алгоритма.

Наконец, на последнем, третьем этапе устанавливают рабочие параметры алгоритма, добиваются удовлетворительной скорости сходимости и анализируют полученное решение.

Все методы оптимизации подразделяются 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.

Численные методы являются наиболее универсальными при решении задач оптимизации в теплотехнике. Их разделяют на прямые и непрямые. Основу первых составляют итерационные процес-

сы последовательного уменьшения/увеличения функционала, описывающего критерий оптимальности. Второй класс методов можно разделить на две большие группы. К первой относятся методы последовательного улучшения известной траектории процесса; ко второй — методы глобальной оптимизации, применяемые для решения задачи синтеза оптимальной системы и обеспечивающие перебор всех возможных ситуаций.

Среди известных задач оптимального управления, решенных численными методами, необходимо отметить следующие: нагрев тел различной геометрической формы с учетом теплообмена излучением и конвекцией и переменными теплофизическими свойствами металла, оптимальное управление нагревом окисляющегося металла, субоптимальное управление (параметрическая оптимизация режимов из теоретически обоснованного класса функций) [1], наискорейший нагрев металла [2], оптимальный по расходу топлива нагрев слитков произвольной формы [3].

Несмотря на то что численные методы поиска оптимальных режимов нагрева металла отличаются наибольшей универсальностью, существует ряд недостатков таких решений: опасность попадания на локальный оптимум, возможные большие затраты машинного времени, погрешность вычислений.

Среди широко используемых в настоящее время аналитических методик оптимального управления следует отметить следующие методы: классического математического анализа, вариационного исчисления, моментов, линейного и динамического программирования, финитного управления, асимптотической магистральной оптимизации, принцип максимума.

Суть метода **классического математического анализа** исследуемых функций заключается в использовании традиционных идей математического анализа. Целевая функция достигает точки экстремума (максимума или минимума) на некотором интервале области своего определения, если в этой точке первая ее производная по некоторой переменной равна нулю (бесконечности) или не существует.

К достоинствам метода относятся его простота и универсальность. Однако область применения метода классического математического анализа ограничена функциями, для которых определена ее аналитическая зависимость от всех аргументов. Кроме того, исследуемая целевая функция имеет производные по всем независимым переменным.

Поиск решения исходной задачи может быть затруднен многоэкстремальностью критерия оптимизации на исследуемом интервале изменения аргументов функции.

Одним из основных методов теории оптимального управления, с которым обычно связывают ее бурное развитие, признан **принцип максимума** Л. С. Понтрягина [4]. С его использованием был решен ряд теплотехнических задач [5—7]: задача нагрева

термически тонкого тела с минимальным расходом топлива в камерных или проходных печах; определение оптимальных конструктивных параметров печи при минимуме затрат на топливо, огнеупоры и обслуживание; получение оптимальных режимов нагрева изделий, обеспечивающих минимизацию окалины и топлива как отдельно, так и в целом.

Задачи, решенные различными авторами на основе принципа максимума, позволяют сделать интересные выводы: графики оптимального режима нагрева с минимальным расходом топлива и учетом ограничений на температуру печи качественно совпадают и для тонкого, и для массивного тел; режим нагрева, характеризующийся минимальным топливопотреблением, соответствует неизменной тепловой мощности печи при монотонном росте температуры греющей среды и температуры металла; для режима работы печи с минимальным количеством образующейся окалины нагрев поверхности изделия идет по закону экспоненты до момента ограничения предельным значением; наискорейший нагрев массивных изделий осуществляется при задании кусочно-постоянного управляющего воздействия.

Как правило, при решении задач с использованием принципа максимума производится линеаризация задач теплопроводности, допускается неизменность теплофизических свойств металла, применимость линейных граничных условий II и III рода, упрощение геометрических характеристик изделия и др.

Метод **линейного программирования** определяет систему переменных величин, минимизирующих заданную линейную форму (целевую функцию) при наличии ограничений всех переменных и их линейных комбинаций.

Таким образом решена задача нагрева термически тонкого тела в многозонной печи при теплообмене конвекцией между металлом и греющей средой с целью минимизации суммарного расхода топлива [8].

Для оптимизации многостадийных процессов нагрева металла (нагрев заготовок в секционных печах) более эффективно использование метода **динамического программирования** [9]. Суть подхода заключается в такой оптимизации многостадийного процесса, чтобы результаты были оптимальны для всего процесса в целом, а не только для отдельных его стадий. Это достигается поэтапной оптимизацией процесса, начиная с последних стадий, при соблюдении принципа оптимальности Беллмана: если режим многостадийного процесса является оптимальным на завершающей стадии, то он будет оптимальным для процесса в целом.

Методом динамического программирования решена задача оптимизации установившегося режима многозонной печи [10] исходя из заданной ее производительности, определенных размеров зон, геометрических размеров и физических характеристик

металла. Критерием оптимальности процесса выбран суммарный по всем зонам печи расход тепла. Задача решена для тонкого тела. Поиск оптимального распределения температур металла и греющей среды по длине печи осуществлялся в два приема: обратной и прямой "прогонки" по зонам печи. "Прогонка" предшествовала стадия нахождения допустимых температур металла в каждой зоне печи, что позволило учесть ограничения задачи и сузить область переменных при поиске экстремума.

Преимущество метода динамического программирования по сравнению с методом вариационного исчисления заключается в возможности оптимизации процессов, обладающих ограничениями типа неравенств. По сравнению с методом линейного программирования динамическое программирование характеризуется большей универсальностью и экономичностью расчетов на ЭВМ. Ограничением для применения этого метода является резкое возрастание объема вычислений при постановке двух-, трехмерных задач (при оптимизации переходных процессов в методических печах необходимо варьировать параметры металла и греющей среды по времени и длине печи).

Особый интерес представляет собой **метод магистральной асимптотической оптимизации** [11, 12], который свободен от некоторых недостатков, свойственных описанным выше методам оптимизации процессов нагрева, и хорошо зарекомендовал себя при решении ряда промышленных задач оптимизации.

Если в некоторой системе автоматического управления с интегральным критерием качества, описываемой обыкновенными дифференциальными уравнениями, область изменения фазовых координат ограничена, то при наличии избытка времени функционирования системы оптимальная траектория будет стремиться находиться в той области фазового пространства, где это выгодно с точки зрения критерия оптимальности. В этом случае мы получаем режим поведения системы, независимый от граничных условий и наиболее выгодный по приращению функционала, — магистраль.

Основной принцип метода магистральной оптимизации заключается в разбиении всей траектории задачи с закрепленными концами на три участка: начальный участок выхода на магистральный режим, участок магистрального режима, участок схода с него. Центральный (основной) участок траектории определяется асимптотическими свойствами оптимальных траекторий, а крайние — граничными условиями.

Широкое распространение получили различные асимптотические методы оптимального управления [13—15]: метод усреднения, метод малого параметра, метод предельной корректности и др.

Возможность использования аппарата данной магистральной теории в задачах управления процессами нагрева металла вытекает из того, что время

нахождения металла в печи часто оказывается намного больше минимально необходимого времени нагрева до заданной конечной температуры. Появляется возможность декомпозиции задачи оптимального управления на более простые подзадачи.

Среди траекторий нагрева металла можно выделить такие, которые стремятся к магистрали с увеличением времени нагрева. При этом нахождение на оптимальных траекториях, стремящихся к магистрали или совпадающих с ней, дает минимум функционала качества.

С помощью приемов асимптотической магистральной оптимизации решен ряд задач теплообмена [16—25]: задача управления нагревом стержня, пластины с квадратичным критерием качества; задача о быстродействии для систем с распределенными параметрами; задача о минимуме величины окисины, расхода топлива и химического тепла топлива при учете двухсторонних ограничений на температуру печи; задача нагрева массивного цилиндра с учетом ограничений на упругопластические температурные напряжения и т. д.

Применение асимптотического метода также открывает перспективу нового подхода к синтезу оптимальных и квазиоптимальных регуляторов [26].

Методика решения задачи аналитического конструирования оптимальных регуляторов (АКОР) может быть использована для решения задачи минимизации рассогласования температур при выдержке металла в камерных печах [27], получении заданных на многообразии характеристик интервальных значений температур, обеспечивающих требуемую точность нагрева, при нагреве тела от некоторой начальной температуры до требуемой.

Обобщая сказанное выше, следует отметить необходимость и актуальность задач оптимального управления процессами термообработки металла. Управляемый оптимальным образом процесс позволяет значительно сократить непроизводительные потери сырья, энергии, материалов, обеспечить наибольшую эффективность использования современного оборудования, получить требуемые технологические характеристики производимого металла с максимальным быстродействием (качеством), что в целом ведет к значительному снижению себестоимости выпускаемой продукции.

Литература

1. Бутковский А. Г., Малый С. А., Андреев Ю. Н. Управление нагревом металла. М.: Металлургия, 1981.
2. Бардыбахин А. И. Наискорейший и экономичный нагрев металла с учетом влияния окисления на теплообмен // Автоматика и телемеханика. 1983. № 6. С. 32—41.
3. Бардыбахин А. И. Оптимальный по расходу топлива нагрев металла в нагревательном колодце // Изв. вузов СССР. Черная металлургия. 1990. № 3. С. 96—99.
4. Понтрягин Л. С., Болтянский В. Г., Гамкрелидзе Р. В. Математическая теория оптимальных процессов. М.: Наука, 1976.
5. Бутковский А. Г., Гольдфарб Э. М., Гескин Э. С. Применение принципа максимума для оптимизации температурного режима печей // Изв. вузов. Черная металлургия. 1967. № 3. С. 173—177.
6. Тайц Н. Ю., Гузов Л. А., Ольшанский В. М., Борбоц Ю. С. Выбор режима нагрева металла с минимальным расходом топлива // Изв. вузов. Черная металлургия. 1975. № 4. С. 164—167.
7. Малый С. А. Экономичный нагрев металла. М.: Металлургия, 1967.
8. Гольдфарб Э. М., Гескин Э. С. Оптимизация температурных режимов пламенных печей методами линейного и квадратичного программирования // Изв. вузов СССР. Черная металлургия. 1965. № 1. С. 159—163.
9. Беллман Р., Калаба Р. Динамическое программирование и современная теория управления. М.: Наука, 1969.
10. Гольдфарб Э. М., Гескин Э. С. Применение метода динамического программирования для оптимизации температурного режима печей // Изв. вузов СССР. Черная металлургия. 1966. № 1. С. 175—182.
11. Панасюк А. И., Панасюк В. И. Асимптотическая оптимизация нелинейных систем управления. Мн.: БГУ, 1977.
12. Панасюк А. И., Панасюк В. И. Асимптотическая магистральная оптимизация управляемых систем. Мн.: Наука и техника, 1986.
13. Плотников В. А. Асимптотические методы в задачах оптимального управления. Одесса: Изд-во ОГУ, 1976.
14. Первозванский А. А., Гайцгори В. Г. Декомпозиция агрегирования и приближенная оптимизация. М.: Наука, 1979.
15. Панченков А. Н. Основы теории предельной корректности. М.: Наука, 1976.
16. Тимошпольский В. И., Ковалевский В. Б., Трусова И. А. и др. Управление режимом нагрева массивного цилиндра с учетом ограничений на упругопластические напряжения // Изв. вузов. Энергетика. 1987. № 9. С. 81—86.
17. Ковалевский В. Б., Панасюк В. И., Седако О. Ю. Алгоритм решения задачи нагрева тел с минимальным расходом топлива // Изв. вузов. Энергетика. 1990. № 10. С. 86—90.
18. Тимошпольский В. И., Ковалевский В. Б., Стеблов А. Б. и др. Оптимальное управление температурными режимами цилиндра с внутренним источником теплоты // Изв. вузов. Энергетика. 1990. № 12. С. 79—86.
19. Бабушкин Ф. М., Ковалевский В. Б. Алгоритм решения задачи оптимального управления нагревом заготовок в проходных печах // ИФЖ. 1991. Т. 61, № 2. С. 199—203.
20. Бабушкин Ф. М., Ковалевский В. Б., Седако О. Ю. Об одном подходе к решению задачи о быстродействии // Автоматика и телемеханика. 1992. С. 190—193.
21. Ковалевский В. Б., Тимошпольский В. И., Стеблов А. Б. и др. Оптимальный по расходу теплоты режим нагрева металла в камерных печах // Энергетика (Изв. вузов и энерг. объедин. СНГ). 1992. № 3. С. 108—112.
22. Тимошпольский В. И., Трусова И. А., Несенчук А. П., Фоменко А. П. Оптимизация режимов тепловой обработки сортовой стали в печах с шагающими балками и колодцах контролируемого охлаждения с позиций сокращения расхода топлива // Литье и металлургия. 1999. № 3. С. 55—60.
23. Хо Ж., Ковалевский В. Б., Вайс Р. Б. Оптимальный по минимуму окисления нагрев тел цилиндрической формы // Энергетика (Изв. вузов и энерг. объедин. СНГ). 1992. № 11—12. С. 101—104.
24. Тимошпольский В. И., Трусова И. А., Вайс Р. Б. и др. Оптимизация режимов нагрева специальных марок сталей по минимуму окисинообразования // Литье и металлургия. 1999. № 3. С. 13—18.
25. Теплотехнология металлургических мини-заводов / В. И. Тимошпольский, Ю. В. Феоктистов, А. Б. Стеблов и др. Мн.: Наука і техника, 1992.
26. Ковалевский В. Б., Козлов С. М. К решению задачи аналитического конструирования оптимальных регуляторов // Дифференц. уравнения. 1997. № 7. С. 1002—1003.
27. Ковалевский В. Б., Козлов С. М. Минимизация рассогласования при выдержке металла в камерных печах // ИФЖ. 1999. Т. 72, № 5. С. 980—982.