

РАЗРАБОТКА И ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОКОНТУРНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОХЛАЖДЕНИЕМ МЕТАЛЛА ПРИ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКЕ ТОЛСТЫХ ЛИСТОВ И ПОЛОС

З.Г. Салихов, А.Л. Генкин, И.В. Никулина (Москва)

Введение

Одной из важнейших задач использования имитационного моделирования на практике, в том числе при решении задач управления технологическими процессами, является возможность исследования эффективности дополнительных контуров управления. При строительстве и автоматизации объектов металлургической промышленности, вследствие их высокой материало- и энергоемкости, предварительно разрабатывают имитационную модель, с помощью которой одновременно исследуют изменение показателей технологического процесса и возможные варианты управления им [1]. Такое комплексное исследование позволяет избежать многих ошибок при внедрении принципиально новых технологий и, в то же время, синтезировать оптимальные по соответствующим критериям новые режимы и интеллектуальные системы управления.

Постановка задачи

Толстые горячекатаные листы и полосы предназначены для производства труб большого диаметра в газонефтяной отрасли, а также в гражданском и транспортном строительстве, энергетике, судостроении, ВПК и других отраслях промышленности. Возросшие требования к качеству толстых стальных листов и полос заключаются, по большому счету, в необходимости обеспечить заданные физико-механические свойства по всему сечению листа, поскольку основной причиной брака толстолистовых прокатных изделий является неравномерная кристаллическая структура металла. Для повышения качества стальных листов и полос в прокатном производстве используют технологический регламент, в основе которого лежат определенные режимы прокатки и охлаждения металла.

Одним из современных толстолистовых прокатных станов является стан 5000, технологическая линия которого включает участок печей для подогрева слитков, реверсивную клеть для прокатки металла и рольганг для перемещения и регулируемого (контролируемого) охлаждения раскатов. Наличие установки контролируемого охлаждения (УКО) на рольганге значительно расширяет возможности выбора оптимального режима прокатки с учетом всех требований к листу. Исполнительным органом УКО является специальная двухсекционная система спрейерного (водо-воздушного) контролируемого охлаждения металла в потоке. Функциональная схема технологической линии стана 5000, представленная на рис. 1, состоит из участка печей и n участков обработки металла, каждый из которых включает зону прокатки и зону регулируемого охлаждения [2].



Рис. 1. Функциональная схема технологической линии стана 5000

Такое разделение обусловлено тем, что прокатка в реверсивной клети осуществляется за n проходов, заданных технологическим регламентом. Иными словами, нагретый в печах слиток прокатывается и охлаждается попеременно n раз, причем режимы прокатки и охлаждения регламентированы технологической инструкцией.

Анализ показал [2, 3], что по ряду причин применяемое на стане 5000 водо-воздушное охлаждение является достаточно грубым инструментом регулирования температуры металла и не позволяет обеспечить его высокое качество. Предложенный группой специалистов различных организаций под руководством проф. З.Г. Салихова принципиально новый способ теплосъема позволяет во многом устранить основные недостатки водо-воздушного охлаждения, вследствие чего появляется возможность более тонкого управления температурой металла. Основная суть этого способа заключается в том, что в качестве исполнительного органа для охлаждения металла используются не установки водо-воздушного охлаждения, а специальные полые металлические ролики, контактирующие с поверхностями плоского металла.

Геометрические размеры и места расположения их полностью совпадают с традиционными цельными роликами ролгангов. Технологическая модернизация заключается лишь в замене цельных роликов полыми, заполненными теплопроводными шарами, создающими турбулентность потока охладителя и обеспечивающими высокие прочностные свойства полых роликов.

Измерение температуры пропускаемого через эти ролики турбулентного потока воды (на входе ролика и выходе из него) позволяет напрямую определять количество тепла, отданное полосой [3], тем самым обеспечивая высокую точность прогнозирования температуры металла в линии его обработки (прокатки и охлаждения) на стане 5000. Изменение интенсивности пропускаемого через ролик потока воды обеспечивает возможность регулирования равномерного теплосъема с поверхности полосы по любому желаемому алгоритму по заданию металлоспециалистов.

Кроме того, использование охлаждающего ролика, в отличие от форсунок, практически обеспечивает бесперебойную работу и предотвращает деформацию элементов ролика даже в случае остановки процесса прокатки.

Целью данной работы является разработка и моделирование системы управления охлаждением металла на стане 5000 с использованием возможностей нового контура регулирования температуры полосы в линии прокатки.

Формализация моделирования системы управления станом 5000

В формализованном виде технологическая линия попеременной прокатки и охлаждения металла (см. рис. 1) может быть представлена в виде последовательного соединения n звеньев, каждое из которых характеризуется фазовым вектором многомерного фазового пространства. Координаты вектора фазового состояния каждого звена – геометрические, теплотехнические и энергосиловые параметры прокатки и охлаждения металла, которые должны подчиняться условию фазового ограничения (совокупностью допустимых фазовых состояний каждого звена). Управление процессом состоит из совокупности обжатий и охлаждения металла для каждого звена, причем управляющие воздействия должны принадлежать допустимой области управлений, определенной ограничениями на координаты вектора фазового состояния соответствующего звена.

Управление технологическим процессом при горячей прокатке полос традиционно разделяют на две стадии: исходную настройку процесса и ее коррекцию

[4]. Исходная настройка должна обеспечить некоторый оптимальный в определенном смысле режим обработки металла, а ее параметры определяются заранее. Коррекция исходной настройки, осуществляемая на основе получаемой в процессе прокатки и охлаждения информации, должна обеспечить поддержание оптимального режима обработки металла при отклонении параметров процесса от расчетных значений, что при использовании форсуночного регулирования охлаждением, по существу, не достигается. С использованием данной концепции и преимуществ предлагаемого нового принципа охлаждения и появления наблюдаемости результатов управления, очевидна необходимость построения модели системы с применением нескольких контуров управления параметрами процесса.

Разработка структуры многоконтурной системы управления охлаждением металла

В соответствии с предназначением системы, для ее реализации предлагаются три контура управления охлаждением раската, представленные на рис. 2:

1. Контур выбора *траектории* охлаждения в соответствии с технологическим регламентом на обработку конкретного раската, включающий *ассоциативную*[5] «Базу 5» сценариев охлаждения металла (базу знаний), блок 7 прогнозирования управляющих решений и блок 6 моделирования теплового баланса.

2. Контур управления охлаждением по измеряемым коэффициентам теплоотвода и температуре поверхности, состоящий из комплекса 3 средств контроля температуры поверхности раската, блока 6 моделирования теплового баланса, блока 7 оперативного управления, блока 8 упреждения (упреждающего управления) и комплекса 9 локальных модульных систем автоматического регулирования ($САР_j$) или элементов общей схемы охлаждения (j – текущий номер зоны охлаждения).

3. Контур идентификации *траекторий* охлаждения по результатам анализа качества металла (анализ темплетов на наличие дефектов и равномерность макро- и микроструктуры металла), состоящий из комплекса 1 известных средств обнаружения дефектов, системы распознавания дефектов 2, блока 4, использующего новые принципы интеллектуальных алгоритмов адаптивной динамической идентификации параметров математических моделей и объекта управления [5], и ассоциативной Базы 5 для накопления сценариев охлаждения металла.

Очевидно, что первый контур управления обеспечивает исходную настройку процесса, а второй и третий – ее коррекцию.

Рассмотрим более подробно функционирование системы.

1-й контур выбора траектории охлаждения или изменения температуры поверхности раската функционирует на основании результатов имитационного математического моделирования теплового баланса, проводимого исходя из начальных условий обработки металла H . Для этого до начала обработки металла на стане 5000 сформирована ассоциативная «База 5» сценариев охлаждения (база *траекторий* охлаждения), в которой содержатся разработанные технологами и металловедомы рациональные или оптимальные траектории – программы охлаждения раската вдоль технологической оси его продвижения.

Данные траектории сгруппированы в пространстве состояний объекта управления (охлаждаемого раската в УКО) с использованием методов кластерного анализа и ассоциированы с балансowymi оценками теплового состояния раската (определяемого расчетами на модели исходя из начальных условий и режимов охлаждения в УКО, в совокупности реализующих вышеупомянутые условия формирования управляющих и регулирующих воздействий). Затем выбирают из

кластера семейств упомянутых траекторий одну из траекторий охлаждения в Базе 5 сценариев охлаждения, наиболее подходящую для данного металла (как первичное задание для системы охлаждения).

С использованием известных моделей в блоке 6 моделирования теплового баланса, рассчитывают количество теплоты, которое необходимо отвести от раската в УКО. Выбранная траектория передается через блок 7 оперативного управления в виде задания Q_3 во второй контур, где она будет уточняться в процессе ее исполнения.

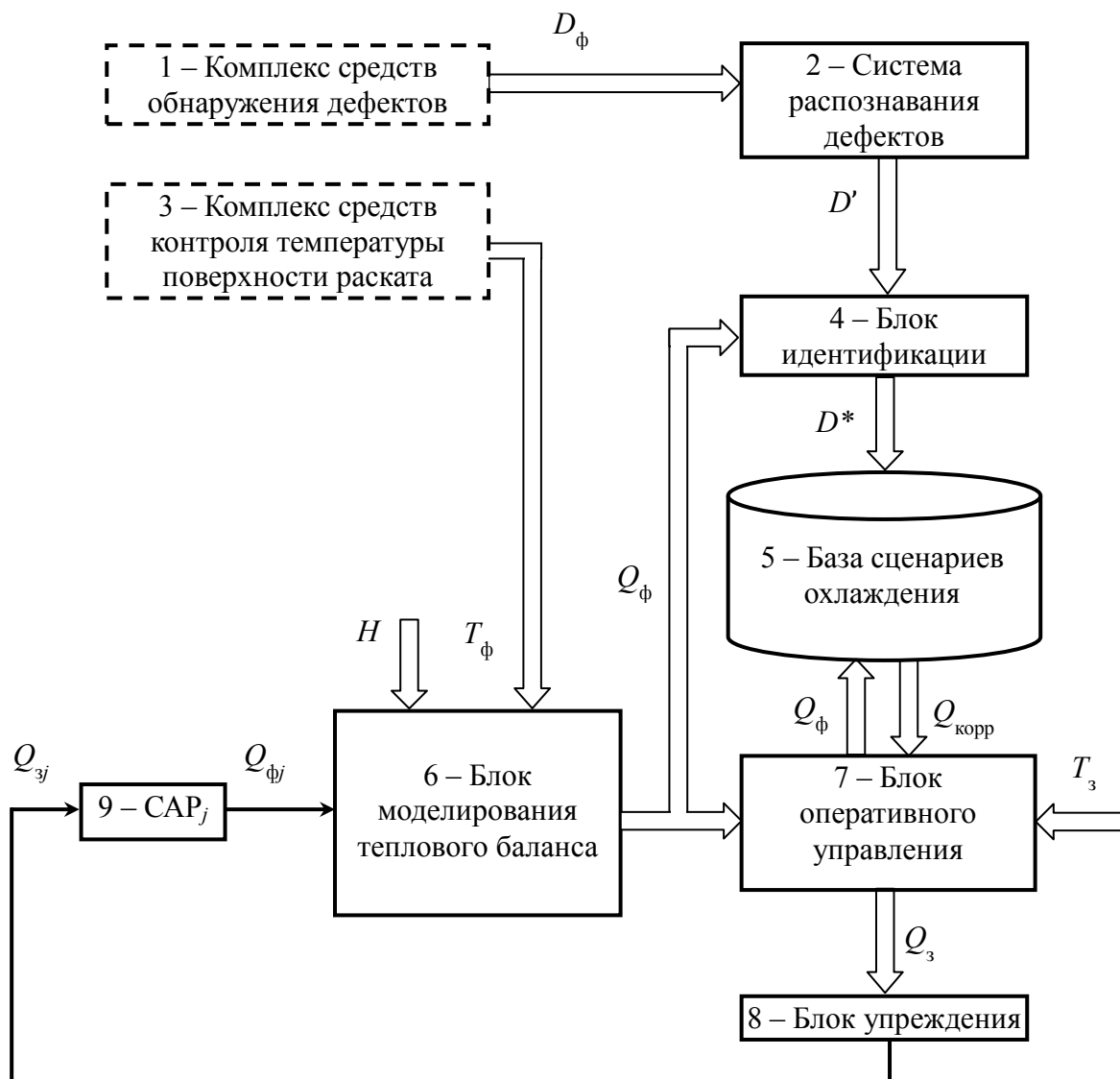


Рис. 2. Общая функциональная схема управления охлаждением раската

2-й контур исполнения заданной траектории охлаждения реализуется в замкнутой системе с несколькими обратными связями.

Поскольку выполнение заданной траектории изменения температуры поверхности раската жестко коррелируется с количеством снятого тепла с раската, расход хладагента, подаваемого на охлаждение раската, рассчитывают из условия минимального отклонения реальной (в нашем случае – контролируемой в реальном времени) расчетной траектории температуры раската. Т.к. имеется возможность

непрерывного измерения величины теплосъема, ее задают и измеряют в функции последующих координат местонахождения раската, т.е. определяют задание на изменение температуры поверхности слитка для последующей зоны охлаждения с учетом условий безградиентного перехода на последующую зону.

Температуру поверхности раската T_{ϕ} непрерывно измеряют любым прибором прямого – значит, точного контроля, с помощью комплекса 3 средств контроля температуры поверхности раската, например, стационарными тепловизорами. Затем в реальном времени измеряют отклонение от выбранной или заданной траектории и вносят, с использованием блоков 6, 7 и 8 на исполнительные механизмы комплекса 9 систем автоматического регулирования ($САР_j$) локальных (j -ых) элементов схемы охлаждения корректирующие воздействия Q_{sj} . Непрерывно измеряют в блоке 6 косвенными (расчетными с использованием приборных данных) методами величину теплоотвода от раската. Такая последовательность операций дает технический эффект – точный контроль величины теплоотвода от раската, и тем самым позволяет обеспечить повышение точности результатов моделирования теплового состояния слитка до приборной точности используемых средств контроля. Причина появления этого технического эффекта в том, что в существующих моделях теплопроводности в качестве граничных условий используют граничные условия первого рода. Например, температура в известных системах берется либо из абстрактных (не привязанных к конкретным непрерывным измерениям в реальном времени) моделей прогноза температуры раската, либо экстраполируется исходя из точечных измерений температуры, получаемых от установленных в межсекционных пролетах пирометров или другими известными приборами контроля. Предлагаемая нами последовательность непрерывного контроля величины теплоотвода с раската обеспечивает непрерывное измерение высокоточными и простыми (например, термометрами сопротивления) приборами прямого измерения температуры охладителя, что позволяет однозначно и точно задать граничные условия второго рода в зонах и точках охлаждения горячего раската. Использование точных, реальных и адекватных граничных условий позволяет радикально повысить точность и достоверность результатов применяемых моделей. Кроме того, использование достоверных граничных условий позволяет проводить точное моделирование с получением достоверных результатов прогноза о состоянии технологических параметров по всей длине технологической оси, не допуская разрывов в температурных кривых, что исключает накопительную ошибку прогнозирования, обычно возникающую при «сшивке» соседних участков температурного графика после моделирования. Такие технические результаты, как показывает опыт, обеспечивают выполнение заданных траекторий охлаждения без появления градиентов температуры, как по толщине раската, так и по его длине.

Предложенный комплекс мер позволяет формировать управляющие воздействия, обеспечивающие точное и оперативное управление охлаждением, исходя из внутреннего состояния раската в каждой точке технологической оси. Управление осуществляется путем периодической коррекции локальной траектории охлаждения по полученным адекватным данным о состоянии раската. Обобщенная оценка «качества» траектории охлаждения как оценки отклонений фактических характеристик раската от заданных передается в 3-й контур, где осуществляется идентификация системы.

В **3-ем контуре** идентификация траекторий охлаждения осуществляется путем пересчета траекторий охлаждения по результатам работы 2-го контура.

Во-первых, фактическая траектория охлаждения Q_{ϕ} сопоставляется в блоках 7 и 5 с траекторией, взятой в качестве опорной или рациональной T_3 . По величине отклонений $Q_{\text{корр}}$ принимается решение о включении фактически полученной

траектории в семейство (кластер) или о создании нового кластера (если отклонения слишком велики), т.е. произвести самонастройку рациональной траектории (в кластере) съема тепла от раската.

Во-вторых, по результатам металловедческой экспертизы темплетов (с помощью комплекса 1 средств обнаружения дефектов D_{ϕ} и системы 2 распознавания дефектов D') определяется общее качество предлагаемой траектории охлаждения (оценивание производится по принятым на заводе методикам) исходя из наличия дефектов, микро- и макроструктуры сляба. Эти оценки качества D^* также ассоциируются с принятым за основу кластером задаваемых управляющих траекторий (траекторий охлаждения Q_{ϕ}). Таким образом, при описанной последовательности (оценке) анализа качества работы системы осуществляется ее идентификация в блоке 4 (в широком смысле этого слова).

Выводы

Имитационное моделирование разработанной системы управления, проведенное для широкого сортамента толстых полос в условиях прокатки на стане 5000, показало, что реализация описанного выше алгоритма обеспечивает не только подстройку технологических параметров под текущие условия производства, но и осуществляет постоянную самоорганизацию системы управления путем перегруппировки и смещения существующих кластеров управляющих траекторий по результатам оценки качества их реализации, а также автоматического создания новых кластеров в ассоциативной базе знаний. Такие свойства разработанной системы подтверждают самообучение системы управления в стадии идентификации. Научная новизна и практическая значимость приведенных результатов подтверждается многочисленными патентами, полученными в рамках выполнения данной работы.

Литература

1. Плотников А.М., Рыжиков Ю.И., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Анализ современного состояния и тенденции развития имитационного моделирования в Российской Федерации (по материалам конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД)) // Труды СПИИРАН, Выпуск № 2 (25), Санкт-Петербург, 2013, с. 42-112.
2. Салихов З.Г., Газимов Р.Т., Генкин А.Л. Автоматизированная экологически чистая технология охлаждения металла при производстве проката / Труды 12-го Всероссийского совещания по проблемам управления (ВСПУ XII, Москва, 2014). М.: ИПУ РАН, 2014. С. 4360-4365.
3. Салихов З.Г., Газимов Р.Т., Демин А.В. Структура САУ роликвым охлаждением горячего металла // Автоматизация в промышленности. 2012. № 5. С. 60-63.
4. Генкин А.Л. Моделирование и оптимизация процесса горячей прокатки полос. – М.: ЛЕНАНД, 2012. – 168 с.
5. Nataliya N. Bakhtadze, Vladimir V. Kulba, Igor. B. Yadikin, Vladimir A. Lototsky, Evgeny M. Maximov. Identification methods based on associative search procedure / Control and Cybernetics. MPER Special Issue on Knowledge-based management in production network. 2011. Pp. 6-18.