

С. М. Андреев, канд. техн. наук, доц., зав. каф., М. С. Галдин, аспирант,
ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Г. И. Носова", г. Магнитогорск

Структурный синтез системы упреждающего управления тепловым режимом валковой разливки стали

Рассмотрен структурный синтез системы управления тепловым режимом разливки стали на валковом литейно-прокатном агрегате. Предложена структурная схема и алгоритм работы упреждающей системы управления, использующей в своей основе математическую модель процесса валковой разливки. Выполнено моделирование работы системы управления в динамических режимах работы агрегата при внешних контролируемых и неконтролируемых воздействиях.

Ключевые слова: валковая разливка стали, упреждающее управление, математическое моделирование, управление по модели

Введение

Для современного этапа развития мировой черной металлургии характерна постепенная смена стратегии консолидации производства стали на крупных интегрированных предприятиях в пользу создания компактных и гибких технологических модулей. Основоположающими ориентирами развития являются повышение качества и расширение сортамента металлопродукции, увеличение производительности, энергоресурсосбережение и охрана окружающей среды.

Одним из видов металлургических заводов, наиболее полно отвечающих текущим требованиям и тенденциям, являются предприятия по производству плоского проката, в состав которых входят валковые литейно-прокатные агрегаты (ВЛПА) [1].

Технология валковой разливки стали основана на идее прямого совмещения процессов литья и прокатки с использованием первородной теплоты заготовки для реализации контролируемой прокатки.

Схема расположения оборудования на валковом литейно-прокатном агрегате (ВЛПА) представлена на рис. 1. Технологический процесс производства можно описать следующим образом. Жидкий металл из промежуточного ковша попадает в валковый кристаллизатор, конструктивно состоящий из двух расположенных параллельно друг другу валков, которые вращаются в противоположные стороны и образуют разливочную ванну расплавленного металла. На выходе из кристаллизатора полностью затвердевшая полоса проходит через петленакопитель и тянущие ролики в прокатную клетку. Далее следует участок ламинарного охлаждения, резки и смотки на моталках [2, 3].

Особое внимание при производстве металлопродукции на ВЛПА необходимо уделять системе управления тепловым режимом разливки, который является одним из важнейших критериев, определяющих как качество непрерывнолитой полосы и ход самого процесса производства, так и условия эксплуатации оборудования [4].

Основное и главное требование к управлению тепловым режимом валковой разливки стали заключается в том, чтобы на выходе из кристаллизатора полоса полностью затвердела. Иначе повышается риск прорыва жидкого металла из разливочных валков, что является аварийной ситуацией процесса.

В целях получения требуемых прочностных, пластических и вязких свойств стали на ВЛПА реализуется прямая горячая прокатка полосы с использованием технологии контролируемой прокатки. Данная технология, в первую очередь, подразумевает выполнение заданных тепловых режимов прокатки, а именно обеспечение среднемассовой температуры полосы перед прокаткой в диапазоне 1050...1150 °C [5]. На существующих промышлен-

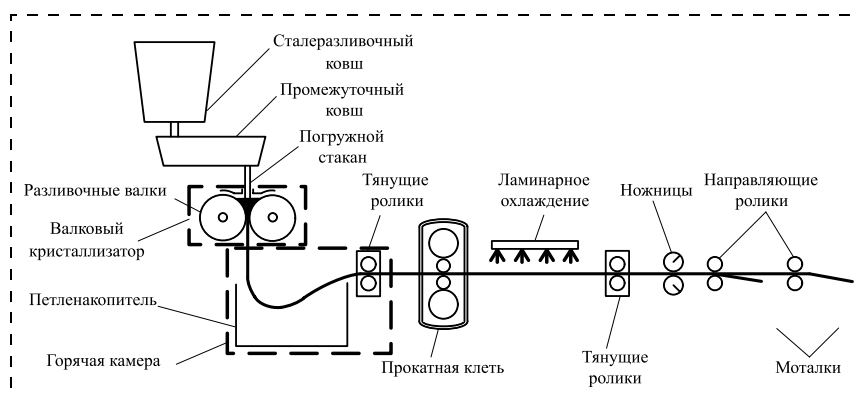


Рис. 1. Схема расположения оборудования ВЛПА

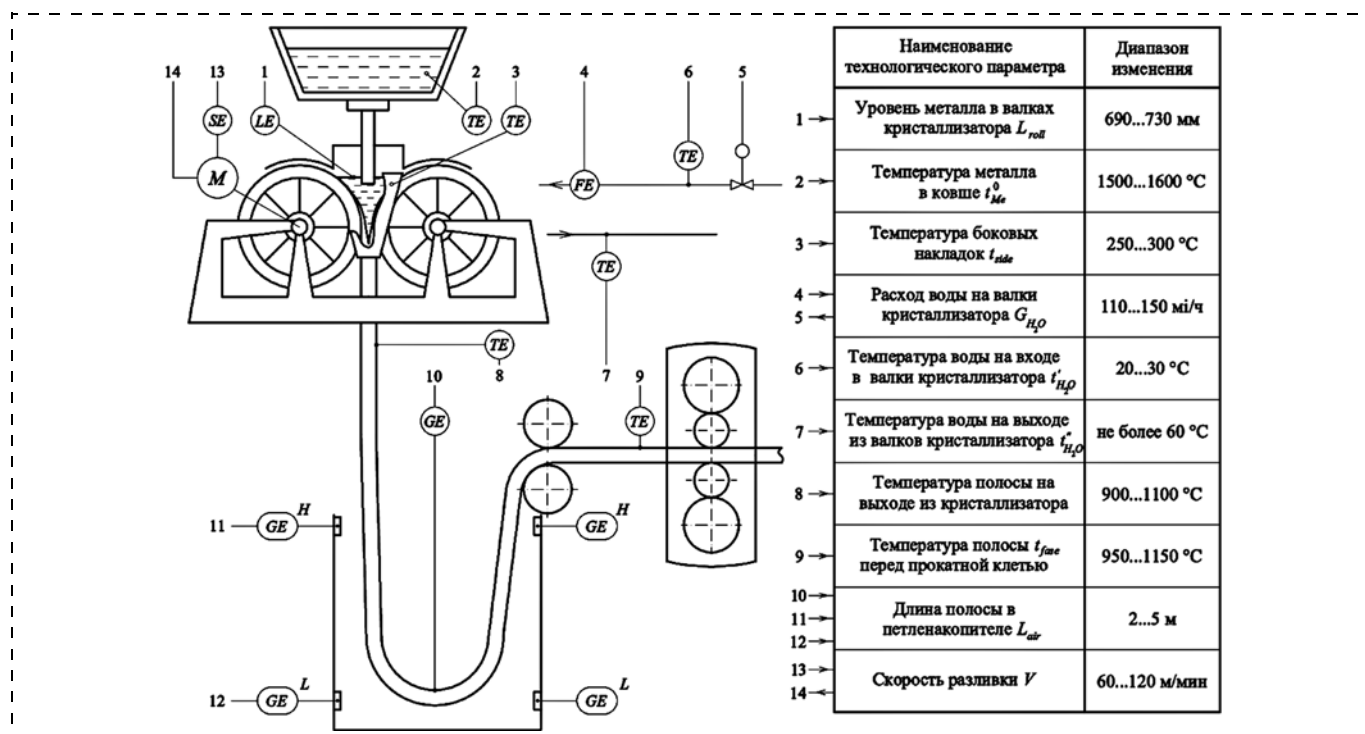


Рис. 2. Функциональная схема управления тепловым режимом разливки на ВЛПА

ных ВЛПА данные требования реализуются путем использования установки подогрева полосы после петленакопителя перед станом горячей прокатки. Однако любая дополнительная технологическая операция, тем более такая, как нагрев, влечет за собой дополнительные затраты и, как следствие, увеличение себестоимости производимой полосы.

Для того чтобы минимизировать или даже полностью исключить данные затраты, охлаждение полосы нужно организовывать таким образом, чтобы получить заданное тепловое поле без использования подогрева заготовки.

Функциональная схема управления тепловым режимом валковой разливки стали представлена на рис. 2. Схемой предусмотрено выполнение следующих функций:

- измерение и контроль параметров разливки, а именно: температуры расплава в промежуточном ковше, уровня металла в валках кристаллизатора, температуры боковых удерживающих на-

кладок, температуры (на входе и выходе) и расхода воды на охлаждение кристаллизатора, длины полосы в петленакопителе, температуры разливаемой полосы на выходе из кристаллизатора и перед прокатной клетью, скорости разливки;

- управление тепловым режимом разливки посредством изменения скорости разливки и расхода воды на валки кристаллизатора.

Рассматриваемый технологический процесс можно представить в виде структурной схемы объекта управления, изображенной на рис. 3.

В качестве объекта управления выступает тепловой режим валковой разливки стали, который характеризуется следующими переменными:

- входными контролируемыми управляемыми параметрами X ;
- выходным показателем процесса, в качестве которого выступает величина среднemasсовой температуры полосы t_{mm} перед прокатной клетью;
- входными неконтролируемыми и неуправляемыми переменными Z , характеризующими влияние на тепловой режим разливки внешних возмущающих воздействий.

В качестве объекта управления тепловой режим валковой разливки стали характеризуется большим транспортным запаздыванием из-за использования петлевого накопителя полосы и малой инерционностью, связанной с высокой скоростью разливки. Из теории автоматического управления [6] известно, что устойчивость и качество процесса регулирования определяются, главным образом, отношением запаздывания τ к постоянной времени объекта T . Данное соотношение определяет сложность управляемости объекта и является критерием вы-

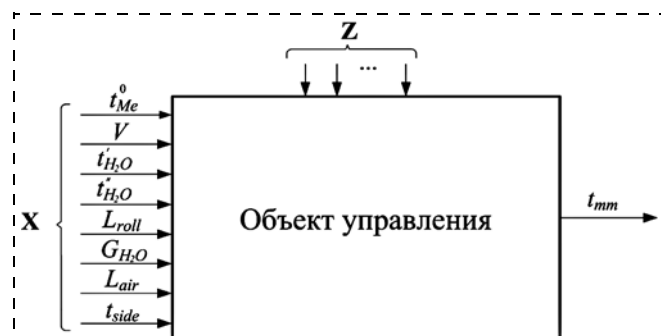


Рис. 3. Структурная схема технологического процесса валковой разливки стали

бора типа и закона регулирования. Для валковой разливки стали выполняется неравенство $\tau/T > 0,5$, поэтому можно утверждать, что такие типовые законы регулирования как П, И, ПИ, ПД или ПИД не в состоянии обеспечить необходимых показателей процесса управления [7, 8]. В связи с этим повысить качество управления можно либо путем уменьшения соотношения τ/T , что для реального процесса не представляется возможным, либо за счет применения специальной системы более сложной структуры, включающей модель объекта управления.

Также к специфическим особенностям технологии валковой разливки стали, оказывающим негативное влияние на управление и устойчивость, относятся нелинейность и сложность математической модели теплового режима разливки и распределенность технологических параметров с жестко накладываемыми на них ограничениями [9].

Разработка системы управления агрегатом подобного типа является на сегодняшний день весьма сложной задачей, требующей применения специальных систем, основанных на новых принципах управления.

1. Анализ существующих систем управления тепловым режимом разливки

Технология валковой разливки стали для производства плоского проката, являясь одной из самых перспективных на данный момент, получила свое распространение и развитие, главным образом, за рубежом [10].

Объем известных отечественных разработок в этой области черной металлургии весьма невелик и ограничен. В частности, можно выделить научно-исследовательские работы на базе АХК "ВНИИМЕТМАШ им. академика А. И. Целикова" [11] и ОАО "Институт Цветметобработка" [12, 13], которых на текущий момент времени для перевода валковой технологии на промышленную основу не достаточно.

Вместе с тем, число зарубежных исследований, направленных на совершенствование и улучшение качественных показателей валковой разливки стали как за счет конструктивных и технологических изменений, так и за счет разработок систем автоматического управления, включающих системы управления тепловым режимом разливки, постоянно увеличивается [2, 3, 9, 14...17].

В работе [14] управление тепловым режимом предлагается реализовывать за счет контроля количества "мягкого материала", под которым подразумевается область центральной части разливаемой полосы с высокой остаточной теплотой. Регулирование осуществляется путем изменения зазора в зоне контакта между литейными валками в соответствии с измеренной температурой поверхности полосы на выходе из кристаллизатора. Недостатком данного способа управления является непостоянство толщины разливаемой полосы, а также тот

факт, что коррекция осуществляется только после отклонения контролируемого параметра от требуемых значений, что в конечном итоге негативно скажется на качестве производимой продукции.

Для устранения этого недостатка (реализации управления только после фактических отклонений контролируемых параметров) авторами работы [15] предлагается использовать тепловую модель, максимально приближенную к реальным условиям разливки. На основании исходных и измеренных технологических параметров разливки проводится моделирование, по результатам которого возможно выполнение необходимых корректировок.

В работе [16] предложено использование системы оптимального регулирования теплового режима разливки на базе статической модели процесса, для которой предусмотрено использование блока хранения архивных технологических параметров для подстройки к реальным условиям. Также в состав системы входит блок оптимизации, который в соответствии с заданным критерием обеспечивает получение заданных технологических параметров в установившемся режиме. Однако использование статической модели в системе управления не позволяет осуществлять эффективное управление в динамических режимах работы агрегата.

В основе системы [17] используется нечеткий регулятор с моделью, синтезированной на базе нейронных сетей, что позволяет уйти от разработки сложной детерминированной математической модели процесса, но требует наличия в достаточном объеме репрезентативной выборки и качественной лингвистической логической модели управления процессом.

Принимая во внимание требования, предъявляемые к организации процесса охлаждения заготовки на валковых агрегатах, а также выявленные в результате анализа недостатки рассмотренных существующих систем, авторы для управления тепловым режимом валковой разливки стали предлагают использовать упреждающую систему управления.

В теории упреждающего управления или управления по прогнозу выделяют два основных класса систем [18]. К первому классу относятся беспероисковые системы управления, рассмотренные, в частности, в работах В. Н. Букова [19], О. Дж. Смита и Дж. Ресвика [20, 21].

В работе Букова [19] предложена система управления, особенностью которой является использование в подсистеме оптимального регулирования, находящейся в обратной связи, эталонной и прогнозирующей моделей процесса, функционирующих в ускоренном времени. Сам процесс оптимизации осуществляется циклически через короткие интервалы расчета и реализации управляющих воздействий. К недостаткам данной системы можно отнести ограничения по части применимости к технологическим объектам, а именно непрерывным и линейным, а также отсутствие явного учета технологических пределов.

В системах регулирования О. Дж. Смита и Дж. Ресвика [20, 21] предложено разделение модели объекта на модели с учетом запаздывания и без, что позволяет определять управляющие воздействия для получения требуемого процесса регулирования с максимальной точностью, но требует высокой степени соответствия используемой модели управляемому технологическому объекту.

Ко второму классу упреждающих систем управления относятся поисковые системы, рассмотренные, в частности, в работах А. А. Перельмана [22]. Для данных систем характерен поиск управляющих воздействий путем перебора возможных вариантов с использованием прогнозирующей модели объекта управления в ускоренном масштабе времени. К недостаткам поисковых упреждающих систем управления можно отнести значительный объем выполняемых вычислений и сложность разработки математической модели.

2. Структурный синтез упреждающей системы управления

Для управления тепловым режимом валковой разливки стали предлагается использовать упреждающую систему управления, относящуюся к классу поисковых и использующую в своей основе математическую модель процесса. В зарубежной литературе данная группа систем управления обозначается как *MPC*-системы (от *Model-Based Predictive Control*).

Применительно к управлению тепловым режимом валковой разливки стали можно выделить сле-

дующие преимущества использования *MPC*-систем [23...28]:

- управление средними и крупными технологическими объектами с взаимосвязанными технологическими параметрами и значительным временем запаздывания;
- явный учет ограничений при определении управляющего воздействия;
- адаптивность к постоянно изменяющимся условиям работы;
- обеспечение лучшего качества управления и быстродействия за счет использования как текущих значений контролируемых параметров, так и будущих, полученных в результате прогноза.

Принцип упреждающего управления на основе модели базируется на идее применения модуля прогнозирования для определения ожидаемых состояний объекта управления в будущем. В качестве модуля прогнозирования в *MPC*-системах выступает модель объекта управления, использующая как прошедшие, так и текущие значения управляющих, задающих и контролируемых технологических параметров [24].

Структурная схема предлагаемой упреждающей системы управления тепловым режимом валковой разливки стали представлена на рис. 4.

Система состоит из двух основных блоков — блока оптимизации и управления (БОУ) и блока слежения и настройки (БСН).

БОУ выполняет функции поиска оптимальной скорости разливки V в соответствии с текущим заданием среднemasсовой температуры полосы t_{mm}^{sp} перед прокаткой. Определение управляющего воз-

действия выполняется путем решения задачи оптимизации в замкнутом контуре в постоянно удаляющемся подвижном горизонте прогноза. Таким образом, управление осуществляется в режиме реального времени. Критерием оптимизации является минимизация целевой функции

$$J(\varepsilon, \Delta V) \rightarrow \min,$$

где ε ($\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$) — вектор рассогласований между заданным значением среднemasсовой температуры перед прокаткой и расчетным на каждом интервале горизонта прогноза; ΔV ($\Delta V_1, \Delta V_2, \dots, \Delta V_n$) — вектор изменений скоростей разливки на каждом интервале горизонта прогноза.

Для управления тепловым режимом разливки наиболее важным является тепловое состояние полосы непосредственно перед прокатной клетью, поскольку изменение тепло-содержания полосы приведет к изменению пластических свойств прокатываемого металла и, как следствие, давления металла на валки прокат-

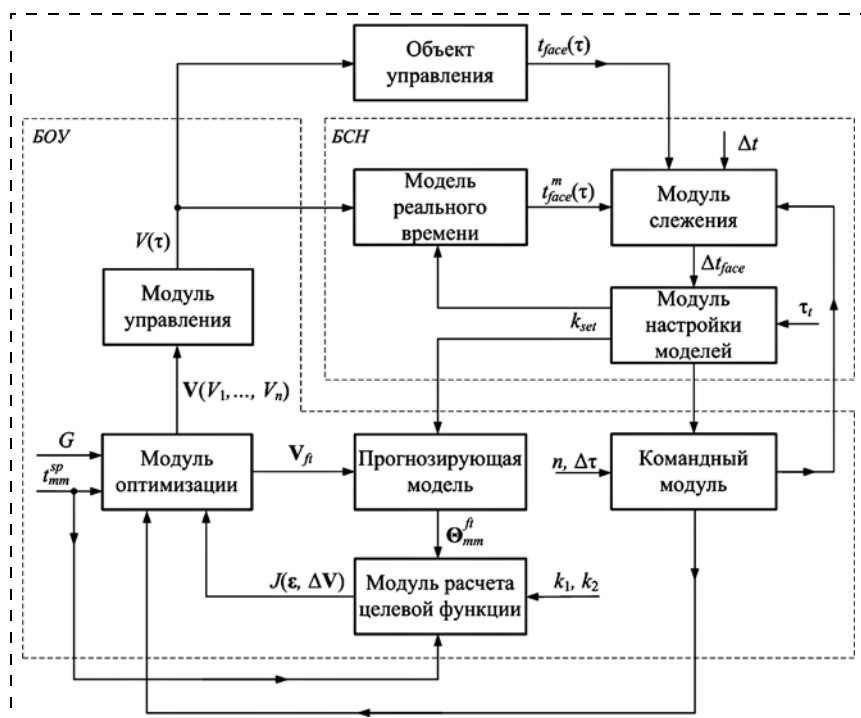


Рис. 4. Структурная схема упреждающей системы управления тепловым режимом разливки стали на ВЛПА

ной клетки и непостоянству толщины полосы на выходе из клетки [29].

Предлагаемой системой управления тепловым режимом работы ВЛПА для корректировки моделей используется температура поверхности полосы перед прокатной клетью. Температура полосы на выходе из кристаллизатора используется при первоначальной настройке и калибровке системы для обеспечения соответствия условий теплопередачи, используемых моделями, реальным условиям. В процессе регулирования в реальном масштабе времени данный параметр необходимо только контролировать для предотвращения режимов работы, приводящих к аварийным ситуациям разливки.

Модулем слежения, входящим в состав БСН, реализуется постоянный контроль соответствия измеренных значений температуры поверхности непрерывнолитой полосы перед прокатной клетью

$t_{face}(\tau)$ и аналогичных расчетных значений $t_{face}^m(\tau)$, определяемых моделью реального времени. Основным параметром настройки данного модуля является зона нечувствительности Δt , при превышении которой модуль слежения активирует модуль настройки путем передачи ему информации о модуле и знаке рассогласования, определяемого выражением $\Delta t_{face}(\tau) = t_{face}(\tau) - t_{face}^m(\tau)$. На основании полученной информации модуль настройки выполняет корректировку используемых системой моделей прогноза и реального времени путем аддитивного смещения их статической характеристики. При этом в целях предотвращения некорректной работы БСН в модуле настройки вводится таймер, равный времени выдержки τ_b , в течение которого корректировка не реализуется. Таким образом, данный алгоритм работы и взаимодействия модулей слежения и настройки позволяет компенсировать неконтролируемые возмущения, приводящие к смещению статической характеристики в процессе разливки.

Рассмотрим алгоритм работы предлагаемой системы.

1. В отсчетный момент времени на начальном этапе командный модуль активизирует работу БСН, который при необходимости проводит настройку модели установочным коэффициентом k_{set} .

2. На основании горизонта прогноза T , численно равного произведению выбранного числа шагов разбиения n и времени каждого шага $\Delta\tau$, командным модулем активируется работа модуля оптимизации, который с учетом накладываемых на процесс технологических ограничений G выполняет поиск скоростей разливки $\mathbf{V}$ на каждом интервале горизонта прогноза. Поиск проводится с использованием прогнозирующей модели, функционирующей в ускоренном времени и выполняющей экстраполяцию теплового режима разливки на время прогнозирования. В основе модуля оптимизации использован метод деформируемого много-

гранника (метод Нелдера—Мида), характеризующийся как один из самых эффективных с отсутствием ограничений на вид целевой функции [30].

3. Полученный вектор $\mathbf{V}$ поступает на модуль управления, который на каждом интервале управления $i = 1, 2, \dots, n$ применяет соответствующее значение текущей скорости разливки $I(\tau)$. При достижении окончания горизонта прогноза повторяются шаги 1...3.

4. При превышении несоответствия, определяемого разницей между $t_{face}(\tau)$ и $t_{face}^m(\tau)$, зоны нечувствительности Δt модуля слежения активируется работа модуля настройки и корректируются модели, после чего инициализируется работа командного модуля, начиная с шага 2. Проводится обновление информации и поиск управляющих воздействий на новом горизонте прогноза. При этом в модуле настройки взводится таймер на время выдержки τ_b , в течение которого корректировка моделей не выполняется. Время выдержки определяется, главным образом, транспортным запаздыванием объекта.

Отличительной особенностью предлагаемой структуры системы управления по сравнению с существующими [18...22] является применение командного модуля и его взаимодействие с модулями слежения и настройки моделей, обеспечивающими выполнение оптимизации в реальном времени с контролем соответствия используемых моделей реальным условиям.

3. Результаты моделирования

Для моделирования процесса управления тепловым режимом валковой разливки стали был разработан MPC-регулятор на основе математической модели [9, 31] и структурной схемы упреждающей системы управления. Алгоритм регулирования реализован на языке программирования высокого уровня и включает в себя структурно все модули и полный функционал описанной системы управления.

Моделирование работы системы в целом выполняли в программном комплексе *VisSim*. В качестве объекта управления была использована модель теплового режима валковой разливки стали [9, 31]. Модель рассчитывает температурное поле полосы в режиме реального времени в соответствии с параметрами разливки и скоростью, полученной от MPC-регулятора. Выходным параметром модели и входным для регулятора является температура поверхности полосы $t_{face}(\tau)$.

При вычислениях были приняты следующие параметры валковой установки:

- радиус разливочных валков $R = 1500$ мм, что соответствует параметрам агрегата, функционирующего в г. Крефельд, Германия [5];
- разливаемая сталь Ст3;
- уровень металла в кристаллизаторе 730 мм;
- толщина разливаемой полосы 6 мм;

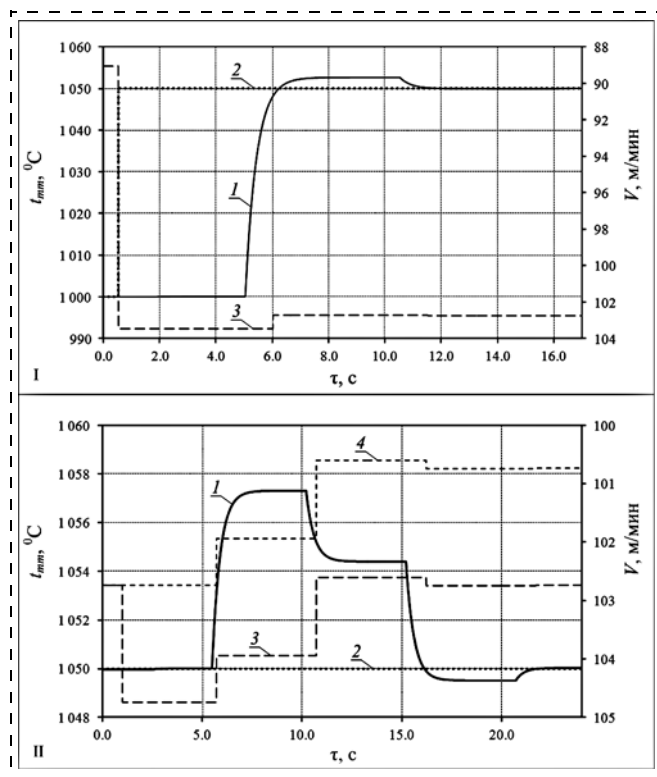


Рис. 5. Полученные в результате моделирования переходные процессы при изменении задания (I) и возмущении по каналу управления (II):

1 — полученная среднemasовая температура перед прокаткой; 2 — заданная среднemasовая температура перед прокаткой; 3 — скорость разливки, приходящая на объект; 4 — скорость разливки с MPC-регулятора

- общая протяженность зоны от валков кристаллизатора до прокатной клетки 8 м.

Результаты моделирования работы системы управления в виде графиков переходных процессов изменения среднemasовой температуры полосы t_{mm} перед прокатной клетью и соответствующей ей скорости разливки представлены на рис. 5, 6.

В блоке I рис. 5 изображены результаты работы системы при изменении задания среднemasовой температуры полосы перед прокаткой с 1000 °C до 1050 °C. Время регулирования составило 11,5 с, перерегулирование — 2,2 °C.

В блоке II рис. 5 изображены результаты работы системы при возникновении возмущения со стороны управляющего воздействия, что может соответствовать неконтролируемому изменению расхода воды на охлаждение валкового кристаллизатора. Время регулирования составило 21 с, перерегулирование — 7,6 °C.

В блоках III и IV рис. 6 изображены результаты работы системы при ступенчатом и линейном смещениях статической характеристики объекта управления соответственно. Ступенчатое смещение статической характеристики при управлении тепловым режимом может быть вызвано неконтролируемым изменением температуры металла в промежуточном ковше. Линейному смещению статической ха-

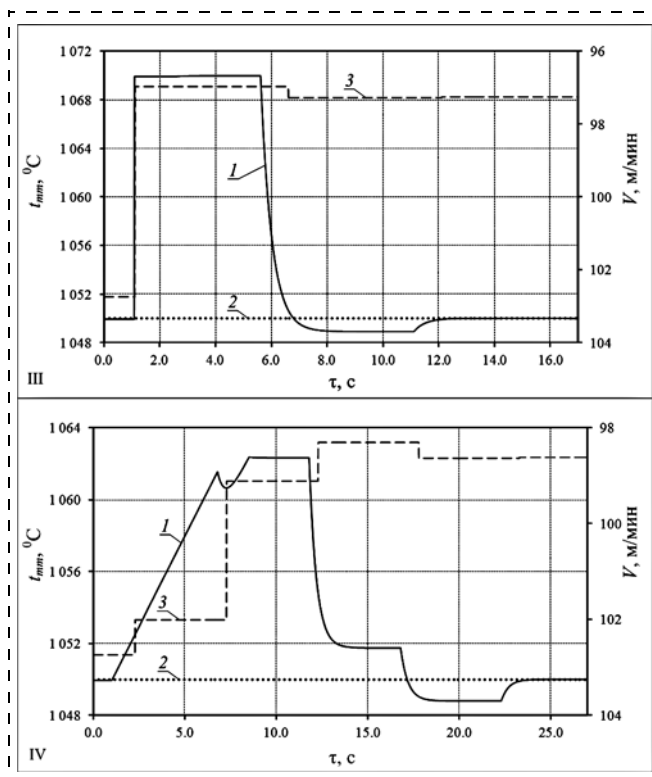


Рис. 6. Полученные в результате моделирования переходные процессы при ступенчатом (III) и линейном (IV) неконтролируемых смещениях статической характеристики:

1 — полученная среднemasовая температура перед прокаткой; 2 — заданная среднemasовая температура перед прокаткой; 3 — скорость разливки, приходящая на объект с MPC-регулятора

рактеристики объекта соответствует, например, изменение условий теплопередачи на участке воздушного охлаждения в горячей камере.

На основе полученных результатов моделирования процессов управления тепловым режимом валковой разливки стальной полосы можно сделать выводы о том, что предложенная система упреждающего управления обеспечивает устойчивость переходных процессов и достаточную точность регулирования температурой полосы при контролируемых и неконтролируемых внешних воздействиях и наличии значительного транспортного запаздывания, вызванного перемещением полосы от валкового кристаллизатора до прокатной клетки.

Заключение

Предлагаемая система предназначена для управления тепловым режимом валковой разливки на основе математической модели процесса. Система управления позволяет согласовать температурно-скоростные режимы процессов разливки и прокатки, а также реализовать технологию контролируемой прокатки на ВЛПА за счет получения требуемой среднemasовой температуры полосы перед прокаткой в динамических режимах работы агрегата при различных внешних воздействиях.

Применение упреждающей системы на основе предложенной структурной схемы позволит повысить качество производимой металлопродукции и увеличить серийность плавок за счет организации оптимального температурного режима и управления по прогнозу модели, а не по факту отклонений контролируемых параметров.

Список литературы

1. **Смирнов А. Н., Сафонов В. М., Дорохова Л. В., Цупрун А. Ю.** Металлургические мини-заводы. Донецк: Норд-Пресс, 2005. 469 с.
2. **Killmore C. R., Creely H., Phillips A., Kaul H.** Development of ultra thin cast strip products by the Castrip process // Materials forum. 2008. Vol. 32. P. 13—28.
3. **Zugbhi H., Mahapatra R.** Comparison of Castrip energy consumption and greenhouse gas emissions with conventional strip production technologies // Interoffice report of Castrip LLC, Sept. 2008.
4. **Ткаченко В. Н.** Математическое моделирование, идентификация и управление технологическими процессами тепловой обработки материалов. Т.13. Сер. "Задачи и методы: математика, механика, кибернетика". Киев: Наукова думка, 2008. 244 с.
5. **Коновалов Ю. В.** Справочник прокатчика. Справочное издание в 2-х книгах. Кн. 1. Производство горячекатаных листов и полос. М.: Теплотехник, 2008. 640 с.
6. **Ротач В. Я.** Теория автоматического управления: Учеб. для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2008. 396 с.
7. **Гурецкий Х.** Анализ и синтез систем управления с запаздыванием: Пер. с польского. М.: Машиностроение, 1974. 328 с.
8. **Денисенко В.** ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации // Современные технологии автоматизации. 2007. № 1. С. 78—88.
9. **Галдин М. С.** Математическая модель теплового режима валковой разливки стали / М. С. Галдин, С. М. Андреев // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 10. С. 34—41.
10. **Ганьжин В., Киселев Ю.** Технология XXI века. Перспективы России // Национальная металлургия. 2003. Янв. — февр. С. 77—86.
11. **Протасов А. В., Сивак Б. А.** Электрометаллургические мини-заводы. М.: Триада Импресо, 2012. 500 с.
12. **Бровман М. Я., Николаев В. А., Полухин В. П., Нижник Н. В.** Технологические особенности формирования полосы в валковых литейно-прокатных агрегатах // Прогрессивные технологии в металлургии стали: XXI век: Тр. 3-й междунар. науч.-техн. конф. Донецк: ДонНТУ, 2007. С. 289—294.
13. **Николаев В. А.** Исследование процесса бесслитковой прокатки стальной полосы с целью определения эффективных технологических и конструктивных параметров: дис. канд. техн. наук. М., 2008. 193 с.
14. **Блэйд У., Махапатра Р. Б., Шлицтинг М.** Способ и устройство для регулирования скачка температуры в литой полосе. Патент России № 2557379. 2015. Бюл. № 20.
15. **Этцельсдорфер К., Хоенбихлер Г., Химани К., Хубмер Г. Ф., Ауцингер Д.** Способ непрерывного литья. Патент России № 2301129. 2007. Бюл. № 17.
16. **Hannes Schulze Horn, Jurgen Adamy.** Intelligent computerized control system. Патент США № 6085183. 2000.
17. **Werner Kuttner, Friedemann Schmid, Hannes Schulze Horn, Kurt Hohendahl, Thomas Berger, Immo Domnig.** Continuous casting and rolling system including control system. Патент США № 6044895. 2000.
18. **Кулаков С. М., Бондарь Н. Ф., Трофимов В. Б.** Типология функциональных структур систем управления с прогнозированием // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2005. № 6. С. 54—60.
19. **Буков В. Н.** Адаптивные прогнозирующие системы управления полетом. М.: Наука, 1987. 232 с.
20. **Киселев С. Ф., Мышляев Л. П., Соловьев В. И. и др.** Об испытаниях и настройке алгоритмов управления промышленными объектами // Автоматическое управление в АСУ ТП. М.: Энергоатомиздат. 1987. С. 28—31.
21. **Авдеев В. П., Кустов Б. А., Мышляев Л. П.** Производственно-исследовательские системы с многовариантной структурой. Новокузнецк: Кузбасс ФИАР, 1992. 188 с.
22. **Перельман И. И.** Оперативная идентификация объектов управления. М.: Энергоиздат, 1982. 272 с.
23. **Ding Bao-Cang.** Modern predictive control. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis, 2010.
24. **Казаринов Л. С., Парсункин Б. Н., Литвинова А. Е., Литвинов С. А.** Распределенное прогнозирующее управление технологическим процессом в металлургии // Автоматизация в промышленности. 2013. № 2. С. 54—59.
25. **Kouvaritakis B., Cannon M.** Model Predictive Control. Switzerland: Springer International Publishing, 2016. 377 p.
26. **Прохоренков А. М., Качала Н. М.** Построение прогнозирующих моделей систем управления теплоэнергетическими объектами // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2011. Т. 14, № 3. С. 546—551.
27. **Mayne D. Q., Rawlings J. B., Rao C. V., Scolaert P. O. M.** Constrained model predictive control: Stability and optimality // Automatica. 2000. Vol. 36. P. 789—814.
28. **Joe Qin S., Badgwell T. A.** A survey of industrial model predictive control technology // Control Engineering Practice. 2003. N. 11. P. 733—764.
29. **Восканьянц А. А.** Автоматизированное управление процессами прокатки. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. 85 с.
30. **Данилин А. И.** Методы оптимизации [Электронный ресурс]: электрон. учеб. пособие. Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т), 2011.
31. **Галдин М. С., Андреев С. М.** Исследование теплового режима разливки непрерывнолитых полос по математической модели процесса на валковом литейно-прокатном агрегате // Вестник Иркутского государственного технического университета. Иркутск: ГОУ ВПО "ИРГУ". 2013. № 2. С. 52—57.

Structure Synthesis of Twin-Roll Strip Casting Thermal Mode Predictive Control System

S. M. Andreev, pk_su@bk.ru, **M. S. Galdin**, galdin.mike@gmail.com✉,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, 455000 Russian Federation

Corresponding author: **Galdin Mikhail S.**, Postgraduate Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, 455000 Russian Federation, e-mail: galdin.mike@gmail.com

Received on October 22, 2016

Accepted on November 9, 2016

Thermal mode strip casting control is challenging at the present because twin-roll strip casting is characterized by the large time delay and high dynamics with low inertances. Nonlinearity and complexity of the thermal mode mathematical model, distribution and hard limitation of technological parameters are also the technology specific features and all it has a negative impact

on the control and stability of the casting process. Famous control systems don't fully allow ensure the implementation of given problems and need to be revised. Thermal mode control system development is the complex problem to date. Solution of this problem requires to use special systems based on the new control principles. Structural synthesis of model-based predictive control systems is created in this work. Distinctive features of the proposed structure control scheme are the command module application and its interaction with the monitoring and model setting modules, providing real-time optimization performance and checking used models conformity with the real casting conditions. The proposed control system allows to coordinate the casting and rolling processes temperature and speed modes. This system provides for the implementation of controlled rolling technology at twin-roll strip casting unit by obtaining the required mass-average temperature of the strip before rolling in dynamic modes of operation. On the basis of simulation results it was concluded that the proposed model-based predictive control system provides transient process stability and satisfactory temperature control accuracy with controllable and uncontrollable external influences and significant time delay caused by the strip movement from the casting mold to the hot-rolling stand.

Keywords: twin-roll strip casting, predictive control, mathematical modeling, model-based control

For citation:

Andreev S. M., Galdin M. S. Structure Synthesis of Twin-Roll Strip Casting Thermal Mode Predictive Control System, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 5, pp. 415–422.

DOI: 10.17587/mau.18.415-422

References

- Smirnov A. N., Safonov V. M., Dorohova L. V., Cuprun A. Ju. *Metallurgicheskie mini-zavody* (Metallurgical mini-plants), Doneck, Nord-Press, 2005, 469 p. (in Russian).
- Killmore C. R., Creely H., Phillips A., Kaul H. Development of ultra thin cast strip products by the Castrip process, *Materials forum volume*, 2008, vol. 32, pp. 13–28.
- Zughbi H., Mahapatra R. Comparison of Castrip energy consumption and greenhouse gas emissions with conventional strip production technologies, Interoffice report of Castrip LLC, Sept 2008.
- Tkachenko V. N. *Matematicheskoe modelirovanie, identifikacija i upravlenie tehnologicheskimi processami teplovoj obrabotki materialov* (Mathematical modeling, identification and process control of materials heat treatment), vol. 13, Ser. "Zadachi i metody: matematika, mehanika, kibernetika", Kiev, Naukova dumka, 2008, 244 p. (in Russian).
- Kononov Ju. V. *Spravochnik prokatchika. Spravochnoe izdanie v 2-h knigah. Kniga 1. Proizvodstvo gorjachechatanyh listov i polos* (Roller's hand-book. Reference work in 2 books. Book 1. Production of hot-rolled sheets and strips), Moscow, Teplotekhnika, 2008, 640 p. (in Russian).
- Rotach V. Ja. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya: Uchebnik dlja vuzov* (Automatic control theory: Textbook for High Schools), Moscow, Izdatel'skij dom MJeI, 2008, 396 p. (in Russian).
- Gureckij H. *Analiz i sintez sistem upravleniya s zapazdyvaniem* (Analysis and synthesis of control systems with time-delay), Moscow, Mashinostroenie, 1974, 328 p. (in Russian).
- Denisenko V. *PID-regulyatory: principy postroeniya i modifikacii* (PID-regulators: principles of construction and modification), *Sovremennye Tehnologii Avtomatizacii*, 2007, no. 1, pp. 78–88 (in Russian).
- Galdin M. S., Andreev S. M. *Matematicheskaja model' teplovogo rezhima valkovoj razlivki stali* (Mathematical model of thermal mode of twin-roll strip casting), *Mekhatronika, Avtomatizacija, Upravlenie*, 2014, no. 10, pp. 34–41 (in Russian).
- Gan'zhin V., Kiselev Ju. *Tehnologija XXI veka. Perspektivy Rossii* (The technology of the XXI century. Russia's perspectives), *Nacional'naja Metallurgija*, 2003, Janv.-fevr., pp. 77–86 (in Russian).
- Protasov A. V., Sivak B. A. *Elektrometallurgicheskie mini-zavody* (Electrometallurgical mini-plants), Moscow, Triada Impreso, 2012, 500 p. (in Russian).
- Brovman M. Ja., Nikolaev V. A., Poluhin V. P., Nizhnik N. V. *Tehnologicheskie osobennosti formirovaniya polosy v valkovyh litejno-prokatnyh agregatah* (Technological features of strip formation in twin-roll strip casting units), *Progressivnye Tehnologii v Metallurgii Stali: XXI vek: Trudy 3-j mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii*, Doneck, DonNTU, 2007, pp. 289–294 (in Russian).
- Nikolaev V. A. *Issledovanie processa besslittkovoj prokatki stal'noj polosy s cel'ju opredeleniya jeffektivnyh tehnologicheskikh i konstruktivnyh parametrov* (The process's Investigation of steel strip rolling with the purpose to determine the effective technological and design parameters): dis. kand. tehn. nauk, Moscow, 2008. 193 p. (in Russian).
- Bljeje U., Mahapatra R. B., Shlichting M. *Sposob i ustrojstvo dlja regulirovaniya skachka temperatury v litoj polose* (The method and apparatus for the temperature jump controlling in the casting strip), Patent Rossii № 2557379, 2015, Bjul. № 20.
- Jetcel'sdorfer K., Hoenbihler G., Himani K., Hubmer G. F., Aucinger D. *Sposob nepreryvnogo lit'ja* (Continuous casting method), Patent Rossii № 2301129, 2007, Bjul. № 17.
- Hannes Schulze Horn, Jurgen Adamy. Intelligent computerized control system, Patent SShA № 6085183, 2000.
- Werner Kuttner, Friedemann Schmid, Hannes Schulze Horn, Kurt Hohendahl, Thomas Berger, Immo Dornig. Continuous casting and rolling system including control system, Patent SShA № 6044895, 2000.
- Kulakov S. M., Bondar' N. F., Trofimov V. B. *Tipologija funkcional'nyh struktur sistem upravleniya s prognozirovaniem* (Functional structures typology of control systems with prediction), *Izvestija Vysshih Uchebnyh Zavedenij. Chernaja Metallurgija*, 2005, no. 6, pp. 54–60 (in Russian).
- Bukov V. N. *Adaptivnye prognozirujushhie sistemy upravleniya poletom* (Adaptive predictive flight control systems), Moscow, Nauka, 1987, 232 p. (in Russian).
- Myshljaev L. P. *Avtomaticheskoe upravlenie v ASU TP* (Automatic control in DCS), Moscow, Jenergoatomizdat, 1987, pp. 28–31 (in Russian).
- Avdeev V. P., Kustov B. A., Myshljaev L. P. *Proizvodstvenno-issledovatel'skie sistemy s mnogovariantnoj strukturoj* (Production-research systems with the multivariate structure), Novokuzneck, Kuzbass FIAR, 1992, 188 p. (in Russian).
- Perel'man I. I. *Operativnaja identifikacija ob'ektov upravleniya* (Operational identification of control objects), Moscow, Jenergoizdat, 1982, 272 p. (in Russian).
- Ding Bao-Cang. Modern predictive control, Boca Raton, CRC Press/Taylor & Francis, 2010.
- Kazarinov L. S., Parsunkin B. N., Litvinova A. E., Litvinov S. A. *Raspredelennoe prognozirujushhee upravlenie tehnologicheskimi processami v metallurgii* (Distributed predictive process control in metallurgy), *Avtomatizacija v Promyshlennosti*, 2013, no. 2, pp. 54–59 (in Russian).
- Kouvaritakis B., Cannon M. *Model Predictive Control*, Springer International Publishing Switzerland, 2016, 377 p.
- Prohorenkov A. M., Kachala N. M. *Postroenie prognozirujushhih modelej sistem upravleniya teplojenergeticheskimi ob'ektami* (Predictive models construction of the control systems for thermal power facilities), *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta*, 2011, vol. 14, no. 3, pp. 546–551 (in Russian).
- Mayne D. Q., Rawlings J. B., Rao C. V., Scokaert P. O. M. Constrained model predictive control: Stability and optimality, *Automatica*, 2000, vol. 36, pp. 789–814.
- Joe Qin S., Badgwell T. A. A survey of industrial model predictive control technology, *Control Engineering Practice*, 2003, vol. 11, pp. 733–764.
- Voskan'janc A. A. *Avtomatizirovanoe upravlenie processami prokatki* (Automated control of rolling processes), Moscow, Publishing house of MGTU im. N. Je. Bauman, 2010, 85 p. (in Russian).
- Danilin A. I. *Metody optimizacii* (Optimization methods), Samara, Samar. gos. ajerokosm. un-t im. S. P. Koroleva (nac. issled. un-t), 2011.
- Galdin M. S., Andreev S. M. *Issledovanie teplovogo rezhima razlivki nepreryvnolityh polos po matematicheskoi modeli processa na valkovom litejno-prokatnom agregate* (Researching thermal mode of strip casting at twin-roll unit based on mathematical model), *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta*, 2013, no. 2, pp. 52–57 (in Russian).