

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАК  
ИНСТРУМЕНТ МОНИТОРИНГА ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ  
НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ В  
ЗОНЕ ВТОРИЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ**

*Рассмотрено применение математической модели тепловой работы машины непрерывного литья заготовок в рамках системы автоматического управления технологическим процессом для мониторинга теплового состояния заготовок, формирующихся в зоне вторичного охлаждения. Решается вопрос определения уровня корректирующего воздействия на тепловое состояние заготовки путем изменения расхода охлаждающей воды на сектора зоны вторичного охлаждения при рассогласовании заданных и реальных параметров температурного состояния заготовки.*

*МАШИНА НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК, ЗОНА ВТОРИЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ, МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, ТЕПЛОЕ СОСТОЯНИЕ, МОНИТОРИНГ*

**Введение**

Сегодня математическое моделирование технологических процессов является одним из самых распространенных методов исследования. При решении как стандартных, так и принципиально новых вопросов зачастую преимущество по сравнению с проведением натуральных экспериментов отдается исследованиям при помощи численных экспериментов, что объясняется меньшими затратами на их проведение и более высоким уровнем информативности результатов.

Применительно к технологиям непрерывной разливки стали, которые начали развиваться примерно полвека назад, метод математического моделирования с самого начала занял ведущие позиции и сегодня известен положительный опыт использования множества математических моделей тепловой работы машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Спектр известных моделей характеризуется различной сложностью математического описания,

что связано со способом учета различных физических явлений, накладывающихся на решение основной задачи, эффективностью с алгоритмической точки зрения и т.д. [1-3].

### **Постановка задачи исследования**

Важнейшим направлением использования математических моделей является их применение при разработке алгоритмов управления технологическими процессами или как элемента алгоритма управления, при котором математическое моделирование процесса в реальном времени протекает параллельно технологическому процессу и несет функции мониторинга и определения уровня управляющих воздействий. Для получения непрерывнолитых заготовок с заданным уровнем качества необходима разработка высокоэффективных алгоритмов управления тепловой работой МНЛЗ на всей технологической оси, основными элементами которой являются кристаллизатор и зона вторичного охлаждения. В данной работе решается задача создания алгоритма управления тепловой работой ЗВО, основанного на использовании метода математического моделирования.

### **Изложение основного материала**

#### **Общие основы построения математической модели непрерывной разливки стали**

Тепловые процессы затвердевания и охлаждения непрерывнолитой заготовки описываются дифференциальным уравнением нестационарной теплопроводности. Наиболее распространенным является подход, согласно которому рассматривается затвердевание и охлаждение расчетного поперечного сечения заготовки, которое движется вдоль технологической оси МНЛЗ со скоростью вытягивания. Таким образом, при изучении формирования сортовых и слябовых заготовок, речь идет о решении дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности в прямоугольной системе координат и двухмерной постановке:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda_{\text{эф}}}{\rho \cdot c_{\text{эф}}} \cdot \left( \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность стали, кг/м<sup>3</sup>;

$\lambda_{\text{эф}}$  – эффективный коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

$c_{эф}$  – эффективная теплоемкость стали, Дж/(кг·К);

$y, z$  – оси симметрии поперечного расчетного сечения заготовки.

Учет выделения тепла фазового перехода в уравнении (1) производится за счет введения величины эффективной теплоемкости  $c_{эф}$  [1], а влияние гидродинамических процессов в жидкой лунке формирующейся заготовки учитывается при помощи величины коэффициента эффективной теплопроводности. Поставленная задача решается при помощи численных методов. Ее решение детально рассмотрено в работах [2, 3].

### **Идентификация математической модели при помощи средств пирометрии**

Процедура идентификации математической модели предшествует ее использованию для изучения влияния различных конструктивных и технологических факторов на тепловое состояние заготовки. Наиболее просто эта задача решается путем измерения температуры ряда точек на поверхности заготовки и корректировки параметров граничных условий по специальной схеме для достижения соответствия результатов моделирования и замеров в пределах заданной погрешности.

Отечественные МНЛЗ, как правило, не предусматривают систематический оперативный контроль температуры поверхности заготовок. Однако из опыта зарубежных предприятий известно, что наличие такой информации позволяет целенаправленно управлять процессом непрерывной разливки и своевременно идентифицировать отклонения в работе. Как правило, такие измерения реализуются при помощи пирометров, установленных в разрыв между секторами ЗВО.

Проблема выбора пирометров для реализации практических замеров достаточно дискуссионна, так как сегодня на рынке измерительной техники представлено достаточно много устройств, а требуемый диапазон измерений (700-1250°C) может быть обеспечен пирометром любого типа (радиационным, яркостным, спектрального отношения). Основное внимание, кроме стоимости прибора, следует обращать на такую характеристику пирометра как возможность защиты прибора от температурных нагрузок (водяное охлаждение корпуса, воздушный обдув пространства между объективом прибора и поверхностью заготовки и т.д.).

При использовании пирометров любого типа важным является вопрос минимизации погрешности измерения температуры

(измеряется условная температура, соответствующая абсолютно черному телу) и ее пересчета на действительное значение температуры реального тела. При этом необходимо учитывать возможность наличия окалины на поверхности заготовки, ослабления излучения от поверхности заготовки за счет поглощения и рассеяния, и т.д. Значительные методические сложности могут возникать при определении степени черноты поверхности металла (монохроматической или интегральной).

Идеальным с теоретической точки зрения представляется случай, когда пирометры устанавливаются в конце секторов ЗВО напротив каждой грани. Однако в условиях реальной МНЛЗ размещение пирометров напротив боковых граней заготовок практически невозможно из-за ограниченного расстояния между соседними ручьями. Поэтому можно установить пирометры напротив граней малого и большого радиуса или же ограничиться их установкой напротив грани малого радиуса.

На первом этапе это позволит уточнить задание граничных условий в ЗВО за счет уточнения характеристик форсунок на основании данных о температуре характерных точек на поверхности заготовки, полученных при помощи пирометров. Целесообразно решать задачу уточнения, последовательно добавляя в рассмотрение по одному сектору: сначала проводим моделирование для участка кристаллизатор и первый сектор ЗВО, в результате чего уточняем характеристику форсунок 1-го сектора. Далее проводим моделирование и соответственно уточнение для второго сектора и так далее.

Алгоритм решения данной задачи для случая без учета локальной неравномерности теплоотвода можно представить следующим образом:

– для конкретного расхода воды и соответственно плотности орошения при помощи зависимости:

$$\alpha = k \cdot g_f, \quad (2)$$

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи от поверхности заготовки к охлаждающей воде, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$k$  – коэффициент пропорциональности, Вт·ч/(м<sup>3</sup>·К);

$g_f$  – плотность орошения поверхности заготовки, м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·ч)

Переходим к коэффициенту теплоотдачи для ряда значений коэффициента  $k$ , например от 50 до 65 с определенным шагом;

– полученные коэффициенты теплоотдачи используем для задания граничных условий теплообмена для соответствующего сектора ЗВО;

– на основании сравнения результата замеров и моделирования выбираем вариант с наименьшим расхождением, который в наибольшей мере соответствует значению коэффициента  $k$  для форсунок установленных в рассматриваемом секторе.

Для случая с учетом локальной неравномерности теплоотода в качестве исходных данных для нахождения значения коэффициента теплоотдачи в области натекания факелов форсунок на поверхность заготовки используем результаты решения задачи, не учитывающей локальную неравномерность теплоотода.

На втором этапе будет получена возможность отслеживать протекание процесса формирования заготовки на основании сравнения результатов замеров температур пирометрами с результатами моделирования, представляющими собой эталонные значения температур. В случае возникновения рассогласования имеется возможность автоматической коррекции расходов воды на сектора вторичного охлаждения.

#### **Коррекция расходов воды на вторичное охлаждение для поддержания заданного теплового состояния заготовок**

Эта коррекция в принципе может быть осуществлена на основании только лишь разницы смоделированной и измеренной температур при помощи известных законов регулирования, тем более что непрерывно генерируемый сигнал  $\Delta T$  играет роль обратной связи. Однако любое регулирование становится более эффективным, когда при его реализации используется зависимость, позволяющая рассчитать требуемую величину корректировки управляющего фактора.

В рассматриваемом случае таким управляющим фактором является корректирующий расход охлаждающей воды на сектор ЗВО. Эта величина может быть как положительной, в случае если замеренная температура выше рекомендуемой, так и отрицательной в обратном случае. Для ее определения предложено использовать следующую логическую цепочку:

– на основании величины разности температур  $\Delta T$  предложено из рассмотрения теплового баланса корочки затвердевшего металла в пределах рассматриваемого сектора определять корректирующую плотность теплового потока:

$$\Delta q = \frac{\Delta T}{2} \cdot \delta_{cp} \cdot \rho \cdot c \cdot \frac{v}{L_s}, \quad (3)$$

где  $L_s$  – длина рассматриваемого сектора, м;

$\delta_{cp}$  – средняя толщина корочки металла в пределах рассматриваемого сектора, м;

$\rho, c$  – плотность и теплоемкость металла твердой корочки соответственно;

$v$  – скорость разливки металла, м/с

– при помощи закона Ньютона-Рихмана переходим от корректирующей плотности теплового потока к добавочному значению коэффициента теплоотдачи, а от него, используя зависимость (2), к корректирующему значению плотности орошения  $\Delta g_f$ ;

– от корректирующей плотности орошения переходим к корректирующему расходу воды на сектор (для сортовой заготовки):

$$\Delta G = 4 \cdot \frac{1000}{60} \cdot a \cdot L_s \cdot \Delta g_f, \quad (4)$$

где  $a$  – размер грани заготовки, м.

Пример использования предложенной зависимости (4) приведен на рис.1. Представленные результаты получены для следующих исходных данных, соответствующих разливке стали в сортовые заготовки на современной высокоскоростной МНЛЗ и нахождению заготовки в пределах 3-го сектора: длина сектора 4 м, скорость разливки 4 м/мин, сечение заготовки 130x130 мм, коэффициент пропорциональности в зависимости (2) 55 Вт·ч/(м<sup>3</sup>·К).

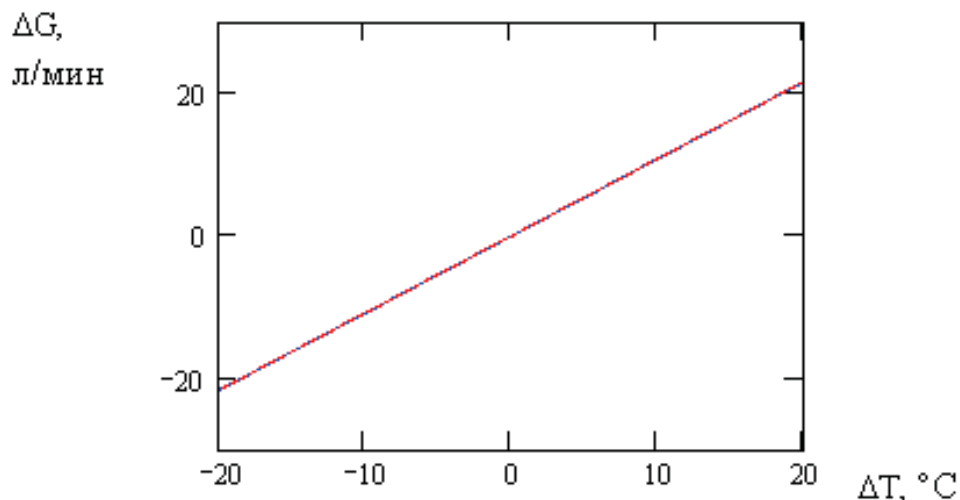


Рис. 1. Зависимость корректирующего расхода воды в зависимости от перепада измеренной и рекомендуемой температур

### **Выводы**

Рассмотрено применение математической модели тепловой работы машины непрерывного литья заготовок как вспомогательного инструмента для автоматического управления технологическим процессом и мониторинга теплового состояния заготовок, формирующихся в зоне вторичного охлаждения.

Разработан алгоритм идентификации математической модели при помощи средств пирометрии, что позволяет в последующем получать эталонные значения температуры поверхности заготовки для заданных технологических параметров.

Решен вопрос определения уровня корректирующего воздействия на тепловое состояние заготовки путем изменения расхода охлаждающей воды на сектора зоны вторичного охлаждения при рассогласовании заданных и реальных параметров температурного состояния заготовки.

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Емельянов В.А. Тепловая работа машин непрерывного литья заготовок: учебн. пособие для вузов / В.А. Емельянов. – М.: Металлургия, 1988. – 143 с.
2. Смирнов А.Н. Непрерывная разливка стали: Учебник /А.Н. Смирнов, С.В. Куберский, Е.В. Штепан.– Донецк: ДонНТУ, 2011.– 482 с.
3. Бирюков А.Б. Теплотехника ресурсоэнергосберегающей разливки стали / А.Б. Бирюков, В.В. Кравцов, Н.С. Масс.– Донецк: Ноулидж, 2010. – 206 с.