

Э. Ф. БАРАНОВСКИЙ, В. А. ПУМПУР,
ИТМ НАН БЕЛАРУСИ

The article describes technology of parametric identification of heat exchange at continuous casting of piece into a crystallizer of a "wheel-strand" type.

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТЕПЛОБМЕНА НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ПОЛОС В КРИСТАЛЛИЗАТОРЫ РОТОРНОГО ТИПА

УДК 669.18.046

Способ литья в роторные кристаллизаторы типа "колесо—лента" получил широкое распространение в производстве полос из цветных металлов. Такого рода установки применяются для выпуска больших объемов продукции, а для переработки получаемых лент в тонкий прокат непосредственно за агрегатом необходимо устанавливать стан горячей прокатки. Литейные модули таких агрегатов достаточно компактны, но многовалковые прокатные станы очень громоздки.

Поэтому проблема создания компактной литейной машины для получения готовых к использованию тонких полос без применения прокатных станов является актуальной. Для решения данной проблемы следует определить такие условия формирования отливки толщиной 4—12 мм при непрерывном литье в кристаллизатор типа "колесо—лента", при кото-

рых поверхность литых полос будет ровной и гладкой, без раковин, пористости и трещин. Потребительские свойства таких полос должны в основном соответствовать металлу полос горячей прокатки.

Разработана технологическая установка (см. рисунок), которая представляет собой кристаллизатор, состоящий из водоохлаждаемого изнутри колеса 1 с кольцевой выборкой на его наружной поверхности и охватывающей участок колеса бесконечной металлической ленты 3, которая с помощью роликов и натяжного устройства плотно прижимается к колесу. Выборка в колесе и перекрывающая ее на определенном участке лента создают ручей кристаллизатора, в котором происходит затвердевание и охлаждение отливки 2.

Условия формирования отливки в первую очередь зависят от геометрических, механических и теплофизических параметров кристаллизатора; интенсивности охлаждения внутренней поверхности колеса $\alpha_{1,в}$ и наружной поверхности рабочей ленты $\alpha_{3,в}$; условий контактного теплообмена отливки с рабочими поверхностями ленты $\alpha_{2,3}$ и колеса $\alpha_{2,1}$ [1].

С целью определения наиболее приемлемых условий формирования полосы разработана двумерная математическая модель теплообмена при непрерывном литье в роторный кристаллизатор [1]. Наиболее важным свойством математических моделей является степень соответствия выполненных с ее помощью расчетов экспериментальным данным. Создание адекватной математической модели является решением проблемы идентификации.

Параметрическая идентификация разработанной модели осуществлялась поэтапно: 1) для условий затвердевания отливки; 2) для условий ее охлаждения; 3) для условий охлаждения колеса кристаллизатора.

На первом этапе посредством проведения численных экспериментов производилась оценка влияния трех адаптивных параметров на время полного затвердевания отливки и толщину сформировавшихся корок со стороны ленты ξ_1 и колеса $\xi_{к0,1}$. Такими параметрами являются коэффициенты контактного теплообмена между отливкой и рабочими поверхностями колеса $\alpha_{2,1}$ и ленты $\alpha_{2,3}$; коэффициент конвективного теплообмена между водой и внут-

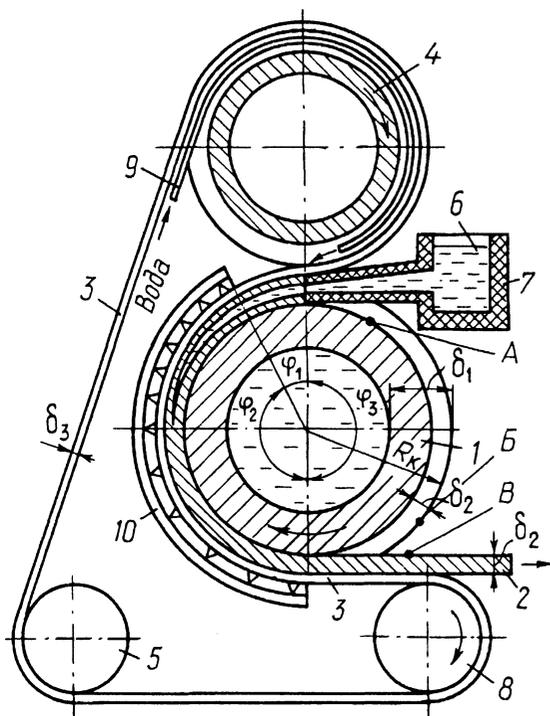


Схема непрерывного литья полосы в кристаллизатор типа "колесо—лента": 1 — формообразующее колесо; 2 — отливка; 3 — рабочая лента; 4 — прижимной ролик; 5 — натяжной ролик; 6 — расплав; 7 — питатель; 8 — приводной ролик; 9 — охладитель ленты верхний; 10 — охладитель ленты боковой. А, Б, В — места измерения температур колеса и полосы

ренной поверхностью колеса $\alpha_{1,в}$; коэффициент конвективного теплообмена на наружной поверхности ленты с водой $\alpha_{3,в}$. Результаты численных экспериментов показали, что влияние параметров $\alpha_{2,1}$ и $\alpha_{2,3}$ на время полного затвердевания отливки значительно больше, чем параметров $\alpha_{1,в}$ и $\alpha_{3,в}$, так же как влияние $\alpha_{3,в}$ значительно больше влияния $\alpha_{2,3}$ на динамику роста корки со стороны ленты. Влияние $\alpha_{1,в}$ на этапе затвердевания незначительно вследствие скоротечности процесса затвердевания отливки и намного большей толщины стенки колеса, чем толщина полосы.

На первом этапе осуществлялась идентификация параметров теплообмена $\alpha_{2,1}$, $\alpha_{2,3}$ и $\alpha_{3,в}$. При решении задачи принято, что коэффициенты теплообмена отливки с колесом и лентой одинаковы $\alpha_{2,1} = \alpha_{2,3} = \alpha_k$.

Построение полиномиальных зависимостей α_k от $\tau_{затв}$ и $\alpha_{3,в}$ от ξ_l проводилось на основе результатов численных экспериментов с помощью метода наименьших квадратов путем минимизации следующих критериев:

$$K_1 = \sum_{i=1}^N (\tau_{затв} - Y_1(\alpha_k))^2, \quad (1)$$

$$K_2 = \sum \xi_l (\tau_{затв} - Y_2(\alpha_{3,в}))^2, \quad (2)$$

где N — количество расчетных точек при изменении α_k от 3000 до 10 000 Вт/(м²·°С); $Y_1(\alpha_k)$, $Y_2(\alpha_{3,в})$ — полиномы, задаваемые в линейном или нелинейном виде.

Путем проведения экспериментов на реальной технологической установке определяли значения $\tau_{затв}^2$, ξ_l^2 и $\xi_{кол}^2$. Подставляя значение $\tau_{затв}^2$ в формулу (1), получаем среднее значение коэффициента контактного теплообмена α_k , а из зависимости (2) по $\xi_l^2(\tau_{затв})$ — значение $\alpha_{3,в}$.

Время затвердевания отливки $\tau_{затв}^2$ в кристаллизаторе находили расчетным путем по результатам замеров щупом малого сечения протяженности жидкой лунки в отливке. Толщину корок, затвердевших со стороны рабочей ленты и формообразующего колеса, определяли в поперечном сечении полосы, соответствующем расположению конца щупа, захваченного отливкой.

На втором этапе осуществляли параметрическую идентификацию параметра α_k для зоны охлаждения полосы по температуре ее поверхности $T_{пол}$ после съема с колеса, используя критерий

$$K_3 = \sum_{i=1}^N (T_{пол} - Y_3(\alpha_k))^2. \quad (3)$$

Температуру поверхности полосы $T_{пол}^2$ измеряли с помощью контактной термопары в точке B (см. рисунок). Измеренное значение $T_{пол}^2$ подставляли в формулу (3) зависимости α_k от $T_{пол}$ в зоне охлаждения отливки, полученную путем минимизации критерия K_3 .

На третьем этапе идентификации определяли значение коэффициента конвективного теплообмена внутренней поверхности колеса с водой $\alpha_{1,в}$ по той же методике. При этом использовали измеренные значения температуры наружной поверхности колеса, которые вычисляли с помощью термопар после снятия полосы с колеса и перед входом колеса в зону формирования отливки (см. рисунок, точки B и A).

Для условий литья цинковых полос толщиной 10 мм в кристаллизатор, состоящий из алюминиевого колеса диаметром 540 мм со стенкой толщиной 50 мм и стальной ленты толщиной 1,5 мм, при скорости вращения колеса 3,5 м/мин и температуре заливаемого расплава 470°С получена следующая регрессионная зависимость $T_{затв}$ от α_k для этапа затвердевания:

$$\tau_{затв} = -5,4 \cdot 10^{-4} \alpha_k + 12,1. \quad (4)$$

Для этапа охлаждения полосы определена зависимость температуры ее поверхности на выходе из кристаллизатора:

$$T_{пол} = -3,15 \cdot 10^{-2} \alpha_k + 280,5. \quad (5)$$

Располагая экспериментальными данными о времени затвердевания отливки $\tau_{затв}^2$, толщине затвердевших корок, температуре полосы на выходе из кристаллизатора $T_{пол}^2$ и температурах наружной поверхности колеса и используя полученные регрессионные зависимости, определяем усредненные значения параметров теплообмена элементов кристаллизатора с отливкой и водой на всех стадиях формирования полосы.

Так, при литье цинковой полосы толщиной 10 мм со скоростью 3,5 м/мин установлено, что время затвердевания отливки составляет 8,5 с; на колесе и ленте затвердело соответственно 5,2 и 4,8 мм цинка; температура полосы на выходе из кристаллизатора — 230°С, а температура колеса в точках B и A была соответственно 135 и 98°С. Для этих условий значение α_k в зоне затвердевания составило 6500 Вт/(м²·К), а в зоне охлаждения — 1600 Вт/(м²·К); значение коэффициента теплообмена колеса с водой составило 3600 Вт/(м²·К).

Литература

1. Барановский Э. В., Пумпур В. А. Математическая модель и программа расчета теплообмена при непрерывном литье полосы в кристаллизатор "колесо—лента" // Литье и металлургия. 2000. №1. С. 28—30.