

УДК 621.74:681.5

О.И. Прокопович, магистр,
И.В. Прокопович, канд. техн. наук, доц.,
Е.В. Колесникова, канд. техн. наук,
Одес. нац. политехн. ун-т

ДИНАМИКА ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ НЕПРЕРЫВНЫМ ЛИТЬЕМ МЕДНОЙ КАТАНКИ

О.И. Прокопович, И.В. Прокопович, Е.В. Колесникова. Динаміка процесу управління безперервним литтям мідної катанки. Визначено передатну функцію процесу безперервного лиття мідної катанки. Уточнено коефіцієнти передатної функції з використанням експериментальних даних реального об'єкта управління.

O.I. Prokopovich, I.V. Prokopovich, K.V. Kolesnikova. Process control dynamics in continuous casting of copper wire rod. The transmission function of copper wire rod continuous casting process is determined. The coefficients of transmission function are clarified using experimental data of real control object.

Процесс непрерывного литья меди и ее сплавов включает теплообмен и теплопередачу в системе “расплав — форма — слиток”. Превращение расплава меди в медный слиток сопровождается выделением теплоты перегрева и скрытой теплоты кристаллизации. При непрерывном литье катанки расплав меди кристаллизуется в форме, состоящей из водоохлаждаемой медной рубашки первичного охладителя и графитового кристаллизатора [1, 2]. Теплообмен в форме является лимитирующим фактором, определяющим производительность процесса. С увеличением скорости литья большее количество тепла передается от расплава к форме и, следовательно, отвод тепла от кристаллизующегося слитка должен протекать более интенсивно для обеспечения однородности слитка [3, 4].

Теплообмен — явление, определяющее процесс непрерывного литья. Он не только определяет максимальную производительность литейной машины, но и влияет на качество получаемого слитка. Поэтому именно управление процессом теплообмена, является важным элементом в технологии непрерывного литья меди для получения высокого качества слитков [5].

При непрерывном литье меди конечный продукт получается при прохождении расплава через узел кристаллизатора, затвердевания в виде бесконечного слитка постоянного сечения с последующим охлаждением в нескольких зонах. Во время прохождения через зоны охлаждения слиток движется с постоянной скоростью. При этом расход охлаждающей воды — постоянен. Качество получаемого слитка, определяемое кристаллической структурой, зависит от тепловых воздействий, которые он претерпел в зонах охлаждения. Таких зон в современных машинах вертикального непрерывного литья обычно две — первичный и вторичный охладители. В первичном охладителе происходит снятие теплоты перегрева, кристаллизация расплава и начальное охлаждение слитка, во вторичном охладителе слиток рекристаллизуется и охлаждается до температур ниже 100°C. [5, 6].

Моделирование процессов теплообмена позволяет выбирать оптимальные параметры управления процессом непрерывного литья. В большинстве случаев режим охлаждения выбирается на основании линейной корреляции скорости литья и неким ожидаемым влиянием этой скорости на температуру поверхности стренги на границах зон охлаждения [7]. Такой подход к управлению процессом охлаждения в разомкнутом контуре без обратной связи с линейной статической компенсацией неэффективен, т.к. коэффициент термодиффузии, и отношение между расходом охлаждающей воды и скоростью литья нелинейно, а сам процесс характеризуется рядом неустойчивых состояний [8].

При охлаждении стренг в обоих охладителях отвод тепла происходит:

- через воздушный зазор непостоянного сечения из-за шероховатости внутренней поверхности охладителей, изменений их геометрии по причине термических напряжений и пр;
- через стенку охладителя;
- на внешней поверхности, контактирующей с рубашкой, которая охлаждается водой.

Таким образом, интенсивность теплообмена может изменяться, что влечет за собой нестабильность температуры стренг [6]. Колебания температуры в зонах охлаждения приводит к ухудшению качества слитка. Следовательно, управление температурой в охладителях литейной машины и стабилизация теплового режима являются насущной производственной задачей.

Каждая зона охлаждения характеризуется температурой $T_i(t)$, протяженностью (l_i) и расходом охлаждающей воды $q_i(t)$.

Медь поступает в кристаллизатор с температурой $T_0(t)$ со скоростью $v(t)$. Стренга после кристаллизации характеризуется плотностью ρ_c , удельной теплоемкостью C_{ci} и поперечным сечением S_c . Используемая в охладителе жидкость характеризуется температурой $T_{\text{ввх}}$ и удельной теплоемкостью $C_{\text{ввх}}$ на входе [9, 10].

Тепловой баланс в динамическом режиме для каждой зоны представляется уравнением

$$m_i C_{ci} \frac{dT_i(t)}{dt} = q_m(t) C_{ci} (T_{i-1}(t) - T_i(t)) - q_i(t) C_{\text{ввх}} (T_i(t) - T_{\text{ввх}}) \quad (1)$$

где $m_i = \rho S_c l_i$;

$$q_m(t) = \rho S_c v(t).$$

Величины C_{ci} , $C_{\text{ввх}}$, $T_{\text{ввх}}$, ρ и m_i в первом приближении могут рассматриваться как константы.

На основе уравнения теплового баланса, как уравнения второго порядка [11], после выполнения математических преобразований, получаем выражение, позволяющее получить передаточную функцию для моделирования процесса теплообмена при непрерывном литье для реального объекта

$$W(p) = \frac{62,75p + 359,6}{0,0441p^2 + 0,727p} \quad (2)$$

Уравнение учитывает воздействие на температуру поверхности стренг таких параметров как теплоемкость меди, теплоемкость воды, ее температура и расход, а также скорость литья. Влияние остальных параметров и переменных процесса принимается незначимым.

Традиционная модель управления процессом представлена на рис. 1 и используется для компенсации изменений скорости литья, где $q_0(t)$ — минимально допустимый расход охлаждающей воды [12].

В системе используется принципы линейной системы управления без обратной связи. В этом случае неизбежно происходит статическая ошибка, которая не позволяет оптимизировать процесс и стабилизировать качество продукта (рис. 2).

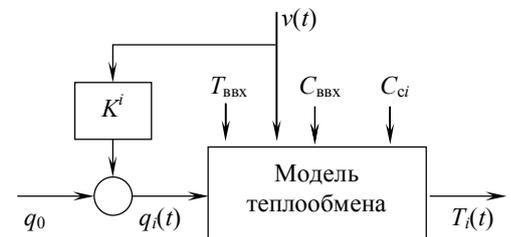


Рис. 1. Традиционная схема управления процессом теплообмена

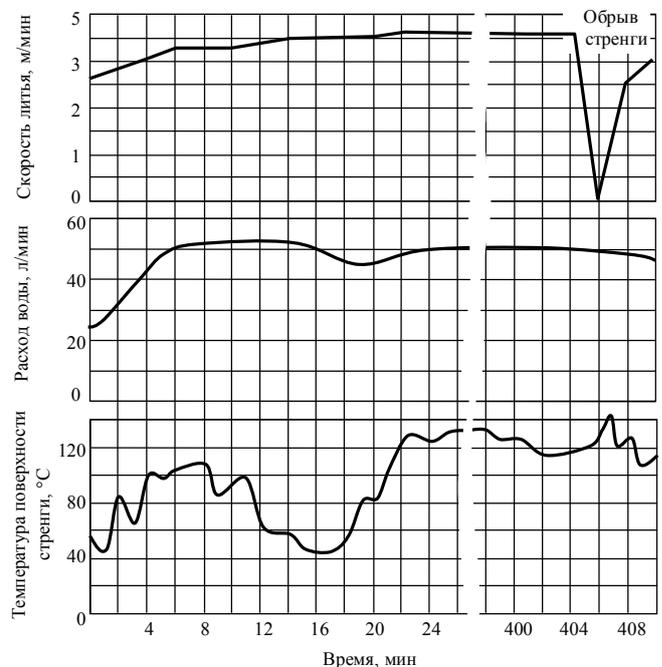


Рис. 2. Изменение температуры поверхности стренги без обратной связи

Для уменьшения ошибки предлагается применить схему управления с обратной связью. На рис. 3 показана структура управления при помощи пропорционально-интегрально-дифференциального цифрового управления (PID-регулирование) с обратной связью.

PID-регулятор позволит добиться стабилизации в замкнутом контуре управления с обратной связью посредством оптимальной настройки управляющих воздействий по PID закону регулирования. Входным параметром является расход охлаждающей воды $q_i(k)$. Эталонной моделью является система второго порядка, представленная на структурной схеме (рис. 4), где $r_i(k)$ — граничное вводное значение для эталонной модели. Коэффициенты β_i и λ_i заданы таким образом, чтобы обеспечивать нахождение полей в пределах заданного круга величин и характеризовать тип отклика, полученного процессом. Выбранная эталонная модель является асимптотически стабильной, при условии, что ошибка слежения приближается к нулю.

Оптимальные значения PID-регулирования с изменениями скорости литья результировались в нахождении предела стабильности замкнутой системы для теплообмена, характеризующегося изменениями параметров C_{ci} , C_{vbx} и T_{vbx} . На рис. 5 показаны результаты моделирования замкнутой системы под управлением PID-регулятора.

Как показывает график на рис. 5 предложенная замкнутая система асимптотически устойчива, а значит полученные результаты могут использоваться при моделировании процессов теплообмена при непрерывном литье.

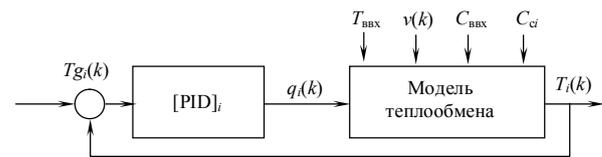


Рис. 3. Структура управления с применением PID-регулятора

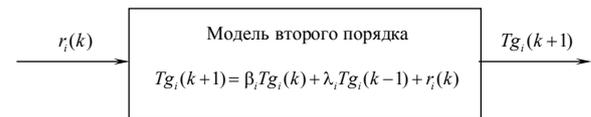


Рис. 4. Структура эталонной модели

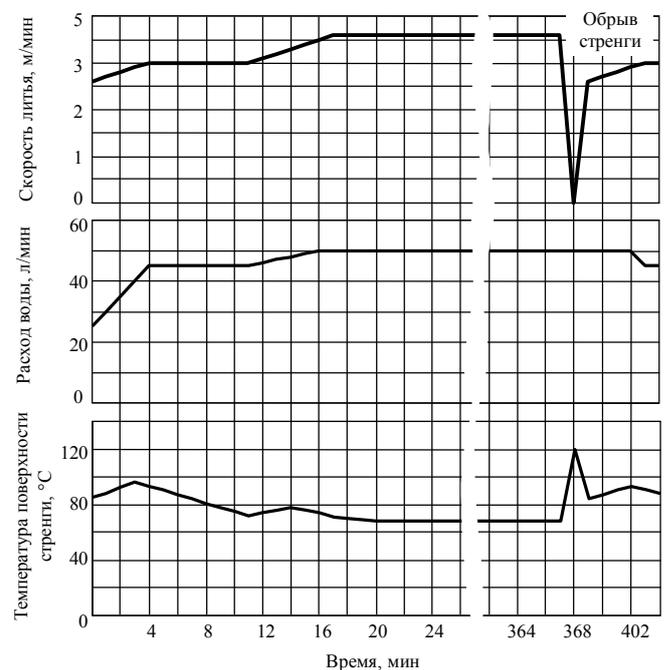


Рис. 5. Изменение температуры поверхности стержня с обратной связью

Литература

1. Arto Kotipelto. Numerical and experimental analysis of heat transfer in the continuous casting process of copper. — Tampere: Tampere University of Technology, 2002. — 142 p.
2. Прокопович О.И. Автоматизация производства высококачественной катанки для изготовления проводов сверхтонких сечений / Прокопович О.И., Прокопович И.В., Гогунский В.Д. // Тр. Одес. политехн. ун-та. — Одесса, 2002. Спецвыпуск. — С. 68 — 71.
3. Прокопович О.И. Непрерывное литье цилиндрических заготовок из цветных сплавов / Прокопович О.И., Прокопович И.В. // Литейное производство. — 2003. — № 3. — С. 19.
4. Прокопович И.В. Исследование структур медной катанки, полученной различными способами / Прокопович И.В., Прокопович О.И., Либутина О.В. // Материалы междунар. конф. "Пути повышения качества и экономичности литейных процессов", 9 — 11 сентября 2003 г., г. Одесса, Украина. — Одесса, ОНПУ, 2003. — С. 66 — 67.

5. ТУ У 27.4-05758730-028–2003. Катанка медная. — ОАО Одесский кабельный завод “Одескабель”, 2003. — с. 20.
6. Прокопович О.И. Температура поверхности катанки как косвенный параметр качества / Прокопович О.И., Прокопович И.В., Гогунский В.Д. // Тр. Одес. политехн. ун-та. — Одесса, 2003. — Вып. 2(20). — С. 128 — 130.
7. M. El-Bealy. Simulation of cooling conditions in secondary cooling zones in continuous casting process / M. El-Bealy, N. Leskinen, N. Fredriksson.. — Ironmaking and Steelmaking, 1995. — № 3(22). — P. 246 — 255.
8. P. Lober. Industrielle Steuerungstechnik. — Berlin, Institut fur Automatisierungstechnik. — TU Bergakademie Freiberg 01.01.2000.
9. Кац А.М. Теплофизические основы непрерывного литья слитков цветных металлов и сплавов / Кац А.М., Шадек Е.Г. — М.: Металлургия, 1983. — 208 с.
10. Прокопович О.И. Моделирование процессов кристаллизации при непрерывном литье меди / Прокопович О.И., Морозов Ю.А., Прокопович И.В. // Тр. Одес. политехн. ун-та. — Одесса, 2004. — Вып. 2(22). — С. 68 — 71.
11. Прокопович О.И. Идентификация математической модели непрерывного литья медной катанки / Прокопович О.И., Морозов Ю.А., Прокопович И.В. // Тр. Одес. политехн. ун-та. — Одесса, 2005. — Спецвыпуск. — С. 106 — 109.
12. Прокопович О.И. Применение нейронных сетей для управления процессами теплопередачи при непрерывном литье меди / Прокопович О.И., Морозов Ю.А., Прокопович И.В., Колесникова Е.В. // Материалы междунар. конф. “Пути повышения качества и экономичности литейных процессов”, 9 — 11 сентября 2004 г., г. Одесса, Украина. — Одесса, ОНПУ, 2004. — С. 66 —70.

Поступила в редакцию 22 июня 2006 г.