

22. Kundu A.L. Gupt K.M., P.Krishna Rao. Morphology of Nonmetallic Inclusions Using Silicon, Aluminum and Calcium-Silicon Alloy in Steel Melt // Metallurgical Transaction B. 1989. Vol. 20B. October. — P.581-594.

Надійшла до редакції 04.10.2011

Рецензент д.т.н., проф. М.О. Маняк

© Смирнов А.Н., Ефимова В.Г., Кравченко А.В., Писмарев К.Е.

УДК 621.744.072.2.001.891.573

Е.Ю. Кушнерова, В.Н. Бредихин, Н.А. Маняк, А.И. Шевелев

К ВОПРОСУ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ В ЗАКРЫТЫЙ ГРАФИТОВЫЙ ФОРМООБРАЗОВАТЕЛЬ

Выполнен анализ установки горизонтального непрерывного литья как объекта управления. Определена структурная схема управления и статистические алгоритмы управления процессом литья в горизонтальный кристаллизатор. Разработанная система управления стабилизирует технологические параметры, увеличивает производительность установки и выход годного, исключает пористость и дефекты поверхности заготовки.

Ключевые слова: непрерывное литье, анализ, схема, управление, параметры, производительность, выход годного.

Введение

Одним из возможных путей повышения эффективности производства, улучшения качества продукции и условий труда является широкое использование методов непрерывного литья. Наиболее прогрессивными, с экономической и технической точек зрения, являются установки горизонтального непрерывного литья в графитовый формообразователь с медной водоохлаждаемой рубашкой. Несмотря на то, что установки горизонтального непрерывного литья (УГНЛ) имеют высокие технико-экономические показатели, их работа может быть значительно улучшена за счет стабилизации технологических параметров, нахождения оптимальных режимов ведения процесса, автоматизации управления работой установки.

Постановка задачи

Анализ особенностей тепловых потоков, структуры и механических свойств заготовки, отливаемой на УГНЛ, позволяет представить следующую модель её формирования [1].

При установившемся режиме вытягивания заготовки в жидком ядре, жидко-твёрдой и твёрдо-жидкой зонах графитового формообразователя с

медной водоохлаждаемой рубашкой существуют термоконвективные потоки, которые рассматриваются как суперпозиции базисных движений.

При этом определяющим является движение в вертикальной плоскости формообразователя [2].

Сложность протекающих процессов на УГНЛ, большое количество технологических факторов, отсутствие информации по отдельным каналам, невозможность строгого повторения натуральных металлургических экспериментов требуют проведения исследования процесса литья в динамике с фиксацией управляющих и возмущающих факторов. Создание системы с такими целями управления требует знания статики и динамики процесса и его математического описания.

Решение этих вопросов, с выделением задачи управления качественными характеристиками получаемой заготовки на УГНЛ является важной технической задачей.

Основная часть исследований

УГНЛ, как объект управления, является источником и каналом передачи информации с n – входными факторами управления и m – входами различных дестабилизирующих факторов – шум процесса.

Структурная схема процесса непрерывного литья в горизонтальный графитовый формообразователь с медной водоохлаждаемой рубашкой, как объекта управления, показана на рис.1:

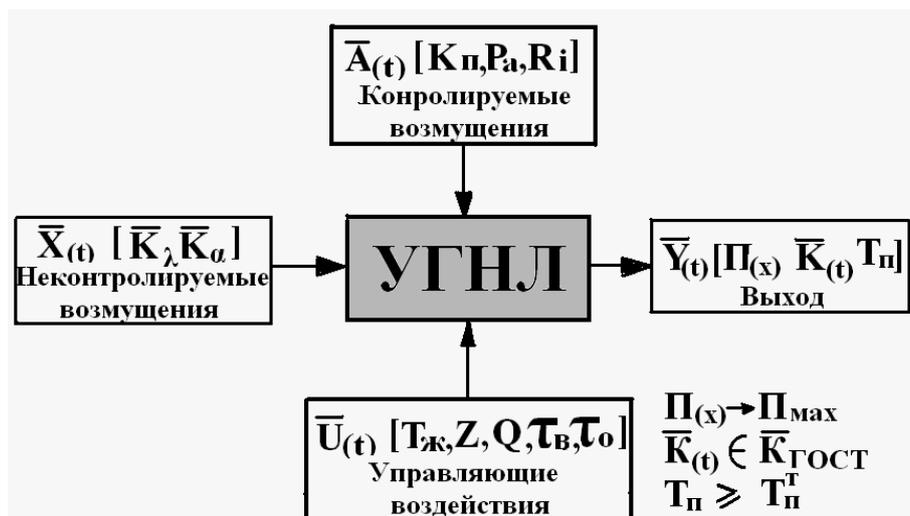
Сигналы по каналам управления и возмущения являются пространственными векторами, которые можно представить матрицами-столбцами.

$$\bar{U}_{(t)} = \begin{Bmatrix} T_{ж} \\ Z \\ T_{в} \\ T_{о} \\ Q \end{Bmatrix} \quad \bar{A}_{(t)} = \begin{Bmatrix} K_{п(t)} \\ P_{a(t)} \\ R_{i(t)} \end{Bmatrix} \quad \bar{X}_{(t)} = \begin{Bmatrix} \bar{K}_{\lambda(t)} \\ \dots \\ \bar{K}_{a(t)} \end{Bmatrix} \quad \bar{Y}_{(t)} = \begin{Bmatrix} P_{(x)} \\ \bar{K}_{(t)} \\ T_{п(t)} \end{Bmatrix}$$

При этом следует отметить, что векторы $\bar{K}_{(\alpha)}$, $\bar{K}_{(\lambda)}$, $\bar{K}_{(t)}$ являются многомерными:

$$\bar{K}_{a(t)} = \begin{Bmatrix} \alpha_1(t) \\ \alpha_2(t) \\ \dots \\ \alpha_n(t) \end{Bmatrix} \quad \bar{K}_{\lambda(t)} = \begin{Bmatrix} \lambda_1(t) \\ \lambda_2(t) \\ \dots \\ \lambda_n(t) \end{Bmatrix} \quad \bar{K}_{(t)} = \begin{Bmatrix} \bar{K}_{\delta\% (t)} \\ \bar{K}_{\sigma(t)} \\ \bar{K}_{HB(t)} \\ \bar{K}_{S(t)} \\ \dots \end{Bmatrix}$$

Вектор $\bar{Y}_{(t)}$, включающий параметры оптимизации $P_{(x)}$, $\bar{K}_{(t)}$, $T_{п}$ содержит многомерный вектор $\bar{K}_{(t)}$, значения которого измеряются дискретно и разделены сравнительно большими отрезками времени.



$\vec{U}_{(t)}$ управляющие воздействия: $T_{ж}$ – температура жидкого металла на входе в формообразователь; Z – шаг вытягивания; Q – расход охладителя; τ_b – время вытягивания в цикле; τ_o – время остановки в цикле;
 $\vec{A}_{(t)}$ - контролируемые возмущения: $K_{п}$ – конструктивные параметры установки; P_a – параметры окружающей среды; R_i – химический состав сплава;
 $\vec{X}_{(t)}$ неконтролируемые возмущения: \vec{K}_{λ} - нестабильность конструктивных и теплотехнических характеристик кристаллизатора; \vec{K}_{α} - нестабильность кинетики процесса кристаллизации сплава;
 $\vec{Y}_{(t)}$ - параметры оптимизации процесса литья: $\Pi_{(x)}$ – производительность УГНЛ; $\vec{K}_{(t)}$ - качество заготовки; $T_{(п)}$ – температура заготовки на выходе из формообразователя.

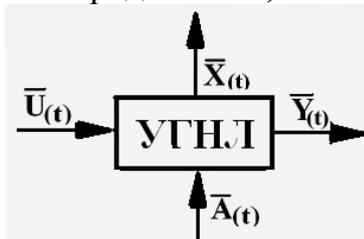
Рисунок 1 – Структурная схема УГНЛ как объекта управления.

Следовательно, по каналу вектора $\vec{K}_{(t)}$, объект имеет неполную информацию с большим временем запаздывания.

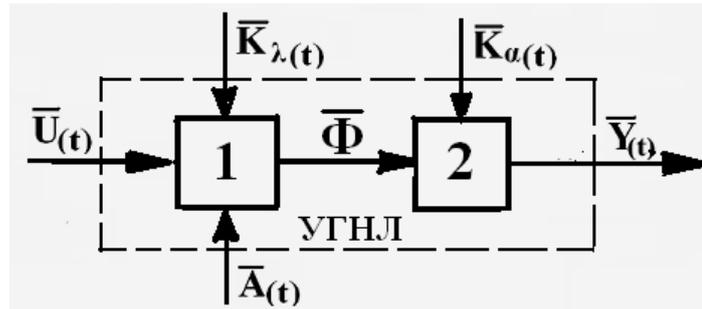
Наиболее целесообразно в этом случае использовать по главному каналу в алгоритме управления статистические зависимости [3]:

$$\vec{K}_{(t)} \equiv \vec{K}(\vec{U}_{(t)}; \vec{A}_{(t)}; \vec{X}_{(t)}). \tag{1}$$

Оператор объекта можно представить, согласно рис.1, как



или



Тогда оператор можно записать, как:

$$\vec{Y}_{(t)}^1 \equiv \vec{Y}_{(t)}[\vec{U}_{(t)}; \vec{X}_{(t)}; \vec{A}_{(t)}] \quad (2)$$

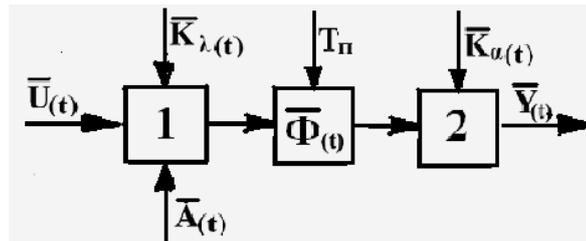
или в преобразованном виде имеем:

$$\vec{Y}_{(t)} = [\vec{U}_{(t)}; \vec{X}_{(t)}; \vec{A}_{(t)}] = \vec{\Phi} = \vec{Y}_{(t)}[\vec{U}_{(t)}; \vec{X}_{(t)}; \vec{A}_{(t)}] + \vec{Y}_{(t)}^{(2)}[\vec{\Phi}_{(t)}; \vec{K}_a] \quad (3)$$

$$\vec{Y}_{(t)} = [\vec{\Phi}_{(t)}; \vec{K}_{a(t)}] = \vec{\Phi}_{(t)} + \vec{K}_{a(t)} \quad (4)$$

где $\vec{\Phi}_{(t)}$ - оператор первой части объекта; $\vec{Y}_{(t)}$ - оператор второй части объекта.

Информационным показателем между первой частью объекта – тепловыми процессами, протекающими в зоне кристаллизатора и второй частью – качественными характеристиками заготовки, является параметр $\vec{\Phi}_{(t)}$. Согласно исследований [4], этим показателем является температура заготовки на выходе из кристаллизатора - $T_{\text{п}}$:



Информационный показатель $\vec{\Phi}_{(t)} \equiv T_{\text{п}}$ характеризует стабильность теплотехнических процессов, протекающих в зоне кристаллизатора, влияние температуры жидкого металла - $T_{\text{ж}}$, качественных характеристик сплава и параметров вытягивания заготовки.

Следовательно, на основе качественного и количественного анализа по каналу $\vec{U}_{(t)} = \vec{K}_{(t)}$ необходимо определить главную стратегию управления технологическим процессом непрерывного литья, т.е.

$$\vec{Y}_{(t)} \in \vec{K}_{\text{ГОСТ}}; \quad \Pi_{(x)} \rightarrow \Pi_{\text{макс}}.$$

Для успешного решения поставленной задачи с целью построения модели системы управления необходимо знание не только качественные характеристики технологического процесса, но и знание динамики основного узла УГНЛ – кристаллизатора [5, 6]:

$$W_{(P)} = \begin{Bmatrix} W_{(P)}^C \\ W_{(P)}^T \end{Bmatrix}$$

где $W_{(P)}^C$ - частная передаточная функция по каналу температуры металла в печи; $W_{(P)}^T$ - частная передаточная функция по каналу режима вытягивания.

Из частных передаточных функций получены дифференциальные уравнения по управляющему воздействию:

$$\left(4704 \frac{d^3}{dt^3} 651 \frac{d^2}{dt^2} + 40,4 \frac{d}{dt} \right) \times T_c = K_c \Pi, \quad (5)$$

с начальными условиями: $T_c|_{t=0} = T_{c0}$, $T_c'|_{t=0} = T_c''|_{t=0} = T_c'''|_{t=0} = 0$.

По возмущающему воздействию:

$$\left(234,4 \frac{d^2}{dt^2} 60,4 \frac{d}{dt} + 1 \right) \times \Theta_{ж} = K_T e^{-20 \frac{d}{dt}} \times T_{ж} \quad (6)$$

с начальными условиями: $\Theta_T|_{t=0} = \Theta_{ж0}$, $\Theta_T'|_{t=0} = \Theta_{ж}''|_{t=0} = 0$,

где T_c – составляющая температуры поверхности заготовки, зависящая от параметров режима вытягивания; Θ_T - составляющая температуры жидкого металла в печи; $\Theta_{ж}$ - возмущающее воздействие; K_c , K_T – коэффициенты усиления соответственно по скорости и по температуре жидкого металла.

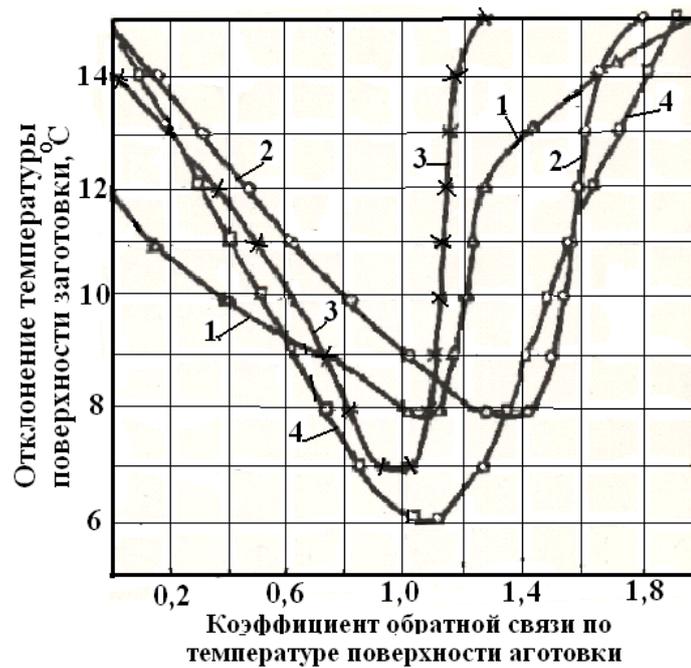
Полученные передаточные функции кристаллизатора по управляющему и возмущающему воздействиям были использованы при исследовании системы управления УГНЛ. Целью исследований было определение оптимальной величины коэффициента отрицательной обратной связи K_{oc} по температуре поверхности заготовки на выходе из кристаллизатора.

В качестве критерия оптимизации величины K_{oc} принята величина отклонения температуры поверхности заготовки T_c при возмущающем воздействии, т.е. $\Delta\Theta = f(K_{oc})$ при различных значениях коэффициента:

$$K_{oc.opt.} = f(\Theta_{ж}, Z, n) = 7,08 + 0,0017n - 0,004\Theta_{ж}, \quad (7)$$

где n – управляющее воздействие, обороты привода клетки вытягивания.

Значение коэффициента $K_{oc.opt.}$ для различных технологических режимов находится в диапазоне $0,9 \div 1,5$ (рис. 2).



- 1 - $\Theta_{ж} = 1020^{\circ}\text{C}$; $Z = 25$ мм; $n = 900$ мин^{-1} ;
 2 - $\Theta_{ж} = 1140^{\circ}\text{C}$; $Z = 50$ мм; $n = 500$ мин^{-1} ;
 3 - $\Theta_{ж} = 1040^{\circ}\text{C}$; $Z = 25$ мм; $n = 900$ мин^{-1} ;
 4 - $\Theta_{ж} = 1000^{\circ}\text{C}$; $Z = 37,5$ мм; $n = 700$ мин^{-1} .

Рисунок 2 – Зависимость отклонений температуры поверхности заготовки в функции K_{oc} :

Применение отрицательной обратной связи по информационному показателю процесса T_n стабилизирует процесс литья заготовок на УГНЛ при максимальной производительности и способствует демпфированию случайных возмущений по каналу $\bar{Y}_{(t)}$, что устраняет срывы процесса литья.

Выводы

Таким образом, анализ основных закономерностей процесса непрерывного литья в горизонтальный графитовый формообразователь с медной водоохлаждаемой рубашкой и результаты моделирования процесса управления УГНЛ позволили синтезировать систему управления, которая состоит из трех контуров регулирования:

- стабилизация температуры жидкого металла;
- стабилизация режима охлаждения кристаллизатора;
- регулирования режима вытягивания заготовки.

Разработанная система управления обеспечила стабильность технологических параметров и увеличивает на 20% производительность УГНЛ, выход годного увеличен до 98% (против 95,5%), исключена пористость и дефекты качества поверхности заготовки, значительно улучшены санитарно-гигиенические условия работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Добаткин В.И. Непрерывное литье и литейные свойства сплавов - М.: Металлургия, 1975. – 186 с.
2. Бредихин В.Н. Формирования бронзовой заготовки в закрытом горизонтальном кристаллизаторе / В.Н. Бредихин, Н.А. Маняк, Е.Ю. Кушнерова // Металлургические процессы и оборудование – 2008, №4(14) – С.44-48.
3. Бредихин В.Н. Исследование процесса оптимизации качественных характеристик на установках горизонтального непрерывного / В.Н.Бредихин, В.А. Золотухин, Е.Ю. Кушнерова // Сб. трудов XI Международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века», т.2. – Донецк: ДонНТУ, 2004. – С.20-24.
4. Бредихин В.Н. Исследование тепловых потоков в горизонтальном кристаллизаторе при литье медных сплавов / В.Н. Бредихин, Е.Ю.Кушнерова // Наукові праці ЗДІА. Металургія. – Запоріжжя: ЗДІА, 2005. - № 11. – С. 12 – 18.
5. Живоглядов В.П. Принципы построения автоматических систем с неполной информацией – М.: «Илим», 1967. - 187 с.
6. Бредихин В.Н. Моделирование тепловых процессов в горизонтальном закрытом кристаллизаторе / В.Н. Бредихин, В.А.Золотухин, Е.Ю. Кушнерова // Сб. трудов XI Международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века», т.1. – Донецк: ДонНТУ, 2004. – С.288-294.

Надійшла до редакції 04.10.2011

Рецензент к.т.н., доц. Є.В. Штепан

© Кушнерова Е.Ю., Бредихин В.Н., Маняк Н.А., Шевелев А.И.

УДК 669.14:66.065.5

А.Н. Смирнов, А.В. Кравченко, А.П. Верзилов

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ ДОЗИРОВАНИЯ СТАЛИ В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ СЛЯБОВОЙ МНЛЗ

Рассмотрены особенности непрерывной разливки стали на слябовой МНЛЗ с применением погружных стаканов различных конструкций. Детально изучены переменные факторы процесса разливки стали с применением погружного стакана и их влияние на процессы истечения металла в кристаллизаторе.

Ключевые слова: разливка, погружной стакан, кристаллизатор, МНЛЗ.

Введение

В последние два десятилетия в науке и промышленности ведутся серьезные исследования, направленные на повышение качества непрерывно-литой заготовки и стабильности процессов затвердевания, протекающих в кристаллизаторе слябовых МНЛЗ (рис. 1) [1].