

РАЦИОНАЛЬНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ СЛЯБА В МАШИНЕ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК

С.В. Лукин, А.В. Гофман

В статье описан способ управления охлаждением сляба в МНЛЗ при динамических режимах разливки, позволяющий выдерживать рациональный температурный профиль поверхности слитка вдоль технологической оси при переменных параметрах разливки, таких, как скорость разливки, уровень мениска жидкого металла в кристаллизаторе и параметры жидкой стали, подаваемой в кристаллизатор

Ключевые слова: машина непрерывного литья заготовок, динамические режимы разливки, рациональное охлаждение

Охлаждение сляба в машине непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) во многом определяет эффективность работы МНЛЗ, т.е. качество разливаемого металла, стойкость оборудования МНЛЗ и ее производительность. При существующей технологии на МНЛЗ часто возникают нестационарные (динамические) режимы, когда параметры разливки (скорость разливки, уровень мениска жидкого металла и др.) изменяются. На большинстве криволинейных слябовых МНЛЗ организация охлаждения сляба при переменных параметрах разливки является неудовлетворительной.

В работах [1] предложен способ охлаждения сляба в МНЛЗ при переменной скорости разливки без учета переменности уровня мениска и параметров жидкого металла в кристаллизаторе. В данной работе разработан способ охлаждения сляба в МНЛЗ с учетом переменности различных параметров разливки.

Принцип рационального охлаждения и затвердевания сляба в МНЛЗ состоит в том, что температура поверхности t_n выделенного элемента сляба определяется только временем пребывания данного элемента в МНЛЗ τ^* и маркой стали M :

$$t_n = t_n(\Phi^*, M). \quad (1)$$

При рациональном охлаждении температура поверхности сляба резко снижается в начальные моменты времени τ^* в кристаллизаторе, а в зоне вторичного охлаждения (ЗВО) держится на неизменном рациональном уровне $t_{ЗВО}$.

При условии, что выполняется (1), и что параметры жидкого металла, подаваемого в кристаллизатор, неизменны, плотность теплового потока q , коэффициент теплоотдачи на поверхности сляба α , а также толщина оболочки сляба ξ будут являться функцией времени τ^* и марки стали:

$$\varphi = \varphi(\Phi^*, M), \quad (2a)$$

где под φ понимаются q , α или ξ .

Лукин Сергей Владимирович – ЧГУ, канд. техн. наук, доцент, тел. (8202) 51-81-32, e-mail: sergej-lukin19@yandex.ru

Гофман Андрей Викторович – ЧГУ, аспирант, тел. 89602902052

Если параметры жидкого металла (температура или химсостав) изменяются во времени по закону $p(\tau)$, где τ – текущее время разливки, то величина φ для элемента сляба, который зародился в момент $\tau - \tau^*$ на уровне мениска, будет зависеть также от $p(\tau - \tau^*)$:

$$\varphi = \varphi(\Phi^*, M, p(\Phi - \Phi^*)). \quad (2б)$$

Теоретические зависимости (2) для q , α или ξ определяются путем численного решения задачи затвердевания сляба при заданном изменении $t_n(\tau^*, M)$ и $p(\tau)$. При заданных постоянных параметрах и марке жидкого металла температурное поле затвердевающего элемента сляба при $0 < \Phi^*$, $0 < x < B$ описывается уравнением:

$$C_{эф}(t) \cdot c(t) \cdot \frac{\partial t}{\partial \Phi^*} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(t) \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(t) \frac{\partial t}{\partial z} \right), \quad (3)$$

где $t = t(x, \tau^*)$ – температурное поле сляба; $C_{эф}(t)$ $\rho(t)$, $\lambda(t)$ – эффективная теплоемкость (учитывающая теплоту затвердевания стали в диапазоне температур затвердевания [2]), плотность, коэффициент теплопроводности стали в зависимости от t ; x – координата, перпендикулярная поверхности сляба; B – половина толщины сляба; z – координата технологической оси, отсчитываемая от базового уровня.

Начальное и граничные условия для температурного поля сляба t имеют вид:

$$\begin{aligned} t|_{\Phi^*=0} &= t_0, \quad 0 \leq x \leq B; \\ t|_{x=B} &= t_n(\Phi^*), \quad 0 \leq \Phi^*; \\ \partial t / \partial x|_{x=0} &= 0, \quad 0 < \Phi^*, \end{aligned} \quad (4)$$

где t_0 – температура жидкого металла.

Плотность теплового потока и коэффициент теплоотдачи определяются как

$$q(\Phi^*) = -\lambda \cdot \partial t(x, \Phi^*) / \partial x|_{x=B}; \quad (5)$$

$$\alpha(\Phi^*) = q(\Phi^*) / (t_n(\Phi^*) - t_b),$$

где t_b – температура охлаждающей воды.

Толщина оболочки $\xi(\tau^*)$ по температуре затвердевания t_3 (ликвидус или солидус) определяется из выражения

$$t(\phi(\tau^*), \tau^*) = t_3. \quad (6)$$

Расчет $q(\tau^*)$, $\alpha(\tau^*)$ и $\xi(\tau^*)$ на основе (3) – (6) производится численно.

При стационарном режиме τ^* определяется выражением: $\tau^* = z/v$, где z – координата, отсчитываемая от уровня мениска жидкого металла; v – постоянная скорость разливки. При динамическом режиме, когда изменяется скорость разливки и уровень мениска жидкого металла в кристаллизаторе, τ^* определяется из решения интегрального уравнения:

$$\int_{\phi-\tau^*}^{\phi} v(\tau) d\tau = z - \Delta H(\phi - \tau^*), \quad (7)$$

где $v(\tau)$ – скорость разливки в зависимости от текущего времени τ ; z – координата технологической оси, отсчитываемая от базового уровня; $\Delta H(\tau)$ – расстояние от базового уровня до уровня мениска жидкого металла в кристаллизаторе. При стационарном режиме $\Delta H(\tau) = \text{const} = 0$. В нестационарном режиме изменение уровня мениска металла в кристаллизаторе описывается выражением:

$$d\Delta H(\phi)/d\phi = v(\phi) - g_{\text{ж}}(\phi), \quad (8)$$

где $g_{\text{ж}}(\phi) = G_{\text{ж}}(\phi)/F$; $G_{\text{ж}}(\phi)$ – объемный расход жидкого металла, подаваемого в кристаллизатор; F – площадь поперечного сечения кристаллизатора.

В системе автоматизации МНЛЗ скорость разливки v и уровень мениска ΔH непрерывно регистрируются, поэтому на практике уравнение (7) относительно τ^* нужно решать численно.

С учетом (2б) и (7), величина ϕ в точке z в текущий момент τ при произвольном изменении скорости разливки, уровня мениска жидкого металла и температуры жидкого металла при рациональном охлаждении определяются выражениями:

$$\phi(z, \tau) = \phi[\tau^*(z, \tau), M, p(\phi - \tau^*(z, \tau))], \quad (9a)$$

где $\tau^* = \tau^*(z, \tau)$ – время пребывания в МНЛЗ элемента сляба, который в момент τ находится в точке z , определяемое из решения интегрального уравнения (7).

Если параметры и марка жидкого металла не изменяются, то (9a) принимает вид:

$$\phi(z, \tau) = \phi[\tau^*(z, \tau)]. \quad (9б)$$

В кристаллизаторе с рациональным профилем рабочих стенок при неизменных параметрах жидкого металла, как показано в [2], выражение (9б) выполняется автоматически, откуда следует, что в кристаллизаторе управлять охлаждением слитка не нужно, необходимо лишь рационально подобрать смазку, поскольку ее свойства наиболее существенно влияют на температуру поверхности сляба в

кристаллизаторе. Чтобы выражение (9б) выполнялось за пределами кристаллизатора, необходимо, чтобы удельный расход воды, подаваемой из форсунок в ЗВО, в точке z в момент τ определялся выражением:

$$g(z, \tau) = g\{\tau[\tau^*(z, \tau)]\}, \quad (10)$$

где $g\{\alpha\}$ – обратная функция от зависимости коэффициента теплоотдачи от удельного расхода охладителя $\alpha(g)$. Зависимость $\alpha(g)$ определяется экспериментально.

Т.к. в ЗВО МНЛЗ интенсивность охлаждения можно изменять не в каждой точке z , а в отдельных секциях (зонах), то расход воды в i -ой зоне ($i = 1, 2, \dots, N$) в динамических режимах в текущий момент τ следует определять по выражению:

$$G_i(\phi) = g_i\{\tau[\tau^*(z_i, \phi)]\} \cdot l_i \cdot 2A_i, \quad (11)$$

где $g_i\{\alpha\}$ – зависимость g от α для i -ой зоны; z_i – координата середины i -ой зоны; $2A_i$ – охлаждаемая ширина сляба в i -ой зоне; l_i – длина i -ой зоны. При стационарном режиме разливки $\tau^*(z_i, \phi) = z_i/v$ и формула (11) принимает вид:

$$G_i = g_i\{\tau[z_i/v]\} \cdot l_i \cdot 2A_i.$$

Чем меньше l_i , тем ближе позонное охлаждение слитка, определяемое по (11), к рациональному, определяемому по (10).

Рассмотрим характерный нестационарный режим, связанный с временным прекращением подачи жидкого металла в кристаллизатор при замене разливочного стакана. Пусть до момента $\tau = 0$ разливка велась в стационарных условиях при скорости разливки v_1 с удельным расходом жидкого металла $g_{\text{ж}} = v_1$; уровень мениска в этих условиях принимаем за базовый, т. е. $\Delta H = 0$. В момент $\tau = 0$ подача жидкого металла резко прекращается ($g_{\text{ж}} = 0$), скорость разливки скачком уменьшается от значения v_1 до $v_2 > 0$ (полная остановка слитка крайне нежелательна). Через время $\Delta\tau_1$ возобновляется подача жидкого металла в количестве $g_{\text{ж}} = v_1$, однако, т.к. уровень мениска за время $\Delta\tau_1$ понизился на величину $v_2 \cdot \Delta\tau_1$, то требуется время $\Delta\tau_2 = v_2 \cdot \Delta\phi / (v_1 - v_2)$, чтобы при скорости разливки v_2 и удельном расходе жидкого металла $g_{\text{ж}} = v_1$ уровень мениска поднялся до базового уровня. В момент $\tau_2 = \Delta\phi + \Delta\tau_2$ скорость разливки скачком изменяется до значения v_1 , удельный расход жидкого металла не изменяется ($g_{\text{ж}} = v_1$), уровень мениска перестает изменяться и находится на базовом значении.

На основе выражений (7), (8), (11) рассчитано изменение расходов воды в зонах с водовоздушным охлаждением криволинейной МНЛЗ в данном переходном процессе. В качестве зависимости $\alpha(\tau^*)$ использовано выражение, полученное при

численном расчете на основе системы уравнений (3) – (5) процесса затвердевания стального сляба из углеродистой стали при $t_0 = 1530$ °С; $t_{зво} = 950$ °С, $0,3 < \tau^* < 25$ мин:

$$\bar{b}(\phi^*) \cong 775/\sqrt{\phi^*}, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Ширина сляба $2A = 1,6$ м; длины зон МНЛЗ l_i и координаты средин зон z_i приведены в табл. 1. Зона № 0 – кристаллизатор; зоны № 1, 2 имеют водяное охлаждение; зоны № 3, ..., 9 имеют водовоздушное охлаждение. В качестве зависимости $\alpha(g)$ ($[g] =$

$\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$), при водовоздушном охлаждении использовано выражение, полученное в [3]:

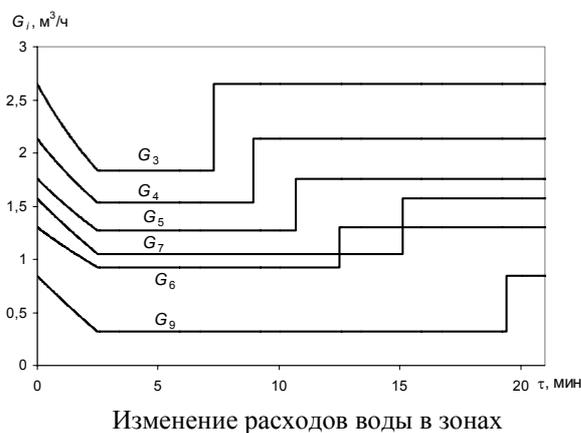
$$\bar{b}(g) = 170 + 155 \cdot g, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

На рисунке показано изменение расходов воды в зонах № 3÷9 МНЛЗ, когда при $\tau = 0$ подача жидкого металла прекращается, а скорость скачком уменьшается от $v_1 = 1$ до $v_2 = 0,2$ м/мин; через $\Delta\tau_1 = 2$ мин подача жидкого металла возобновляется; через $\Delta\tau_2 = 0,5$ мин уровень мениска поднимается до базового уровня и скорость разливки скачком увеличивается до 1 м/мин.

Геометрические характеристики зон МНЛЗ

№	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
l_i , м	1,1	0,2	1,2	1,98	1,62	1,66	1,83	1,82	3,45	5,17
z_i , м	-	1,2	1,9	3,49	5,29	6,93	8,68	10,5	13,1	17,4

Как следует из рисунка, в момент $\tau = 2,5$ мин расходы воды в зонах соответствуют стационарной скорости 1 м/мин; в течение времени $0 < \tau < 2,5$ мин, пока разливка ведется на скорости 0,2 м/мин, расходы воды во всех зонах плавно уменьшаются, стремясь к значениям, соответствующим скорости 0,2 м/мин; однако, в момент $\tau_2 = 2,5$ мин, когда скорость принимает прежнее значение 1 м/мин, расходы воды в зонах перестают изменяться, не достигнув значений, соответствующих скорости 0,2 м/мин, и сохраняют постоянное значение в течение времени $\phi_2 < \phi < \Delta\phi + z_i/v_1$ (где $\Delta\tau_1 = 2$ мин).



Расходы воды в зонах в моменты $\phi = \Delta\phi + z_i/v_1$ скачком увеличиваются до значений, соответствующих скорости v_1 , и после этого не изменяются. Чем больше координата середины зоны z_i , тем больше времени длится переходной процесс для данной зоны.

Из-за конечной длины зон, в пределах которых интенсивность охлаждения сляба принимается примерно постоянной, происходит разогрев поверхности сляба при переходе из одной зоны в другую, а также ее переохлаждение к концу зон, что наиболее заметно проявляется в динамических режимах разливки.

В целом, метод охлаждения стального сляба в МНЛЗ на основе выражения (11) или, тем более, выражения (10), является значительно более эффективным, чем методы, применяемые в настоящее время, часто не учитывающие инерционность переходных процессов, возникающих при изменении параметров разливки.

Литература

1. Лукин С.В., Калягин Ю.А. и др. Охлаждение и затвердевание сляба в машине непрерывного литья заготовок при переходных режимах разливки // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2004. – № 1. – С. 59 – 61.
2. Лукин, С.В., Шестаков Н.И. и др. Охлаждение и затвердевание металла в кристаллизаторе установки непрерывной разливки стали // Металлы. – 2007. – № 3. – С. 20 – 26.
3. Лукин С.В., Шестаков Н.И. и др. Контроль процесса теплоотдачи от сляба в зоне вторичного охлаждения машины непрерывного литья заготовок // Изв. вуз. Черная металлургия. – 2007. – № 5. – С. 61–66.

Череповецкий государственный университет

RATIONAL SLAB COOLING IN CONTINUOUS CASTING MACHINE

S.V. Lookin, A.V. Goffman

In the paper the method of the slab cooling operating in continuous casting machine is described. The method allows to keep the rational surface slab temperature profile along the technological axis of the machine at various parameters of casting, including the casting speed, the liquid steel level in the mold and parameters of liquid steel entering the mold.

Key words: Continuous casting machine, dynamical modes of casting, rational cooling

