



The model of the regimes optimization of secondary cooling MNLZ, differing from the known ones by taking into account pressures and deformations occurring in different zones of ZVO is offered. The model takes into account the thermal and physical characteristics of steel type at evaluation of the heat exchange coefficient.

А. Н. ЧИЧКО, БНТУ, В. А. МАТОЧКИН, А. В. ДЕМИН, РУП «БМЗ»,  
О. И. ЧИЧКО, В. Ф. СОБОЛЕВ, БНТУ

УДК 519:669.27

## ОБ ОДНОМ АЛГОРИТМЕ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ СЛИТКА

Известно, что вторичное охлаждение слитка играет огромную роль в формировании механических свойств слитка. Увеличение интенсивности охлаждения позволяет повышать скорость разливки стали в МНЛЗ и тем самым повышать производительность процесса вытяжки. В то же время интенсивное водяное охлаждение слитка может вызывать образование трещин, что приводит к понижению характеристик качества получаемой продукции. Следует отметить и то, что возможности увеличения водяного охлаждения ограничены из-за ограничения площади слитка и скорости ее подачи на поверхность, что также необходимо учитывать при разработке режимов вторичного охлаждения.

По принципу действия зоны вторичного охлаждения (ЗВО) различают открытого и закрытого типов. В ЗВО открытого типа перенос воды на поверхность слитка осуществляется с помощью форсунок, являющихся распыляющими устройствами. В ЗВО закрытого типа водоохлаждающий элемент непосредственно контактирует с поверхностью слитка.

Основной характеристикой при анализе режимов ЗВО являются коэффициенты теплоотдачи между поверхностью слитка и водоохлаждающим элементом. Именно эти коэффициенты определяют процессы изменения длины жидкой фазы и нарастания твердой корки слитка, что формирует упругопластические свойства металла, важные для дальнейшего прохождения слитка в правильно-тянущих устройствах.

Важнейший параметр при разливке режимов охлаждения ЗВО – коэффициент теплоотдачи на поверхности слитка. Определение коэффициентов теплоотдачи является сложной задачей прежде всего в технической реализации. Для этого используют методы расчета теплового баланса ЗВО, в значительной степени основанные на экспериментальных данных. При этом возможны различ-

ные подходы. В частности, определение температур на поверхности слитка при входе и выходе из ЗВО. Некоторые методы основаны на анализе продвижения фронта кристаллизации слитка.

Методы определения коэффициентов теплоотдачи основаны на эмпирически табулированных зависимостях коэффициентов теплоотдачи от размеров слитка и марок стали. На рис. 1 показана группа таких зависимостей, взятая из работы [1].

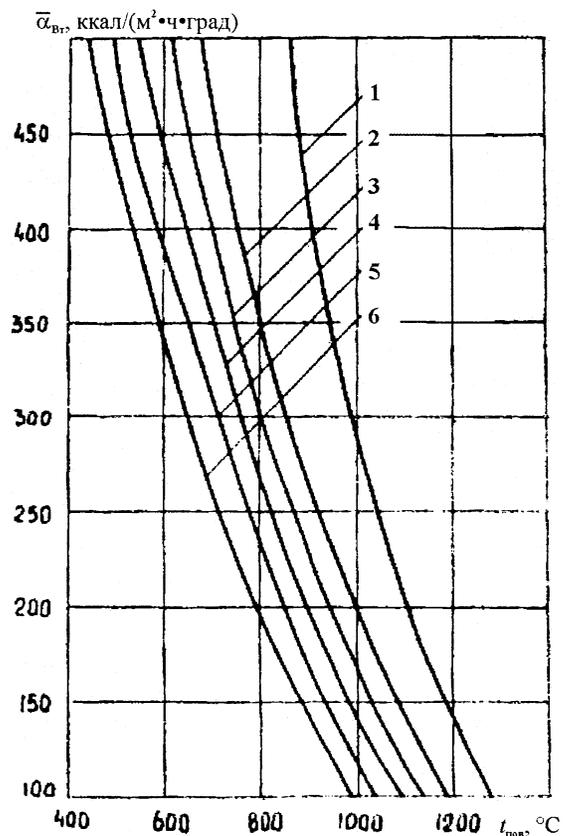


Рис. 1. Зависимость  $\bar{\alpha}_{вт}$  от конечной температуры поверхности в центре плоского стального слитка при разных толщинах  $\delta$  (1 ккал/(м<sup>2</sup> · ч · град)=1,163 Вт/(м<sup>2</sup> · К)): 1 –  $\delta=100$  мм; 2 – 150; 3 – 175; 4 – 200; 5 – 250; 6 – 300 мм

Эти данные позволяют определять коэффициенты теплоотдачи. Однако они привязаны к конкретным типоразмерам слитка и маркам стали, что существенно снижает их полезность. Например, переход к круглому слитку или слитку другого сечения приводит к невозможности правильного определения коэффициента теплоотдачи по этим данным, так как они в этом случае не работают.

Еще один подход в определении теплоотдачи связан с расчетом критерия Био:

$$Bi = \frac{\bar{\alpha}_{вт} S}{\lambda}, \quad (1)$$

где  $S$  — половина длины слитка, м;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности слитка, Вт/(м·К).

Критерий Био связан с критерием  $Fo$  через номограммы (рис. 2 [1, 2]), с помощью которой находим для данного сечения коэффициент теплоотдачи, так как и в приведенном случае недостатком этого метода является то, что он привязан к определенным типоразмерам и маркам стали.

Для расчета коэффициента теплоотдачи можно использовать условие теплообмена между водой и слитком [3, 4]:

$$Q_1 + Q_2 = \alpha_{вт} F(t_2 - t_1), \quad (2)$$

где  $Q_1, Q_2$  — соответственно количество тепла, затраченного на нагрев воды и парообразование;  $F$  — поверхность слитка, проходящая через вторичное охлаждение;  $t_1$  — температура поверхности в ЗВО;  $t_2$  — температура воды.

Из выражения (2) можно получить формулу для определения коэффициента теплоотдачи:

$$\alpha_{вт} = \frac{cm(t_1 - t_0) + krm}{F(t_2 - t_1)}, \quad (3)$$

где  $m$  — масса воды, затраченной на охлаждение слитка;  $k$  — доля воды охлаждения, перешедшая в пар;  $t_0$  — начальная температура воды;  $c$  — теплоемкость воды;  $r$  — теплота парообразования воды.

Как видно из анализа формул (2) и (3), наибольшей трудностью в определении коэффициента теплоотдачи является экспериментальное измерение теплоты  $Q_1$  и  $Q_2$ . Из формулы (3) можно в принципе оценить теплообмен, но нельзя оценить, какие механические свойства приобретает слиток после прохождения ЗВО.

При оценке расходов воды используют две характеристики:

$$v_1 = \frac{V_1}{G_1}, \quad (4)$$

$$m_1 = \frac{V_1}{F}, \quad (5)$$

где  $v_1$  — удельный расход воды в ЗВО на единицу массы слитка, м<sup>3</sup>/кг;  $V_1$  — объем затрачиваемой воды в ЗВО;  $G_1$  — масса слитка;  $m_1$  — удельный расход воды на единицу охлаждаемой поверхности, м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>;  $F$  — охлаждаемая поверхность слитка.

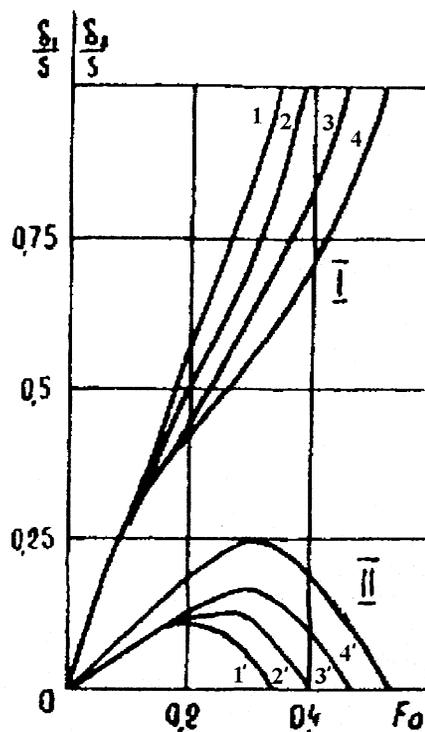


Рис. 2. Зависимости  $\frac{\delta_1}{S} = f_1(Fo)$  и  $\frac{\delta_2}{S} = f_2(Fo)$  для прямоугольного слитка при разных значениях  $Bi$ : 1 —  $Bi=6,0$  и более; 2 — 2,0; 3 — 1,0; 4 —  $Bi=0,65$ ; 1' —  $Bi=6,0$  и более; 2' — 2,0; 3' — 1,0; 4' —  $Bi=0,65$

Следует отметить, что в литературе опубликовано много зависимостей вида

$$\alpha_{вт} = f_1(V_1), \quad (6)$$

$$\alpha_{вт} = f_2(m_1).$$

Однако применение этих зависимостей на практике затруднено из-за их жесткой связи к установкам, на которых они получены, т.е. применение их к другой системе ЗВО некорректно. В общем виде коэффициент теплообмена между слитком и водой является функцией [5]:

$$\alpha_{вт} = f_3(V_1, F, L, v, \lambda), \quad (7)$$

где  $L$  — характерный размер слитка;  $v$  — кинематическая вязкость воды;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности воды.

При использовании водяного охлаждения важным вопросом является тип подачи воды. Возможны варианты струйного и форсуночного охлаждения слитка. При использовании форсуночного охлаждения в распыленном виде подают воду в количестве 1 л/кг. При струйном охлаждении удельный расход воды изменяется от 2,5 до 5,0 л/кг для различных типоразмеров слитка. Причем струйное охлаждение не позволяет применять низкие расходы воды, так как при этом происходит раздутие слитка [3]. Система форсуночного охлаждения дает возможность поддержи-

вать в районе ЗВО температуры порядка 600–700°C, что важно для протекания пластической деформации слитка. При этом количество внутренних трещин уменьшается, что положительно влияет на качество слитка.

При повышении скорости вытягивания слитка в зоне вторичного охлаждения увеличивается вероятность образования трещин, протяженность которых может расти из-за усилий обжатия. Тем более, что слиток, находясь в ЗВО, имеет значительное количество жидкой фазы в сердцевине.

В работе [6] приведена формула, связывающая температуру поверхности слитка и коэффициент теплообмена:

$$t_{\text{пов}} = \frac{\lambda t_{\text{кр}}}{2\alpha\sqrt{A\tau^2 + B\tau + C}} + t_c, \quad (8)$$

где  $t_{\text{пов}}$  – температура поверхности слитка;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $t_{\text{кр}}$  – температура кристаллизации;  $\tau$  – время;  $t_c$  – температура охлаждающей воды;  $A, B, C$  – эмпирические коэффициенты данной МНЛЗ.

По экспериментальным данным было определено, что при форсуночно–роликовом охлаждении коэффициенты теплоотдачи находятся в интервале  $\alpha=400\text{--}500$  ккал/(м<sup>2</sup>·ч·град), а при струйном – 2000–4000 ккал/(м<sup>2</sup>·ч·град).

Авторы [7, 8] считают, что вторичное охлаждение в МНЛЗ должно обеспечить: 1) окончание затвердевания слитка в ЗВО; 2) вода должна подаваться равномерно, чтобы происходило непрерывное падение температуры при отсутствии разогрева поверхности слитка в ЗВО.

Анализ работ, посвященных металлургии слитка, показывает, что расчеты ЗВО при вытяжке слитка касаются в основном коэффициента теплообмена на границе раздела слиток – водяное охлаждение. В то же время известно, что в ЗВО развиваются термические напряжения, которые существенно влияют на дефекты, возникающие при разливке. Простейшим вариантом оценки возникающих растягивающих напряжений внутри слитка является соотношение

$$\sigma = C_1\alpha\Delta T, \quad (9)$$

где  $\Delta T$  – градиент температур между температурой кристаллизации и температурой поверхности;  $C_1$  – эмпирический коэффициент;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи на поверхности слитка.

Формула (9) может быть использована для величины деформаций в виде

$$\epsilon = C_2\alpha\Delta T. \quad (10)$$

Как известно, если деформация достигает определенной величины, то в слитке может образоваться трещина, которая распространяется по толщине слитка. Отсюда следует, что оптимальное охлаждение должно обеспечить такой уровень напряжений, при котором во всех точках слитка

не достигаются критические значения, которые и являются причиной образования трещин. Таким интегральным условием в простейшем случае могут быть неравенства

$$\sigma_{xyz} = C_1\alpha E\Delta T_{ijk}^l < \sigma_{\text{кр}}, \quad (11)$$

$$\epsilon_{xyz} = C_2\alpha E\Delta T_{ijk}^l < \epsilon_{\text{кр}}, \quad (12)$$

где  $E$  – модуль Юнга стали слитка;  $\Delta T_{ijk}^l$  – градиент температур в пространственной точке  $i, j, k$  для  $l$ -й зоны вторичного охлаждения.

Условия (11) и (12) определяют оптимизацию по уровню напряжений и деформаций в слитке. Для учета процесса кристаллизации слитка в области ЗВО используем закон квадратного корня

$$x = \kappa\sqrt{\tau}, \quad (13)$$

где  $\tau$  – время кристаллизации слитка;  $\kappa$  – константа затвердевания слитка;  $x$  – толщина затвердевшей корки.

Величина константы затвердевания может определяться как [9]

$$\kappa = \sqrt{\frac{2\lambda\Delta T}{c\rho}}. \quad (14)$$

Подставляя (14) в (13), можно вычислить время кристаллизации твердой корки слитка:

$$\tau = \frac{x^2}{\kappa^2} = \frac{x^2 c\rho}{2\lambda\Delta T}. \quad (15)$$

По формуле (15) можно найти время кристаллизации с градиентом температур, которое связано с термическими напряжениями и деформациями. Для градиента температур можно определить верхнюю границу по предельно допустимым напряжениям и деформациям

$$M = \max\{\Delta T_{ijk}\}.$$

В то же время тепловой поток между слитком и водой можно рассчитать по формуле [9]

$$q = \frac{\lambda\Delta T}{x} \left(1 + \frac{2c\Delta T}{\lambda_1}\right), \quad (16)$$

где  $\lambda_1$  – удельная теплота кристаллизации слитка. Коэффициент теплоотдачи при этом:

$$\alpha_i = \frac{q_i}{T_{ijk}}, \quad (17)$$

где  $T_{ijk}$  – температура на поверхности слитка;  $\alpha_i, q_i$  – коэффициент теплоотдачи и тепловой поток в  $i$ -м слое.

Сформулируем обобщенную модель оптимизации для ЗВО МНЛЗ. Как известно, ЗВО имеет несколько контуров охлаждения. Допустим, что число контуров  $l=1, n$ . Тогда можно сформулировать следующую модель, состоящую из группы условий, определяющих физику процесса ЗВО:

$$\left\{ \begin{array}{l} C_1 \alpha E M_l < \sigma_{кр}, \\ C_2 \alpha E M_l < \varepsilon_{кр}, \\ \tau_l = \frac{x_l^2 \rho c}{2 \lambda M_l}, \\ q_l = \frac{\lambda M_l}{x_l} \left( 1 + \frac{2c M_l}{\lambda_1} \right), \\ \alpha_l = \frac{q_l}{M_l}, \text{ где } l = 1, n, \\ M_l = \max \{ \Delta T_{ijk}^l \}. \end{array} \right. \quad (18)$$

Если система охлаждения имеет три контура, то математическая модель оптимизации будет иметь следующий вид ограничений по напряжениям и деформациям:

$$\left\{ \begin{array}{l} C_1 \alpha E \Delta T_{ijk}^1 < \sigma_{кр}, \\ C_1 \alpha E \Delta T_{ijk}^2 < \sigma_{кр}, \\ C_1 \alpha E \Delta T_{ijk}^3 < \sigma_{кр}, \\ C_2 \alpha E \Delta T_{ijk}^1 < \varepsilon_{кр}, \\ C_2 \alpha E \Delta T_{ijk}^2 < \varepsilon_{кр}, \\ C_2 \alpha E \Delta T_{ijk}^3 < \varepsilon_{кр}. \end{array} \right. \quad (19)$$

Времена кристаллизации слитка в контурах охлаждения:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_1 = \frac{x_1^2 \rho c}{2 \lambda \Delta T_{ijk}^1}, \\ \tau_2 = \frac{x_2^2 \rho c}{2 \lambda \Delta T_{ijk}^2}, \\ \tau_3 = \frac{x_3^2 \rho c}{2 \lambda \Delta T_{ijk}^3}. \end{array} \right. \quad (20)$$

Коэффициенты теплоотдачи в каждом из контуров:

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_1 = \frac{q_1}{T_{ijk}^1}, \\ \alpha_2 = \frac{q_2}{T_{ijk}^2}, \\ \alpha_3 = \frac{q_3}{T_{ijk}^3}, \\ q_1 = \frac{\lambda \Delta T_{ijk}^1}{x_1} \left( 1 + \frac{2c \Delta T_{ijk}^1}{\lambda_1} \right), \\ q_2 = \frac{\lambda \Delta T_{ijk}^2}{x_2} \left( 1 + \frac{2c \Delta T_{ijk}^2}{\lambda_1} \right), \\ q_3 = \frac{\lambda \Delta T_{ijk}^3}{x_3} \left( 1 + \frac{2c \Delta T_{ijk}^3}{\lambda_1} \right). \end{array} \right. \quad (21)$$

Таким образом, системы (19)–(21) составляют обобщенную математическую модель, которая может быть использована для поиска оптимальных вариантов трехконтурного вторичного охлаждения слитка в МНЛЗ. Для построенной модели можно предложить алгоритм для поиска оптимальных режимов вторичного охлаждения (рис. 3). Следует отметить, что предложенная модель оптимизации режимов вторичного охлаждения МНЛЗ учитывает напряжения и деформации, возникающие на различных участках ЗВО и позволяет систематизировать расчеты зон вторичного охлаждения.

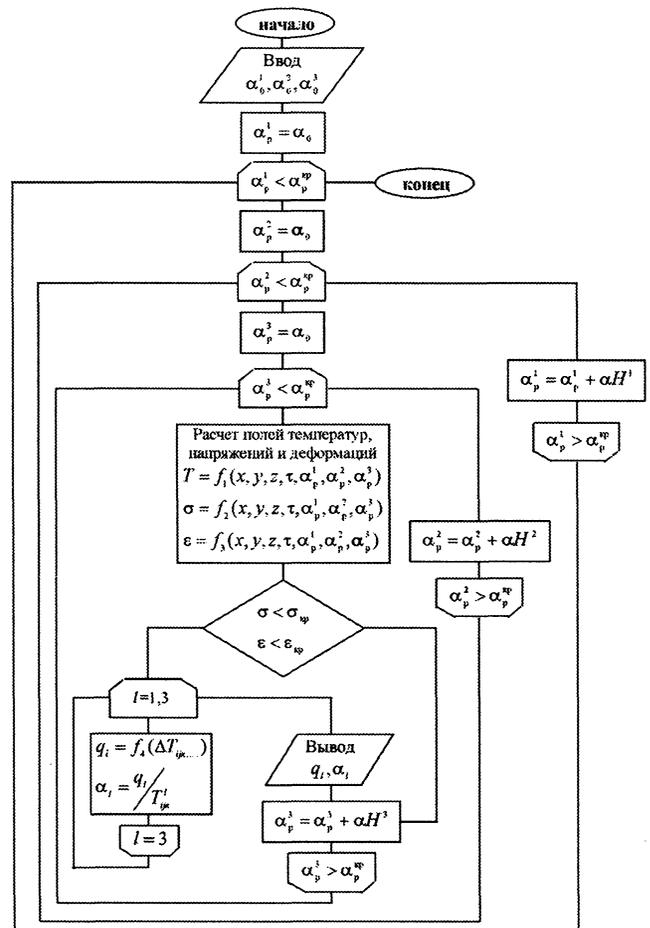


Рис. 3. Алгоритм оптимизации режимов вторичного охлаждения

### Литература

1. Скворцов А.А., Акименко А.Д. Теплопередача и затвердевание стали в установках непрерывной разливки. М.: Металлургия, 1966.
2. Акименко А.Д. Тепловой расчет установок непрерывной разливки стали. Горький: Волго-Вятское книжное издательство, 1965.
3. Журавлев В.А., Китаев Е.М. Теплофизика формирования непрерывного слитка. М.: Металлургия, 1974.
4. Акименко А.Д., Земсков Г.А., Казакович Л.Б. и др. Влияние теплоотдачи от стенки кристаллизатора к охлаждающей среде на процесс затвердевания металла в кристаллизаторах и новые методы охлаждения // Проблемы сталеного слитка. М.: Металлургия, 1969. №4. С. 550–561.

5. Акименко А.Д., Казакович Л.Б., Скворцов А.А., Слуцкий Б.И. Исследование теплоотдачи в зоне вторичного охлаждения УНРС // Изв. вузов. Черная металлургия. 1972. №6. С. 167–170.

6. Акименко А.Д., Скворцов А.А., Китаев Е.М. Исследование тепловых процессов во вторичном охлаждении установок непрерывной разливки стали // Моделирование формирования стальных слитков и исследование теплоотдачи при их затвердевании. Тр. ГПИ. 1970. Т. 26. Вып. 12. С. 17–24.

7. Соколов Л.А., Монохин А.И., Никитенко Н.И. Оптимальные условия затвердевания непрерывного сортового слитка // Сталь. 1969. №12. С. 1092–1094.

8. Никитенко Н.И., Евтеев Д.П., Соколов Л.А., Сновица Н.Р. Об оптимальных условиях охлаждения слитка при динамическом режиме работы установок непрерывной разливки стали // Металлы. 1978. №1. С. 105–113.

9. Бровман М.Я., Сурин Е.В., Грузин В.Г. и др. Энергосиловые параметры установок непрерывной разливки стали. М.: Металлургия, 1969.