

## ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ПРОЦЕССОВ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ\*

А.И. Шарапов, В.И. Дождиков

Липецкий государственный технический университет

Разработана методика оптимизации температурного поля пластины в процессе ее охлаждения. Рассмотрены особенности применения данного алгоритма для технологии непрерывной разливки. Проведенные исследования на МНЛЗ ОАО «НЛМК» показали, что количество поверхностных дефектов уменьшилось в 1,4 раза.

В настоящее время конкурентоспособность предприятий черной металлургии, в первую очередь, зависит от качества выпускаемой металлопродукции. Анализ накопленных в отечественной и мировой практике исследований процессов формирования слитков позволяет сделать вывод, что качество металла существенно зависит от организации теплоотвода.

Организация теплоотвода является задачей оптимизации. С одной стороны, требуется интенсивное охлаждение слитка, чтобы отвести достаточное количество теплоты и придать твердой оболочке необхо-

димую прочность, уменьшить её прогибы, снизить температуру поверхности и тепловой поток от слитка на механическое оборудование. С другой стороны, следует снижать интенсивность охлаждения слитка, чтобы повысить температуру поверхности слитка, уменьшить градиент температуры по сечению твердой оболочки и понизить уровень термических напряжений.

Режимы охлаждения должны обеспечить плавное монотонное изменение температуры поверхности слитка и максимально возможную равномерность температуры по периметру. Чрезмерные разогревы поверх-

---

\*Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 06-08-96339).

ностных слоев слитка могут привести к образованию внутренних и наружных трещин.

С точки зрения качества внутренней структуры и качества поверхности слитка необходимо обеспечить:

- монотонное снижение температуры поверхности слитка;
- равномерность температуры поверхности слитка по периметру;
- минимум разогрева поверхности слитка в отсутствии охлаждения;

Для прогнозирования качества и оптимальных режимов затвердевания слитка нужна соответствующая математическая модель. Для создания таких моделей и решения задач затвердевания металлических сплавов широко используют теорию квазиравновесной двухфазной зоны [1]. Эта теория не учитывает кинетическое и концентрационное (или диффузионное) переохлаждение расплава, так как их величины для реальных условий малы.

Знание температурного поля слитка, толщины твердой оболочки и скорости продвижения фронта затвердевания позволяет более предметно обсуждать сложные явления, сопровождающие процесс формирования кристаллической структуры, и находить решения, ведущие к улучшению качества слитков.

Для определения параметров теплового состояния слитка в работе использовали одномерный вариант дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности, являющегося основным элементом математической модели, построенной в рамках теории квазиравновесной двухфазной зоны с учётом выделения скрытой теплоты кристаллизации [2]:

$$\rho C_{\text{эф}} \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right), \quad (1)$$

где  $t$  – температура;  $\tau$  – время;  $x$  – координата по толщине слитка;  $C_{\text{эф}}$  – эффективная теплоемкость;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $\rho$  – плотность.

Исследовали затвердевание и охлаждение пластин с начальной температурой  $t=1550^\circ\text{C}$ . При использовании пластин из

стали это свидетельствует о начальном жидком состоянии.

При моделировании использовались различные граничные условия второго и третьего рода, меняющиеся во времени, комбинация которых обеспечивала полное затвердевание пластины приблизительно через 20 минут от начала охлаждения. Для решения системы уравнений, входящих в математическую модель, использовали явную схему конечно-разностной аппроксимации.

На первом этапе в системе охлаждения решали задачу оптимизации режимов охлаждения пластины. Задача подбора оптимального режима охлаждения обычно сводится к определению количественных зависимостей между скоростью затвердевания и отводом теплоты затвердевания во внешнюю среду. Расчетные и экспериментальные данные по режиму охлаждения затем корректируют в конкретных условиях с учетом получения качественного металла.

Оптимальный режим охлаждения удобно представлять в виде функции температуры поверхности пластины от времени охлаждения. Такая функция, используемая в качестве граничных условий первого рода, позволяет определить термическую историю слитка и значение различных параметров, характеризующих процесс охлаждения. Для определения вида и параметров этой функции в последнее время все шире используются теоретические методы, основанные на оценке характеристик теплового состояния слитка. Для этой оценки используют различные функционалы, включающие в себя характеристики температурного поля формирующегося слитка.

Для оценки оптимальности режима охлаждения в работе был использован функционал следующего вида [3]:

$$\Phi_{3,4} = \frac{1}{\tau_p} \cdot \int_0^{\tau_p} \frac{1}{\delta(\tau)} \int_0^{\delta(\tau)} f(x,\tau) - \frac{1}{\delta(\tau)} \int_0^{\delta(\tau)} f(x,\tau) dx \Big| dx d\tau, \quad (2)$$

где  $f(x,\tau)$  – функция, описывающая изменение температурного градиента по толщине

оболочки.

В качестве вариантов функции  $f(x, \tau)$  использовали температурный градиент по толщине оболочки и скорость охлаждения металла.

Для описания граничных условий в работе была использована функция вида

$$t = -A \cdot \arctg(C \cdot (\tau - D)) + B, \quad (3)$$

где  $A, B, D$  – постоянные коэффициенты уравнения,  $C$  – параметр, задающий вид режима.

Учитывая рекомендации, вытекающие из решения задачи оптимизации охлаждения металла, с помощью математической модели, решена задача охлаждения и затвердевания слитка, при использовании в качестве граничных условий первого рода функции оптимального изменения температуры поверхности слитка. При этом осуществляли перевод граничных условий первого рода в условия третьего рода, а затем по известному соотношению между  $\alpha$  и плотностью орошения

$g$  трансформировали их в распределение плотности орошения по длине пластины.

Одним из условий получения бездефектного металла является минимизация градиента температуры на поверхности широкой грани. Неравномерность распределения температуры по ширине грани описывали зависимостями вида

$$t_{bk}(z_k, y) = P_k(y), \quad (4)$$

где  $t_{bk}$  – функция распределения температуры по поверхности широкой грани, отражающая действительные условия охлаждения в конкретном производстве по экспериментальным данным на горизонте  $z_k$ ;  $y$  – координата по ширине слитка.

Граничные условия задавали в виде

$$t_n(z) = t_{нк} - A_1 [1 - \exp(-A_2(z - z_k))] , \quad (5)$$

где  $t_n$  – оптимальная температура поверхности слитка;  $t_{нк}$  – температура поверхности слитка при начальных условиях;  $z, z_k$  – те-

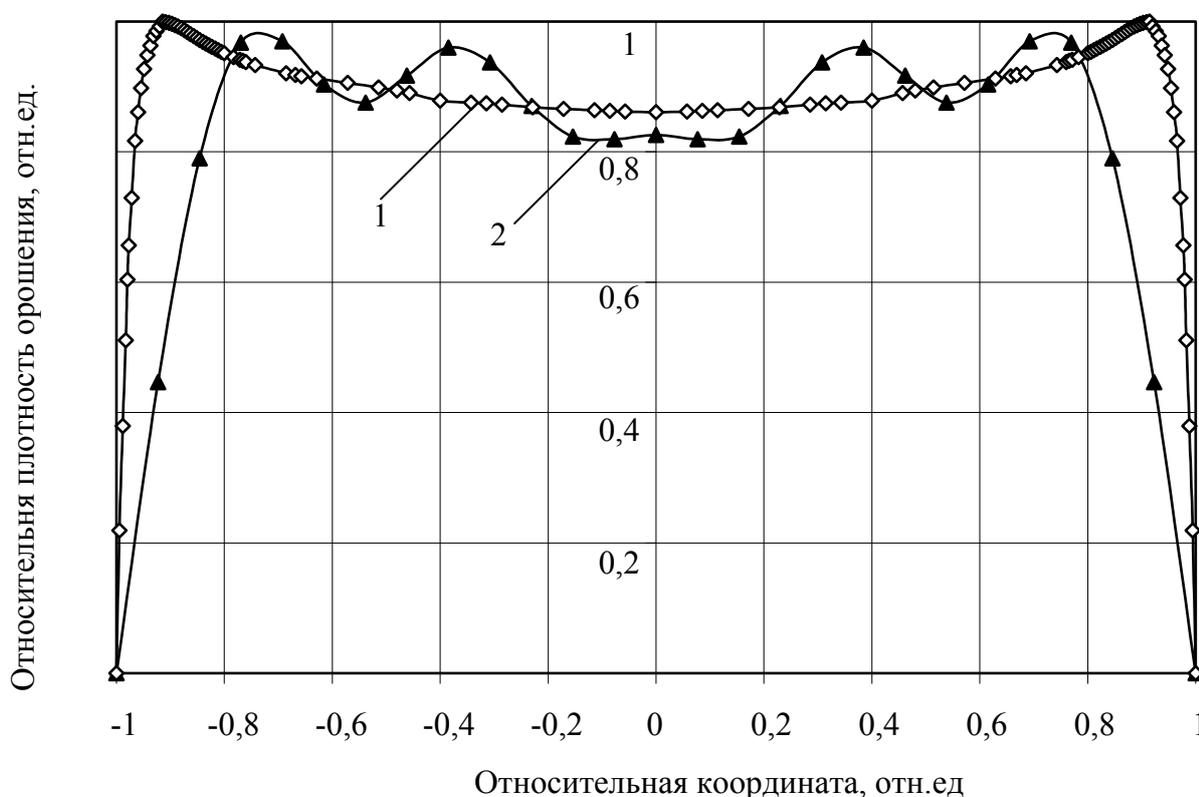


Рис. Сравнение заданной и реализуемой форсункой «К» функций распределения плотности орошения по ширине слитка:

- 1 – расчетное распределение плотности орошения;
- 2 – гидравлическая характеристика форсунки “КУ(2–120)–3,5–3–63”

кущая координата и координата начала участка оптимизации температурного поля вдоль слитка;  $A_1, A_2$  – постоянные коэффициенты.

Для того чтобы уменьшить отклонения условий охлаждения от оптимальных, вводили ограничение на градиент температуры вдоль широкой грани при реализации определенного режима охлаждения

$$\frac{\partial t}{\partial z} \leq \left( \frac{\partial t}{\partial z} \right)_{\max} \quad (6)$$

Тогда приближение условий охлаждения к оптимальным осуществляется на участке длиной  $z_b$ , величина которого определяется из решения уравнения

$$P_k(y) - t_{b1} + A_1 \cdot 1 - \exp -A_2(z_b(y) - z_k) + \left( \frac{\partial t}{\partial z} \right)_{\max} \times z_b(y) = 0 \quad 7$$

Затем полученные данные использовали для определения функции  $\tilde{t}_b(z, y)$ , которая в качестве граничного условия позволяет провести процедуру сглаживания температурного поля поверхности слитка. При переводе граничных условий первого рода в граничные условия третьего рода получены функции распределения коэффициента теплоотдачи по ширине грани для заданных горизонтов по длине пластины. Анализ этих функций позволил выделить участок отсутствия принудительного охлаждения по условию

$$\alpha(z, y) \leq \alpha_b \quad (8)$$

где  $\alpha_b$  – значение эффективного коэффициента теплоотдачи при охлаждении металла на воздухе.

Для части слитка, где на рассматриваемом горизонте это условие не соблюдается, находили функцию соответствия параметров орошения требуемым условиям теплоотвода

$$g = g_0(z, y) \quad (9)$$

Основные характеристики распределения плотности орошения по координате у форсунки сравнивали с заданными по оптимальным условиям охлаждения на данном горизонте.

Для сопоставления распределения предлагаемой зависимости с заданным оптимальным распределением определяли коэффициент соответствия  $K_n$ .

$$K_n = \frac{\sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n \frac{a_j a_k l_i^{k+j+1}}{k+j+1}}{\sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n \frac{a_{0j} a_k l_i^{k+j+1}}{k+j+1}} \quad (10)$$

где  $a_0 \dots a_j \dots a_k$  – постоянные коэффициенты;  $l_i$  – ширина зоны орошения.

Правильность подбора зависимости для заданного горизонта по длине пластины определяется минимизацией невязки:

$$\Delta g = \int_0^{l_i} |g_{z0}(y) - g_{zn}(y)| dy \quad (11)$$

где  $y$  – координата по ширине слитка;  $g_{z0}, g_{zn}$  – требуемая функция распределения плотности орошения и функция распределения задаваемой и регулируемой плотности орошения соответственно.

Анализ этих функций позволяет судить о возможности использования предлагаемых зависимостей, а соответственно, о выбранных форсунках, а также определить эффективность их использования для конкретного горизонта зоны вторичного охлаждения МНЛЗ.

В качестве примера ниже показано сравнение предлагаемой зависимости  $g_{zn}$  с требуемой функцией распределения плотности орошения, соответствующей особенностям температурного поля реального слитка, параметры которого получены экспериментальным путем для фиксированной координаты  $z$  (см. рис.).

Использование разработанной методики оптимизации температурных полей пластин в процессе их охлаждения для технологии непрерывной разливки позволяет улучшить качество слябов из различных марок стали и

увеличить стойкость элементов поддерживающей системы. В рамках совершенствования системы охлаждения УНРС ОАО «НЛМК» разработаны оптимальные режимы охлаждения слитков различных марок стали, разливаемых в широком диапазоне скоростей вытягивания на УНРС. Внедрение скорректированных расходов воды на охлаждение слитка в подбое и ЗВО МНЛЗ ОАО «НЛМК» снизило пораженность слябов продольными и поперечными трещинами в 1,2...1,4 раза.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Борисов, В.Т. Теория двухфазной зоны металлического слитка [Текст]/ В.Т. Борисов - М.: Металлургия, 1987. - 224 с.
2. Самойлович, Ю.А. Формирование слитка [Текст]/ Ю.А. Самойлович – М.: Металлургия, 1977. – 160 с.

3. Дождиков, В.И. Оптимизация охлаждения непрерывного слитка [Текст]/ В.И. Дождиков, В.Я. Губарев, С.В. Милютинский// Труды Второй Российской национальной конференции по теплообмену. Т.7. Теплопроводность и теплоизоляция. – М.: Изд-во МЭИ, 1998. – С. 78–80.

Сведения об авторах

Шарапов Алексей Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики Липецкого государственного технического университета.

E-mail: kaf-pte@stu.lipetsk.ru

Дождиков Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры промышленной теплоэнергетики Липецкого государственного технического университета.

E-mail: kaf-pte@stu.lipetsk.ru