

УДК 621.74.047.08:66.065.52

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ
МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТОЛЩИНЫ ЗАТВЕРДЕВШЕЙ КОРКИ
НЕПРЕРЫВНОЛИТОГО СЛИТКА В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ**

В.Д. Тутарова, А.Н. Калитаев
e-mail: vt-pm@magtu.ru

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,
г. Магнитогорск, Россия

Статья поступила 5 июля 2005 г.

Введение

Один из наиболее важных узлов, определяющих рациональную работу машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) и оптимальное качество непрерывнолитой заготовки, является кристаллизатор, в котором за счет отвода тепла от расплава охлаждающей водой (от 10 % до 30 % всего тепла) происходит формообразование заготовки [1].

Определение закономерностей теплообмена между заготовкой и кристаллизатором является актуальной задачей, поскольку от условий теплообмена зависит производительность МНЛЗ и качество поверхностных и подповерхностных слоев заготовки. Знание закономерностей теплообмена между заготовкой и кристаллизатором позволяет оптимизировать конструкцию кристаллизатора для каждого конкретного случая [2].

1. Методика исследования

Существует много методов, предложенных для расчета толщины слоя затвердевшего металла. В данной статье рассмотрены алгоритмы расчета по методам Хилса и Лейбенсона–Вейника.

Расчет теплового поля заготовки по методу Хилса [3], ведет к полиному, константы которого рассчитывают с учетом поверхностных условий. Уравнения и результаты даны в безразмерных параметрах, что позволяет легко применять их для произвольных исходных данных и размеров заготовки. Расчетom установлены толщина застывшей корки в зависимости от расстояния от уровня металла, температура на поверхности заготовки и тепло, отведенное кристаллизатором.

Одним из таких безразмерных параметров является безразмерное расстояние от уровня стали в кристаллизаторе

$$x' = \frac{\alpha_k^2 x}{\rho c \lambda v} = \frac{\alpha_k^2 \tau}{\lambda c \rho},$$

где x — реальное расстояние, м; τ — время нахождения заготовки на глубине x в кристаллизаторе, с; v — скорость заливки, м с⁻¹; α_k — коэффициент теплоотдачи от поверхности заготовки к охлаждающей воде, Вт·м⁻²·К⁻¹:

$$\alpha_k = \left[\frac{1}{\alpha_1} + \frac{d}{\lambda_{ж}} + \frac{\delta}{\lambda_{Cu}} \right]^{-1}, \tag{1}$$

где d — толщина зазора между заготовкой и стенкой кристаллизатора; $\lambda_{ж}$ — коэффициент теплопроводности жидкого вещества в зазоре; δ — толщина медной стенки кристаллизатора; λ_{Cu} — коэффициент теплопроводности меди; α_1 — коэффициент теплоотдачи от внешней стороны медной стенки кристаллизатора к охлаждающей воде (определяют по критериальным соотношениям).

Хилс использовал критериальное уравнение $Nu=0,023(Re)^{0,8}(Pe)^{0,33}$ и параметры: Y — эффективная длина кристаллизатора, м (соответствует уровню стали в кристаллизаторе); $Y' = Y\alpha_1^2 / (\nu\rho c\lambda)$ — безразмерная длина кристаллизатора; $\xi' = \alpha_k \xi / \lambda$ — безразмерная толщина застывшей стали; ξ — реальная толщина застывшей корки, м; $t = t_n / t_s$ — безразмерная температура поверхности заготовки; t_n — реальная температура поверхности заготовки, °C; t_s — температура солидуса; $H' = L_1 / (ct_s)$ — безразмерное общее тепло затвердевания; L_1 — реальная скрытая теплота затвердевания (включая теплоту перегрева) $L_1 \neq L + c(t_1 - t_s)$, (здесь t_1 — температура разливаемой стали); $Q' = q' / [(\gamma\nu c\rho\lambda)^{1/2} t_s]$ — безразмерное тепло, отведенное от части заготовки длиной x , приходящееся на единицу окружности кристаллизатора; q' — реальное тепло, отведенное из части заготовки длиной x , приходящееся на единицу окружности кристаллизатора за единицу времени.

Введем выражения:

$$\bar{A} = \xi'(\xi' + 2)(\xi'^3 + 3); \quad B = \xi' + 1; \quad D = 5(\xi')^2 + 12\xi' + 6.$$

Преобразованное нами выражение для определения толщины застывшей корки на произвольной глубине в кристаллизаторе представим в следующем виде:

$$x' = \int_0^{\xi'} \frac{6B^2(H'+1) - D + \left\{ [6B^2(H'+1) - D]^2 + 24H'AB \right\}^{1/2}}{12B} d\xi'. \quad (2)$$

Лисиенко В.Г. и Самойлович Ю.А. для данной задачи [4] рассмотрели использование метода Лейбензона–Вейника. Определение закона затвердевания $\xi = \xi(E, C, z, \tau)$ и поля температур в слитке $T = T(x, y, z, \tau)$ взаимосвязано: скорость перемещения границы раздела фаз зависит от градиентов температуры по обе стороны границы, а поле температур, т. е. и поле градиентов температуры — от толщины затвердевшего слоя расплава. Однако исследователи подметили, что в определенных условиях поле температур в твердой оболочке слитка стабилизируется, причем закон распределения температуры по сечению твердой корки не зависит (или почти не зависит) от условий на межфазной границе. В наиболее полном виде это обстоятельство учтено А.И. Вейником, которому удалось получить сравнительно несложные расчетные соотношения.

Вейник А.И. разделил процесс затвердевания отливки на ряд этапов. В частности, период непосредственного затвердевания начинается лишь после снятия перегрева расплава, что позволяет упростить расчетные формулы.

Допуская отсутствие перегрева жидкой фазы, А.И. Вейник аппроксимирует стабилизированное поле температур следующим соотношением:

$$T = T_k - (T_k - T_n) \left(1 - \frac{x}{\xi} \right)^n \quad \text{при } 0 \leq x \leq \xi \quad (3)$$

$$T = T_k = \text{const} \quad \text{при } \xi \leq x \leq S_0,$$

где координата x отсчитывается от охлаждаемой поверхности слитка, м; $\xi = \xi(\tau)$ — толщина твердой корки, м; $2S_0$ — полная толщина плоского слитка при его двухстороннем симметричном охлаждении, м; T_k — температура кристаллизации металла, К; T — среднемассовая температура затвердевшей корочки слитка, К; τ_k — время полного затвердевания, с.

Число подобия Фурье рассчитывается по формуле $F_0 = a\tau/S_0^2$, где $a = \lambda/\rho c$ — коэффициент температуропроводности металла, m^2/c ; λ , ρ и c — соответственно коэффициент теплопроводности, плотность и удельная теплоемкость металла, Вт/($m^2 \cdot K$), kg/m^3 и Дж/($kg \cdot K$); S_0 — половина толщины плоской отливки при ее двухстороннем симметричном охлаждении, м; $\delta = \xi/S_0$ — безразмерная толщина твердой корки металла; $\delta_0 = \xi_0/S_0$ — безразмерная начальная толщина твердой корки к моменту полного снятия перегрева металла (ξ_0 — соответствующая толщина, м); α — суммарный коэффициент теплоотдачи на поверхности слитка, Вт/($m^2 \cdot K$); $N_1 = q_k/c(T_k - T_H)$ — число подобия процесса кристаллизации в модели А.И. Вейника (теплофизическое число подобия); T_H — температура окружающей среды, К.

В частности, при задании неизменной температуры на охлаждаемой поверхности расчет толщины затвердевшей корки переходит в закон квадратного корня

$$\xi(\tau) = S_0 \sqrt{M_1 F_0 + \delta_0^2}, \quad (4)$$

где M_1 — видоизмененное число подобия процесса кристаллизации:

$$M_1 = 2\pi \frac{n+1}{1+N_1(n+1)}.$$

2. Результаты

Для изучения процессов кристаллизации слитка в кристаллизаторе проведено математическое моделирование зависимости минимально необходимой толщины затвердевшей оболочки сляба на выходе из кристаллизатора от содержания углерода и серы в металле, температуры металла в промежуточном ковше и скорости вытягивания сляба из кристаллизатора. Для настройки модели использовались фактические толщины слоя затвердевшего металла под кристаллизатором при прорывах, возникающих из-за трещин в корке нормальной толщины, полученные при разливке стали в условиях ОАО «ММК» на слябы сечением 250×1300 мм², приведенные в таблице.

Параметры непрерывной разливки стали

Параметр	Марка стали	
	Ст 3сп	08пс
Содержание в стали, %:		
углерода	0,14	0,06
серы	0,019	0,017
Температура металла в промежуточном ковше, °С	1534	1550
Скорость вытягивания сляба из кристаллизатора, м/мин	0,7	0,8
Толщина корки затвердевшего металла под кристаллизатором, мм	28..29	24..26

В результате моделирования были получены графики роста толщины затвердевшей корки слитка для всех перечисленных выше способов расчета для стали марки Ст 3сп (рис. 1) и 08пс (рис. 2).

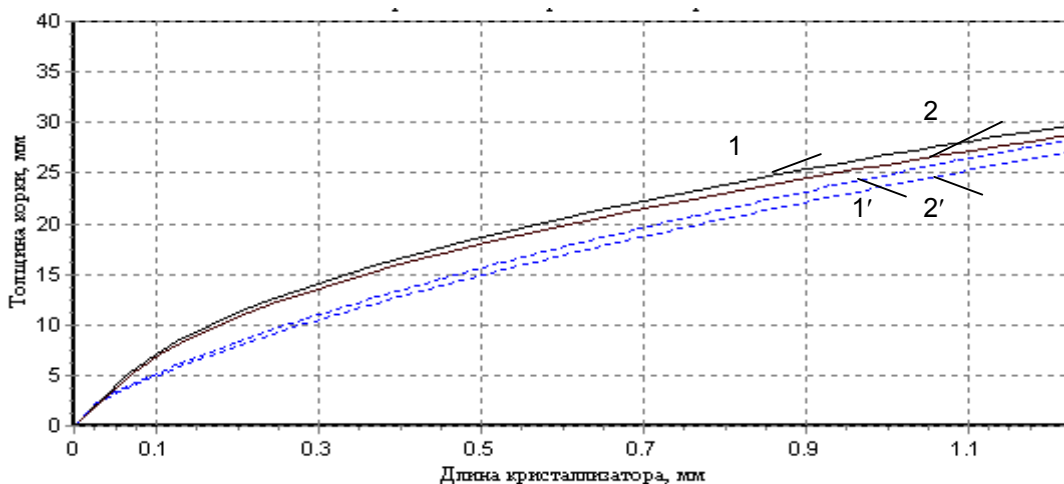


Рис. 1. Изменение толщины затвердевшей корки слитка в кристаллизаторе для стали марки Ст 3сп:

1 — по методу Лейбензона–Вейника, 1' — по методу Хилса ($v=0,7$ м/мин, $T_c=1498$ °С);
 2 — по методу Лейбензона–Вейника, 2' — по методу Хилса ($v=0,75$ м/мин, $T_c=1476$ °С)

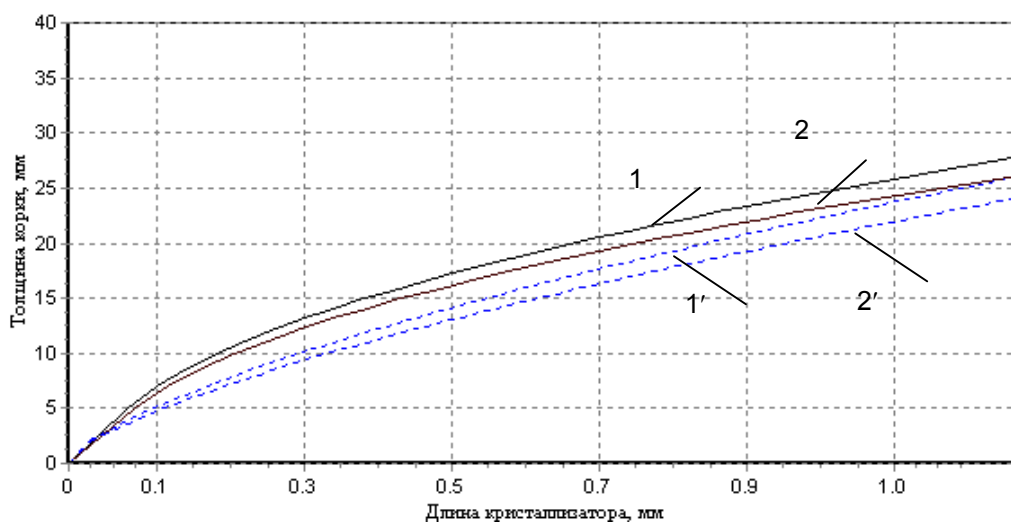


Рис. 2. Изменение толщины затвердевшей корки слитка в кристаллизаторе для стали марки 08пс:

1 — по методу Лейбензона–Вейника, 1' — по методу Хилса ($v=0,8$ м/мин, $T_c=1517$ °С);
 2 — по методу Лейбензона–Вейника, 2' — по методу Хилса ($v=0,9$ м/мин, $T_c=1517$ °С)

3. Обсуждение

Максимальная разность между значениями толщины затвердевшей корки в кристаллизаторе, полученными различными способами, не превысила в диапазоне полного затвердевания слитка 3 мм, что позволяет судить о достаточной надежности результатов расчетов. Однако метод Лейбензона–Вейника дает результаты, которые более точно согласуются с полученными фактическими данными.

На рис. 3 приведены графики изменения толщины затвердевшей корки слитка вдоль технологической оси МНЛЗ при разных скоростях вытягивания слитка.

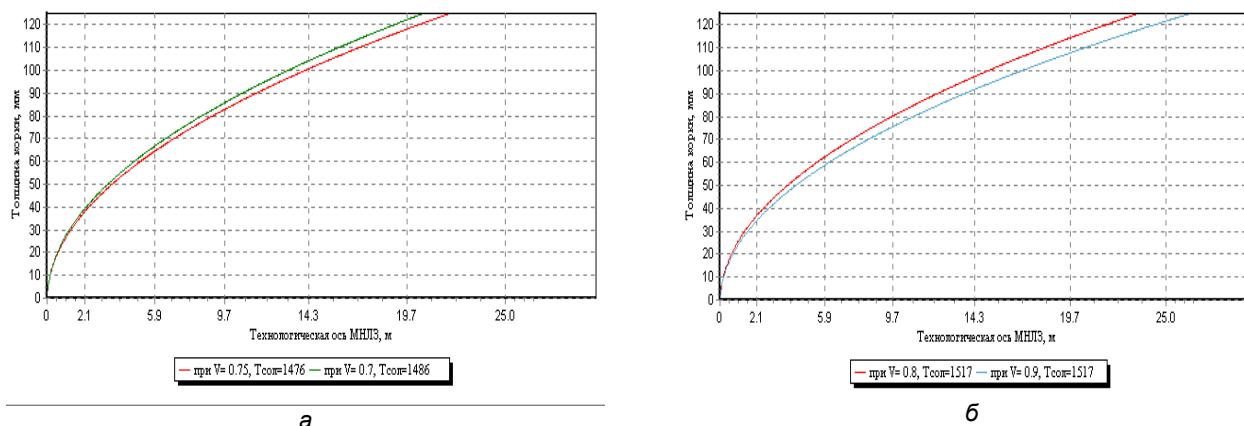


Рис. 3. Изменение толщины затвердевшей корки слитка вдоль технологической оси МНЛЗ

а — для стали марки Ст. 3сп; б — для стали марки 08пс

Заключение

С увеличением скорости вытягивания и величины перегрева над температурой кристаллизации уменьшается толщина затвердевшей корки металла на выходе из кристаллизатора. Хорошо видно, что при небольшой величине перегрева стали над температурой начала кристаллизации, весь перегрев успевает сняться в кристаллизаторе. Для обеспечения необходимой толщины корочки на выходе из кристаллизатора нужно снижать или скорость вытягивания слитка из кристаллизатора, или температуру металла в промежуточном ковше.

Список литературы

1. Емельянов В.А. Тепловая работа машин непрерывного литья заготовок. — М.: Металлургия, 1988. 143 с.
2. Никитенко Н.И., Соколов Л.А. К исследованию кристаллизации непрерывного слитка прямоугольного сечения // Изв. АН СССР. Металлы, 1969. № 3. С. 72—79.
3. Шмрга Л. Затвердевание и кристаллизация стальных слитков / Пер. с чешск. под ред. Кашина В.И. — М.: Металлургия, 1985. 248 с.
4. Лисиенко В.Г., Самойлович Ю.А. Теплотехнические основы технологии и конструирования машин непрерывного литья заготовок. Издательство Красноярского университета: Красноярск, 1986. 120 с.