

УДК 669.14.1.

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОХЛАЖДЕНИЯ  
НЕПРЕРЫВНОЛИТОГО СЛИТКА  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЗОНЫ ТЕПЛОИЗОЛИРОВАНИЯ**

Л.Л. Демиденко, Ю.А. Демиденко  
e-mail: demjura@mmk.ru

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

Статья поступила 11 апреля 2002 г.

Одной из важнейших задач при непрерывной разливке стали является применение энергосберегающих и экологически улучшенных технологий, которые позволяют сберечь материальные и энергетические ресурсы.

В процессе выплавки стали затрачивается определенное количество тепловой энергии, которая аккумулируется в слитках, формирующихся в кристаллизаторе. При этом, в процессе затвердевания часть теплоты теряется, определенная часть потерянной теплоты восстанавливается в слитке перед обработкой металла давлением в пламенных нагревательных печах.

При использовании теплоты жидкой сердцевины слитка возможно уменьшить и даже исключить промежуточный нагрев в пламенных нагревательных печах и непосредственно передавать их на прокатный стан. Таким образом, возникает проблема рационального использования теплоты расплава с целью уменьшения затрат топлива и других энергоносителей.

Для разработки способа тепловой обработки непрерывнолитого слитка в МНЛЗ после кристаллизатора для обеспечения прямой прокатки необходимо исследовать процесс затвердевания слитка.

Практическая задача определения динамики затвердевания расплава во времени включает расчет температурного поля, определение скорости движения фронта кристаллизации во времени, глубины жидкой фазы слитка и может быть решена с помощью средств математического моделирования.

Для решения данной задачи была разработана двумерная математическая модель, в основу которой было положено уравнение теплопроводности с учетом скрытой теплоты кристаллизации, которая определялась по линейному закону в соответствии с правилом рычага при помощи введения эффективной теплоемкости  $C_3(T)$ . Для учета конвективного переноса вводился коэффициент эффективной теплопроводности  $\lambda_3(T)$ . Плотность стали определялась в зависимости от температуры и усреднялась в двухфазной зоне:

$$\rho_3 c_3 \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_3 \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_3 \frac{\partial T}{\partial y} \right) + q_v;$$

$$\lambda_3(T) = \begin{cases} \lambda_{ж}, & \text{при } T > T_L \\ \lambda_T \varphi + \lambda_{ж}(1 - \varphi), & \text{при } T_c < T < T_L \\ \lambda_T, & \text{при } T < T_c \end{cases}$$

$$c_{\text{э}}(T) = \begin{cases} c_{\text{ж}}, & \text{при } T > T_L \\ c_{\text{т}} + \frac{(c_{\text{т}} + c_{\text{ж}})}{(T_{\text{с}} + T_L)}(T + T_{\text{с}}), & \text{при } T_{\text{с}} < T < T_L \\ c_{\text{т}}, & \text{при } T < T_{\text{с}} \end{cases}$$

$$\rho_{\text{э}}(T) = \begin{cases} \rho_{\text{ж}}, & \text{при } T > T_L \\ \rho_{\text{т}} + \frac{(\rho_{\text{т}} + \rho_{\text{ж}})}{(T_{\text{с}} + T_L)}(T + T_{\text{с}}), & \text{при } T_{\text{с}} < T < T_L \\ \rho_{\text{т}}, & \text{при } T < T_{\text{с}} \end{cases}$$

Предполагалось, что температурное поле симметрично относительно осей координат.

По всей длине МНЛЗ задавались граничные условия в соответствии с условиями теплового взаимодействия между поверхностью слитка и окружающей средой.

Моделирование проводилось для скоростей вытягивания 0,6—1,4 м/мин для слитков прямоугольного сечения размерами 250x750—1050 мм и 250x1100—2350 мм, в 5—11 секциях зоны вторичного охлаждения (ЗВО) в модели применялось ограничение на температуру поверхности и интенсивность теплоотдачи регулировалась расходом воды.

Реализация модели осуществлялась численным методом расщепления по координатам (неявная схема), методом переменных направлений и прогонки.

С помощью критериев Фишера, Стьюдента и Манны–Уитни проверялась адекватность модели по сходимости расчетных значений температур поверхности слитка с экспериментальными температурами, измеренными на МНЛЗ N 3,4 ККЦ АО «ММК» с помощью пирометра СОМЕТ 1000 IR–ANIS 600~3000 (Япония) с диапазоном измерения температур 600—3000 °С. Экспериментальные данные по расходам воды и скорости вытягивания слитка были получены с помощью регулирующего микроконтроллера Ремиконт Р–112 п/с «охлаждение» с горячим резервированием. На рисунке 1 представлены экспериментальные и промоделированные при тех же параметрах значения температуры угла для слитка марки Зсп толщиной 250 мм и шириной 1560 мм при средней скорости вытягивания слитка  $v = 0,739$  м/мин, измеренные на расстоянии 42 м от верхней точки кристаллизатора.

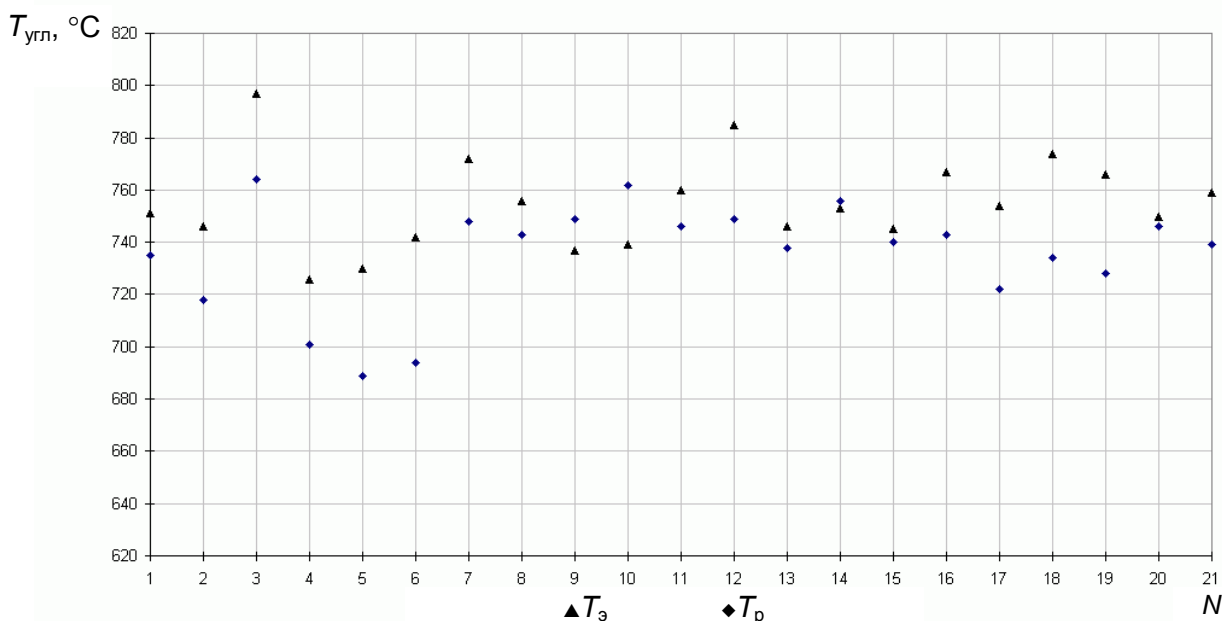


Рис. 1. Экспериментальные и расчетные значения температуры угла слитка

В отличие от традиционной технологии, в модели затвердевание жидкой сердцевины происходит не в конце ЗВО, а в зоне теплоизоляции [1, 2]. Изотермы солидуса по длине МНЛЗ для скоростей вытягивания слитка 0,6—1,4 м/мин при использовании теплоизоляции представлены на рис. 2. Длина теплоизоляционной зоны была принята максимальной — 17,3 м. Установлено, что при скоростях вытягивания свыше 1,3 м/мин для полного затвердевания слитка перед порезкой на мерные длины необходимо увеличить интенсивность охлаждения в ЗВО.

В соответствии с рекомендациями [3, 4, 5] были выбраны требования к рациональным режимам литья стали:

- полное затвердевание сердцевины непрерывнолитого слитка перед порезкой на мерные длины ( $T_{ц} < T_{лик}$ );
- обеспечение температуры поверхности заготовки на выходе из МНЛЗ  $T_{нов} > 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$  для уменьшения риска возникновения трещин на поверхности;
- сохранение среднемассовой температуры слитка  $T_{ср. м}$  не ниже  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

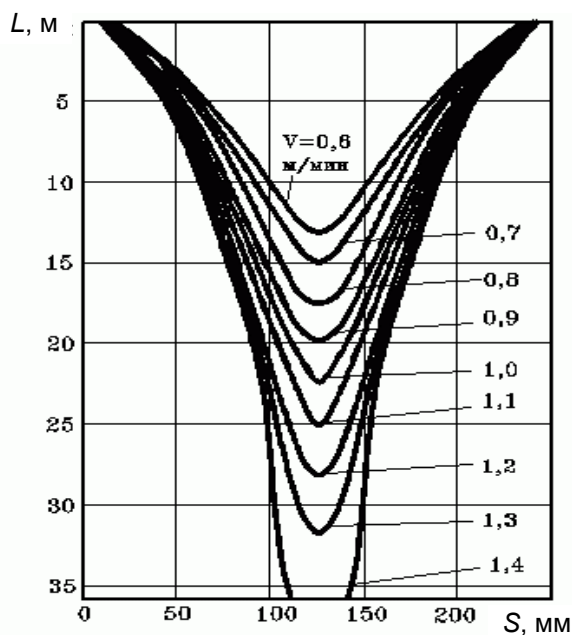


Рис. 2. Изотермы солидуса по длине МНЛЗ в зависимости от скоростей вытягивания слитка

Полученный график зависимости среднемассовой температуры слитка по длине МНЛЗ от скоростей вытягивания при использовании рациональных режимов литья показан на рис. 3.

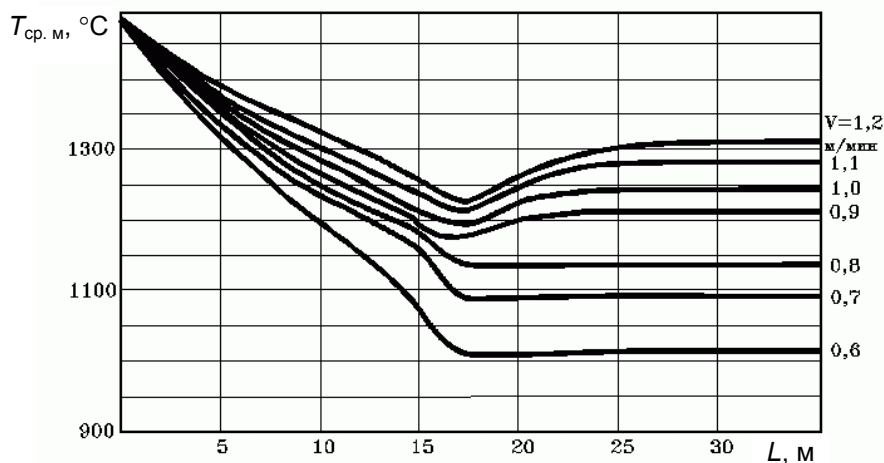


Рис. 3. Зависимость среднемассовой температуры слитка от скорости вытягивания при использовании теплоизоляции.

## Заключение

По результатам моделирования установлено, что при использовании теплоизоляции в зоне воздушного охлаждения происходит повышение среднemasсовой температуры непрерывнолитого слитка на 160—260 °С, температуры поверхности широкой грани на 260—320 °С, узкой грани — на 225—270 °С, угла — на 270—350 °С, что позволяет сделать вывод о возможности применения прямой прокатки.

## Список литературы

1. Девятов Д.Х., Шварцкопф А.А. Расчет параметров последовательных процессов охлаждения и теплоизоляции в криволинейных МНЛЗ // Б.И. — 1998. — № 43. — С. 74—75.
2. Девятов Д.Х., Демиденко Л.Л. Оптимальные параметры зоны тепловой обработки непрерывно литого слитка в МНЛЗ // Изв. вузов. Черная металлургия. — 1995. — № 2. — С. 62—64.
3. Емельянов В.А. — Тепловая работа машин непрерывного литья заготовок. — М.: Металлургия, 1988. — 143 с.
4. Самойлович Ю.А. Микрокомпьютер в решении задач кристаллизации слитка. — М.: Металлургия, 1988. — 182 с.
5. Евтеев Д.П., Колыбалов И.Н. Непрерывное литьё стали. — М.: Металлургия, 1984. — 200 с.