

не превышает 1,5 % ( $\delta_k \leq 0,16$  при  $f_n = 0,05 \div 0,08$  и  $l_k/D_k = 0,3 \div 0,5$  [1]).

**Выводы.** Получены формулы для расчета напряжения волочения и определения оптимальных углов канала волочительного инструмента, учитывающие дополнительные сдвиги на входе и выходе зоны деформации. Показано, что оптимальные углы зависят от коэффициента трения, вытяжки и противонапряжения. Определено, что при малых значениях вытяжки и коэффициента трения возможно применение приближенных формул.

УДК: 621.746.27

*Н.А. Краюшкин, Н.П. Кузнецова*

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ КРУГЛЫХ СОРТОВЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ МАРОК СТАЛЕЙ ПРИ ПОЛУНЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКЕ СТАЛИ

Непрерывная разливка стали в значительной мере определяет эффективность современного сталеплавильного производства. Но, как известно, сортовые заготовки из высококачественных марок сталей (хромистые, хромоникелевые, хромоникельмарганцовистые, легированные титаном и алюминием, конструкционные и т.п.) выгоднее получать на установках полунепрерывной разливки стали (УПНРС). В связи с этим актуальна задача совершенствования оборудования и технологии полунепрерывной разливки в целях обеспечения высокого качества полунепрерывнолитых заготовок (ПНЛЗ) при высокой производительности агрегатов.

Одна из основных проблем повышения качества полунепрерывнолитых круглых заготовок заключается в устранении или уменьшении различного рода трещин, особенно овалностей и продольных горячих трещин, причиной возникновения и развития которых являются напряжения в формирующемся полунепрерывном слитке, возникающие в кристаллизаторе и превышающие предел прочности металла. По данным работы [1], появление этих напряжений в основном обусловлено изменяющимся во времени температурным полем оболочки слитка. Это изменение особенно заметно в области, где корочка затвердевающего металла начинает отходить от гильзы кристаллизатора. В этой области происходит резкий разогрев поверхности металла, что ведет к появлению различных дефектов и трещин [2, 3]. Таким образом, качество круглых полунепрерывных заготовок во многом зависит от условий их охлаждения.

В данной работе обобщаются основные рекомендации по организации рационального режима охлаждения, при котором вероятность образования трещин

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Перлин И.Л., Ерманок М.З. Теория волочения. – М.: Металлургия, 1971. – 448 с.
2. Колмогоров Г.Л., Латышева Т.В., Филиппов В.Б. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2007. № 4. С. 41 – 43.
3. Колмогоров Г.Л. Гидродинамическая смазка при обработке металлов давлением. – М.: Металлургия, 1986. – 168 с.
4. Джонсон У., Меллор П. Теория пластичности для инженеров. – М.: Машиностроение, 1979. – 567 с.

© 2012 г. В.Н. Трофимов, Т.В. Кузнецова,  
Т.Е. Мельникова  
Поступила 28 января 2012 г.

круглого слитка в кристаллизаторе минимальна. На основе математического моделирования процесса затвердевания проводится поиск рационального режима охлаждения полунепрерывнолитых круглых заготовок из высококачественных марок сталей с диаметром 250 мм. Анализ выполняется на основе рассмотрения процессов затвердевания полунепрерывнолитых заготовок в кристаллизаторе. При этом физико-химический процесс кристаллизации из рассмотрения исключается.

Для описания процесса затвердевания за основу принималось дифференциальное уравнение энергии с внутренними источниками тепла, особенностью которого является учет выделения теплоты кристаллизации. В общем виде уравнение энергии при наличии внутренних источников тепла записывается в виде [1]:

$$\left(\frac{dh}{dt}\right) = \text{div}(\lambda \text{grad } T) + q_v, \quad (1)$$

где  $dh/dt$  – полная (субстанциальная) производная энтальпии по времени, Дж/(м<sup>3</sup>·с);  $q_v$  – объемная плотность внутренних источников тепла, Вт/м<sup>3</sup>;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  $T$  – температура, К.

Представленное дифференциальное уравнение энергии рассматривает кристаллизацию полунепрерывнолитого слитка как результат одновременного протекания тепловых, диффузионных и гидродинамических явлений. В строгой постановке оно должно быть дополнено дифференциальным уравнением диффузии. Однако реализация такой модели встречает серьезные трудности, поэтому в инженерной практике вводятся упрощения

для достижения главной цели – исследования тепловых режимов формирования бездефектного полунепрерывного слитка.

В соответствии с принятой моделью решаем уравнение теплопроводности:

$$C(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}[(T)\text{grad } T] + q_v, \quad (2)$$

Учет зависимости от температуры теплофизических характеристик  $C(T)$ ,  $\lambda(T)$  приводит к сугубо нелинейной постановке задачи нестационарной теплопроводности.

В затвердевающей слитке можно выделить три области: твердую фазу, жидкую фазу и зону двухфазного состояния.

В твердой фазе зависимости от температуры  $\lambda$  и  $C$  учитываются по эмпирическим данным.

В жидкой фазе наряду с переносом теплоты теплопроводностью протекает конвективный перенос. Его характер в значительной мере зависит от способа подвода жидкого металла в кристаллизатор, а интенсивность при прочих равных условиях возрастает с увеличением объема жидкометаллической лунки, при наличии электромагнитного перемешивания и т.д. Для учета конвективного теплопереноса вводится эквивалентный коэффициент теплопроводности  $\lambda_{ж}$  в жидкой среде.

Для анализа кинетики развития двухфазного состояния разработано множество теоретических моделей различной сложности. В разработанной метаматематической модели теплопроводности наличие двухфазной зоны учитывается путем присвоения численных значений теплофизическим параметрам с учетом зависимости относительной объемной доли жидкой фазы от температуры. При этом вводится понятие эффективной теплоемкости  $\bar{C}$ , учитывающей выделение скрытой теплоты кристаллизации.

По данным работы [4] теплоемкость в двухфазной зоне определяется по следующей зависимости:

$$C(T)_s = \begin{cases} C_{ж}, & \text{при } T > T_L \\ C(T) - q_{кр} \left( \frac{\partial \Psi}{\partial T} \right), & \text{при } T_S < T < T_L \\ C_T, & \text{при } T < T_S \end{cases}, \quad (3)$$

где  $\Psi = \frac{T_L - T}{T_L - T_S}$

Плотность теплового потока на фронте затвердевания, Вт/(м<sup>2</sup>·К), определяли с учетом скорости затвердевания  $v$ , м/с, изменяющейся в процессе нарастания корочки затвердевшего расплава:

$$q_{кр} = \rho L v, \quad (4)$$

где  $L$  – скрытая теплота затвердевания, Вт/м<sup>3</sup>.

С учетом осевой симметрии круглых сортовых заготовок получаем нелинейное дифференциальное уравнение теплопроводности в цилиндрических координатах

$$C\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\lambda}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \quad (5)$$

со следующими граничными условиями:

– на границе расплав – корочка затвердевшего металла:

$$T(r, t)_{r_{жк}} = T_{расп}, \quad (6)$$

где  $T_{расп}$  – температура расплава, К;

– на внешней границе:

$$-\lambda(T, r) \left( \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} \right)_{r=R} = q^0(t), \quad (7)$$

где  $q^0(t)$  – плотность теплового потока на охлаждаемой поверхности затвердевшей корки металла.

Плотность теплового потока на охлаждаемой поверхности рассчитывали по следующей формуле:

$$q^0(t) = k [T(R, t) - T_{охл}] + \varepsilon_0^{np} [T^4(R, t) - T_{ст}^4], \quad (8)$$

где  $T(R, t)$  – температура наружной поверхности затвердевшей корочки, К;  $T_{охл}$  – температура охлаждающей среды, К;  $\varepsilon_0^{np}$  – приведенная степень черноты наружной поверхности корочки;  $T_{ст}$  – внутренняя температура стенки кристаллизатора, К, которую можно упрощенно

определить по следующей зависимости:  $T_{ст} = q \frac{\delta_m}{\lambda_m} + T_{охл}$ ,

где  $\delta_m$  – толщина стенки кристаллизатора, м;  $\lambda_m$  – коэффициент теплопроводности материала стенки кристаллизатора, Вт/(м·К);  $q$  – плотность теплового потока от внутренней стенки кристаллизатора к охлаждающей воде, Вт/м<sup>2</sup>;  $k$  – коэффициент теплопередачи от затвердевающей корочки к охлаждающей среде (вода), Вт/(м<sup>2</sup>·К), определяемый по следующей формуле:

$$k = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{ж}} + \frac{1}{\alpha_{в}}}, \quad \text{где } \delta_i - \text{толщина } i\text{-го слоя, м;}$$

$\lambda_i$  – коэффициент теплопроводности  $i$ -го слоя, Вт/(м·К);  $\alpha_{ж}$  – коэффициент теплоотдачи от жидкого металла к твердой корочке, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\alpha_{в}$  – коэффициент теплоотдачи от воды к стенкам кристаллизатора, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Решение находили методом конечных разностей, аппроксимируя дифференциальное уравнение теплопроводности (2) в конечно-разностном виде по неявной четырехточечной разностной схеме. Полученную систему уравнений решали методом прогонки.

На основе проведенного аналитического обзора литературных данных обобщены основные условия получения высококачественных ПНЛЗ [2, 3, 5]:

- монотонное, без участков вторичного разогрева снижение температуры поверхности по всей длине кристаллизатора;
- равномерное распределение температуры по площади сечения слитка в процессе разливки;
- обеспечение температуры поверхности в конце кристаллизатора на уровне 1100 – 1200 °С;
- ограничение скорости охлаждения и градиентов температур по толщине затвердевающей корочки.

Поиск рационального режима охлаждения заготовки проводили путем анализа изменения толщины зазора между кристаллизатором и затвердевающей корочкой. Увеличению зазора можно препятствовать путем применения кристаллизатора с обратной конусностью, тем самым уменьшая зазор, интенсифицируя теплоотвод в нижней части кристаллизатора и снижая коэффициент теплопередачи, которым и определяется интенсивность охлаждения круглой заготовки. Кроме того в зазор предлагается подавать шлакообразующую смесь.

В целях уменьшения разогрева поверхности затвердевающей корочки и уменьшения появления дефектов и трещин расчет охлаждения в кристаллизаторе проводился на шести участках. Были приняты следующие характерные точки: при  $X < 0,072L$   $\delta_1 = 0 - 0,2$  мм,  $k_1 = 1820$  Вт/(м<sup>2</sup>·К); при  $0,072L < X < 0,217L$   $\delta_2 = 0,2 - 0,6$  мм,

$k_2 = 1300$  Вт/(м<sup>2</sup>·К); при  $0,217L < X < 0,362L$   $\delta_3 = 0,6 - 1,0$  мм,  $k_3 = 820$  Вт/(м<sup>2</sup>·К); при  $0,362L < X < 0,58L$   $\delta_4 = 1,0 - 1,6$  мм,  $k_4 = 600$  Вт/(м<sup>2</sup>·К); при  $0,58L < X < 0,797L$   $\delta_5 = 1,6 - 2,0$  мм,  $k_5 = 430$  Вт/(м<sup>2</sup>·К); при  $0,797L < X$   $\delta_6 > 2$  мм,  $k_6 = 360$  Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Здесь  $X$  – относительная координата точки;  $L$  – длина кристаллизатора, равная 900 мм;  $\delta$  – толщина зазора между затвердевающим металлом и стенкой кристаллизатора;  $k$  – коэффициент теплопередачи от затвердевающей корочки к охлаждающей воде.

Изменение температуры поверхности корочки в кристаллизаторе во времени показано на рис. 1, из которого видно, что данный режим обеспечивает почти монотонное снижение температуры по всей длине кристаллизатора, давая минимальный разогрев корочки.

На рис. 2 приведено изменение толщины затвердевающей корочки по длине кристаллизатора во времени. Как видно, затвердевание при данном режиме происходит равномерно и постепенно.

Скорость охлаждения поверхности заготовки в кристаллизаторе в процессе расчета монотонно снижалась с 78 до 1 °С/с.

Исходя из рис. 1, 2 и проведенных экспериментов, можно сделать вывод о рациональных параметрах разливки для слитков сечением 250 мм:

- скорость разливки  $v = 0,7$  м/мин;
- толщина корочки слитка на выходе из кристаллизатора  $d = 23$  мм;

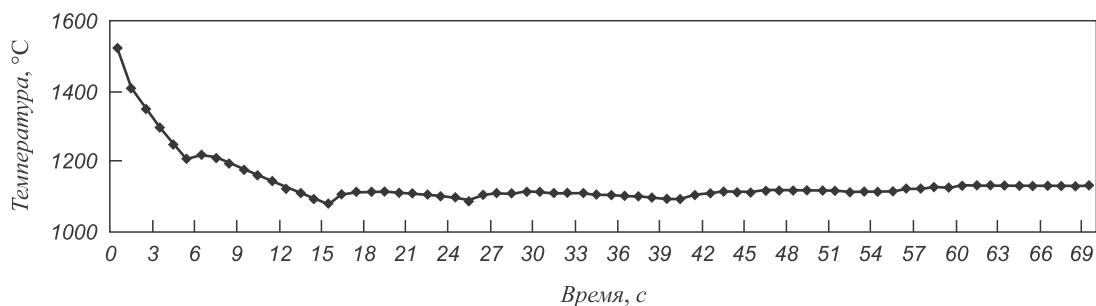


Рис. 1. Изменение температуры поверхности корочки в кристаллизаторе во времени

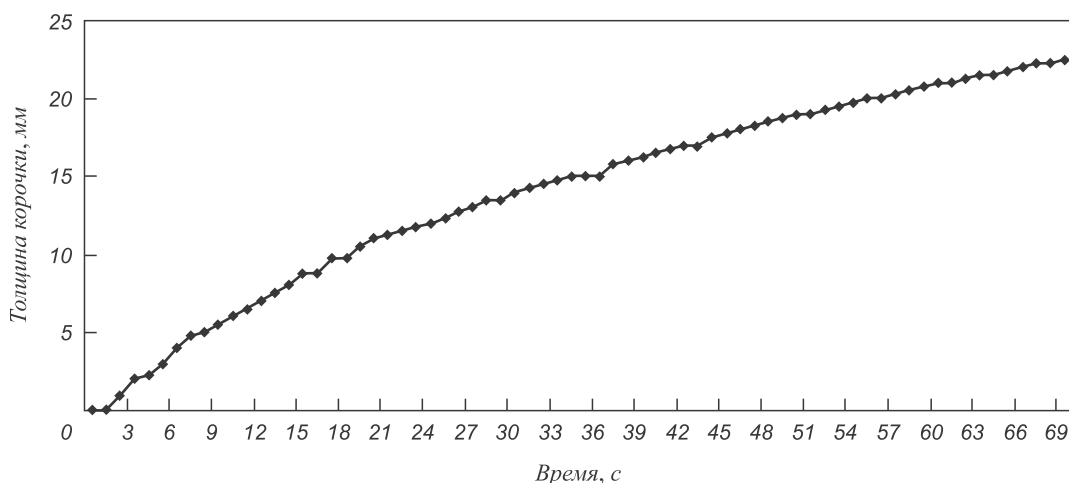


Рис. 2. Изменение толщины корочки в кристаллизаторе во времени

- температура поверхности корочки на выходе из кристаллизатора  $T = 1120$  °С;
- в зазор между расплавом и стенкой кристаллизатора подается шлакообразующая смесь с коэффициентом теплопроводности  $\lambda = 0,9$  Вт/(м<sup>2</sup>·К);
- время пребывания расплава в кристаллизаторе до образования корочки толщиной 23 мм  $\tau = 1,15$  мин.

Для реализации такого режима можно рекомендовать использовать систему электромагнитного перемешивания, качания кристаллизатора и использование графитовой смазки для отделения корочки от стенок медной гильзы в самом начале процесса затвердевания. Так же рекомендуется использовать кристаллизатор с обратной конусностью для уменьшения толщины зазора между гильзой кристаллизатора и корочкой затвердевающего металла и интенсификации теплоотвода.

Исследования проводились на вертикальной УПНРС металлургического завода (МЗ) «Электросталь». Общая длина кристаллизатора на ней составляет 900 мм, а реальный теплоотвод происходит только на участке длиной 300 – 400 мм, что подтверждается серией практических экспериментов, проведенных на МЗ «Электросталь». В рассмотренном режиме теплоотвод будет происходить по всей длине кристаллизатора, что обеспечивается предложенными техническими решениями.

Таким образом, данный режим охлаждения позволяет минимизировать термические напряжения в затвердевающей слитке и снизить вероятность образования трещин. Его можно считать рациональным для разлива круглых заготовок указанного сечения.

**Выводы.** Разработан рациональный с точки зрения минимизации дефектов режим охлаждения круглых сортовых заготовок из высококачественных марок сталей сечением 250 мм. Модель позволяет исследовать тепловые режимы затвердевания при полунепрерывной разливке круглых заготовок из высококачественных марок сталей и может быть использована для выбора рациональных режимов разливки.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Непрерывнолитые круглые заготовки. В.Я. Генкин, А.Т. Есаулов, М.И. Староселецкий и др. – М.: Металлургия, 1984. – 143 с.
2. Стальной слиток. Т. 2: Затвердевание и охлаждение – Ю.А. Самойлович и др. – Минск: Белорусская наука, 2000. – 640 с.
3. Самойлович Ю.А. О выборе критериев оптимального затвердевания слитка // Оптимизация теплофизических процессов литья. – Киев: ИПЛ АН УССР. 1997. С. 59 – 65.
4. Борисов В.Т. Теория двухфазной зоны металлического слитка. – М.: Металлургия, 1987. – 406 с.
5. Шишкин В.А., Кузнецова Н.П., Чугункова М.С. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2011. № 5. С. 51 – 54.

© 2012 г. *Н.А. Краюшкин, Н.П. Кузнецова*  
Поступила 12 февраля 2012 г.