

ТЕХНОЛОГИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

669.02/09

РАСЧЕТ ТЕПЛОВОГО ПРОФИЛЯ РАБОЧИХ СТенок КРИСТАЛЛИЗАТОРА МАШИНЫ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК

*Канд. техн. наук, доц. С.В. Лукин, д-р. техн. наук, проф. В.Р. Аниелес, д-р. техн. наук, проф. П.Г. Русаков,
асп. Г.Н. Шестаков, асп. А.Г. Поверин*

Описана методика расчета оптимального с точки зрения теплопередачи профиля рабочей стенки кристаллизатора машины непрерывного литья заготовок, при котором обеспечивается плотный контакт слитка с рабочей стенкой и высокая интенсивность теплообмена по всей высоте кристаллизатора. Отличие данной расчетной методики состоит в том, что процессы усадки, затвердевания и теплообмена в кристаллизаторе рассматриваются в тесной взаимосвязи друг с другом.

При разливке стали на машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) в кристаллизаторе формируется твердая оболочка, отделяющая жидкий металл от рабочей стенки кристаллизатора. Если рабочая стенка выполнена без учета усадки слитка, то отход оболочки от рабочей стенки происходит, когда скорость усадки превышает скорость пластической деформации оболочки под действием ферростатического давления жидкого металла [1].

Для обеспечения высокой интенсивности теплообмена слитка с кристаллизатором и исключения деформации его оболочки необходим плотный контакт слитка с рабочей стенкой, для чего профиль рабочих стенок должен быть выполнен с учетом усадки слитка.

При расчете усадки слитка и выборе профиля рабочей стенки процессы усадки, затвердевания и теплообмена слитка с кристаллизатором нужно рассматривать одновременно, поскольку они взаимно влияют друг на друга, однако в существующих методиках процессы затвердевания и усадки рассматривают в отрыве от процесса теплообмена.

В [2], [3] разработана математическая модель охлаждения и затвердевания слитка в кристаллизаторе, предполагающая, что по всей высоте кристаллизатора оболочка слитка в целом прижата к рабочей стенке ферростатическим давлением. При контакте горячей поверхности металла с относительно холодной рабочей поверхностью стенки поверхностный слой оболочки локально охлаждается и, в результате его термического сжатия, между металлом и стенкой образуется зазор, заполняемый смазкой. Зазор характеризуется эффективным коэффициентом теплопроводности λ_3 , который, при достаточной текучести смазки практически равен молекулярному коэффициенту теплопроводности смазки. При образовании зазора теплообмен между слитком и рабочей поверхностью резко ухудшается, оболочка разогревается и, в результате термического расширения металла, поверхность слитка прижимается к рабочей поверхности кристаллизатора. Рассмотренный процесс повторяется многократно, и протекает во всех точках рабочей поверхности.

В математической модели [2], [3] средняя стохастическая толщина зазора между поверхностью слитка и рабочей поверхностью кристаллизатора в зависимости от времени затвердевания τ определяется выражением:

$$\delta(\tau) = - \int_0^{\tau} \left(\int_0^{\xi_c(\tau)} \beta_l \cdot \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} \cdot dx \right) \cdot d\tau, \quad (1)$$

где $\beta_l = \beta_l(t)$ – температурный коэффициент линейного расширения твердой стали в зависимости от температуры; $\xi_c = \xi_c(\tau)$ – толщина оболочки слитка по температуре солидус в зависимости от τ ; $t(x, \tau)$ – температурное поле слитка в зависимости от расстояния x от его поверхности в момент τ .

При расчете теплоотдачи от поверхности слитка к охлаждающей воде следует учитывать наличие гарнисажа из застывшей смазки на рабочей стенке вблизи уровня мениска жидкого металла. Пусть $\delta_0 > 0$ – толщина гарнисажа. Термическое сопротивление от поверхности слитка к охлаждающей воде определяется выражениями:

$$R(\tau) = \delta_0 / \lambda_{см} + \delta_c / \lambda_c + 1 / \alpha_в, \quad \delta(\tau) \leq \delta_0; \quad (2,а)$$

$$R(\tau) = \delta(\tau) / \lambda_3 + \delta_c / \lambda_c + 1 / \alpha_в, \quad \delta(\tau) > \delta_0, \quad (2,б)$$

где $\lambda_{см}$ – коэффициент теплопроводности смазки; δ_c – толщина рабочей стенки; λ_c – коэффициент теплопроводности материала стенки; $\alpha_в$ – эффективный коэффициент теплоотдачи от рабочей стенки к воде, учитывающий форму охлаждаемых каналов. Для щелевого кристаллизатора методика определения $\alpha_в$ приведена в [4]. Коэффициент теплоотдачи от поверхности слитка к охлаждающей воде равен:

$$\alpha(\tau) = 1 / R(\tau). \quad (3)$$

Температурное поле оболочки слитка в кристаллизаторе с достаточной точностью описывается уравнением теплопроводности:

$$C_{\text{эф}} \cdot \rho \cdot \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{\text{эф}} \cdot \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} \right), \quad 0 < x < B, \quad 0 < \tau, \quad (4)$$

где $C_{\text{эф}}$ – эффективная теплоемкость стали; $\lambda_{\text{эф}}$ – эффективный коэффициент теплопроводности стали; ρ – плотность стали; B – половина толщины слитка. Выражения для расчета $C_{\text{эф}}$ и $\lambda_{\text{эф}}$ приведены, например, в [5].

Начальное условие имеет вид:

$$t(x, 0) = t_0, \quad 0 < x < B, \quad (5)$$

где t_0 – температура жидкой стали, заливаемой в кристаллизатор.

Граничные условия имеют вид:

$$\left. \frac{\partial t}{\partial x} \right|_{x=B} = 0; \quad \left. \frac{\partial t}{\partial x} \right|_{x=0} = -\alpha(\tau) / \lambda \cdot (t(0, \tau) - t_b), \quad (6)$$

где λ – коэффициент теплопроводности стали; t_b – средняя температура охлаждающей воды.

Система уравнений (1) – (6) составляет математическую модель теплообмена слитка с кристаллизатором при условии, что обеспечивается плотный контакт слитка с рабочей стенкой. В [2] и [3] показана адекватность данной модели. На основе уравнений (1) – (6) можно численно рассчитать процесс затвердевания слитка в кристаллизаторе и определить толщину оболочки слитка по температуре ликвидус ξ_L в зависимости от расстояния от мениска z . При стационарной скорости разливки v имеется простое соотношение между z и τ : $Z = v \cdot \tau$.

Рассмотрим усадку слитка в кристаллизаторе, при условии, что оболочка слитка не деформируется под действием ферростатического давления жидкого металла. Массовый расход металла через произвольное сечение кристаллизатора определяется так:

$$G = v \cdot (S_T \cdot \rho_T + S_J \cdot \rho_J), \quad (7,а)$$

где v – скорость разливки; S_T, S_J – площади поперечного сечения слитка, занятые, соответственно, твердой и жидкой фазой; ρ_T и ρ_J – средние плотности твердой и жидкой фаз слитка.

Площадь сечения слитка равна: $S = S_T + S_J$. В верхней части кристаллизатора, где имеется одна жидкая фаза, уравнение массового расхода запишем так:

$$G = v \cdot S_0 \cdot \rho_J, \quad (7,б)$$

где S_0 – площадь сечения кристаллизатора в верхней части.

Поскольку расход G и скорость v являются одинаковыми для всех сечений кристаллизатора, то из выражений (7а) и (7б) получим:

$$\frac{S}{S_0} = \frac{1 + S_T/S_{ж}}{1 + (S_T/S_{ж}) \cdot (\rho_T/\rho_{ж})} \quad (8)$$

Так как $\rho_{ж} < \rho_T$, то из (8) следует, что $S < S_0$, то есть сечение слитка в нижней части кристаллизатора меньше, чем в верхней части.

Профиль рабочей стенки следует выбирать так, чтобы проходное сечение кристаллизатора на данном уровне равнялось сечению слитка.

Рассмотрим прямоугольный кристаллизатор, у которого площадь сечения на уровне мениска равна $2L_0 \times 2B_0$, где L_0 и B_0 – полуширина и полутолщина кристаллизатора на уровне мениска. Пусть $2L$ и $2B$ – ширина и толщина слитка на расстоянии z от мениска. Схема сечения кристаллизатора и слитка показана на рис. 1.

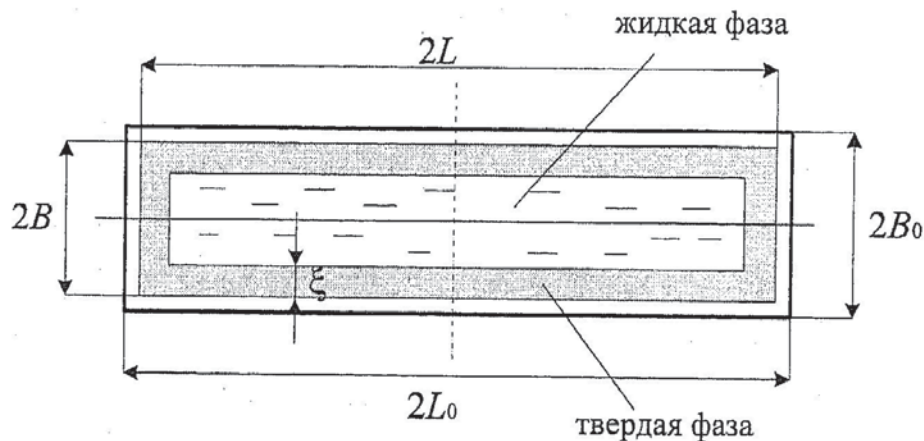


Рис. 1 Схема сечения слитка и кристаллизатора.

В силу симметрии достаточно рассмотреть четвертую часть сечения кристаллизатора и слитка. Площади сечения слитка и кристаллизатора на уровне мениска и на расстоянии z определяются выражениями:

$$S_0 = L_0 \cdot B_0; S = L \cdot B. \quad (9)$$

Изменение полуширины ΔB и полутолщины ΔL слитка и кристаллизатора в результате усадки составит:

$$\Delta B = B_0 - B; \Delta L = L_0 - L. \quad (10)$$

Можно считать, что ΔB намного меньше B_0 , а ΔL намного меньше L_0 . Если принять, что толщина твердой фазы слитка нарастает равномерно по периметру кристаллизатора, то $\Delta B \cong \Delta L$. С учетом этого, а также соотношений (9) и (10), изменение площади сечения слитка равно:

$$\Delta S = S_0 - S = B_0 \cdot L_0 - B \cdot L = \Delta B \cdot L_0 + \Delta L \cdot B \cong \Delta B \cdot (L + B). \quad (11)$$

Пусть $\xi_n(z)$ – толщина твердой фазы по температуре ликвидус на отметке z . Площади сечения твердой и жидкой фаз слитка определяются так:

$$S_T \cong (A + B) \cdot \xi_n; \quad S_{\text{ж}} = S - S_T \cong B \cdot A - (A + B) \cdot \xi_n. \quad (12)$$

На основе (8), (9), (11) и (12) получено выражение:

$$\Delta B(z) \cong \Delta A(z) \cong (\rho_T(z)/\rho_{\text{ж}} - 1) \cdot \xi_n(z), \quad (13)$$

где $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкого металла; $\rho_T(z)$ – средняя плотность твердой фазы на отметке z . Величина $\rho_T(z)$ определяется так:

$$\rho_T(z) = \frac{1}{\xi_n(z)} \int_0^{\xi_n(z)} \rho(t(x, z)) \cdot dx, \quad (14)$$

где $\rho(t)$ – зависимость плотности твердой фазы от температуры.

Как следует из (13), величина усадки слитка по ширине и толщине пропорциональна толщине твердой фазы. Толщина твердой фазы по высоте кристаллизатора существенно зависит от скорости разливки, поэтому профиль рабочих стенок должен соответствовать максимальной скорости.

Для расчета усадки слитка по формулам (13) и (14), и выбора оптимального профиля рабочей стенки, необходимо рассчитать процесс теплообмена и затвердевания слитка в кристаллизаторе по математической модели, представленной уравнениями (1) – (6), в которой процессы теплообмена и затвердевания слитка в кристаллизаторе рассчитываются при условии плотного контакта между слитком и рабочей стенкой, что как раз и должно обеспечиваться при оптимальном профиле рабочих стенок.

В [6] представлены данные о проведенных в 1999 году эксплуатационных испытаниях на сортовой МНЛЗ. Для оптимизации теплопередачи здесь впервые был применен кристаллизатор с параболической конусностью. Испытания показали, что кристаллизаторы с параболическим профилем допускают чрезвычайно высокую скорость литья (порядка 5 м/мин и выше) при достаточно хорошем качестве сортовых заготовок. Рассчитаем процесс усадки квадратного слитка 100 × 100 мм в сортовом кристаллизаторе для скоростей разливки 3,5 и 5 м/мин на основе уравнений (1) – (6), (13), (14). Теплофизические параметры зададим такими же, как для среднеуглеродистой стали с содержанием углерода 0,45 %; начальная температура жидкой стали $t_0 = 1550$ °С; толщина медной рабочей стенки $\delta_c = 11$ мм; коэффициент теплопроводности меди $\lambda_c = 380$ Вт/(м·°С); температура охлаждающей воды $t_b = 20$ °С; эффективный коэффициент теплоотдачи $\alpha_b = 35000$ Вт/(м²·°С); в сортовом кристаллизаторе в качестве смазки применяется рапсовое масло с коэффициентом теплопроводности $\lambda_{\text{см}} = 0,1$ Вт/(м·°С); с учетом хорошей те-

кучести рапсового масла можно положить $\lambda_3 = \lambda_{см}$; толщина гарнисажа принималась равной $\delta_0 = 0,015$ мм. Расчет производился численно методом конечных разностей.

На рис. 2 показано уменьшение толщины слитка $2\Delta B$ в результате усадки в зависимости от координаты z для скоростей разливки 3,5 и 5 м/мин. Также на рис. 2 показана зависимость профиля рабочей стенки сортового кристаллизатора от координаты z , построенная по данным [6].

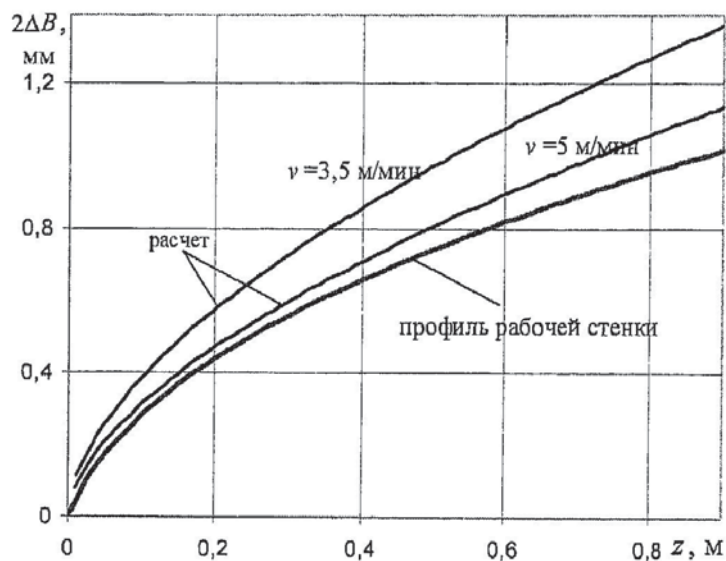


Рис. 2 Усадка сортовой заготовки и профиль рабочей стенки

Сравнение расчетных данных, приведенных на рис. 2, и расчетных данных, приведенных в [6], показало, что они достаточно хорошо согласуются друг с другом. Чем больше скорость разливки, тем меньше усадка слитка в кристаллизаторе. Из рис. 2 следует, что при скорости 5 м/мин теоретическая усадка слитка больше, чем изменение профиля рабочей стенки. В действительности, под действием ферростатического давления оболочка слитка будет прижиматься к рабочей стенке. В случае, если теоретическая усадка слитка будет меньше, чем изменение профиля кристаллизатора, то будет происходить интенсивное истирание рабочей поверхности кристаллизатора и ухудшение теплопередачи в верхней части кристаллизатора.

ВЫВОДЫ

1. Профиль рабочих стенок кристаллизатора должен выбираться с учетом марки стали, теплофизических свойств смазки и скорости разливки.
2. Параболический профиль рабочих стенок кристаллизатора является достаточно близким к оптимальному.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ефимов В.А., Эльдарханов А.С. Современные технологии разливки и кристаллизации сплавов. – М.: Машиностроение. 1998. – 360 с.
2. Лукин С.В., Шестаков Н.И., Страшко Т.И. Математическая модель теплообмена сляба с рабочей стенкой кристаллизатора машины непрерывного литья заготовок // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2007. – № 3. – С. 13–16.
3. Лукин С.В., Шестаков Н.И., Страшко Т.И., Зверев А.В. Охлаждение и затвердевание металла в кристаллизаторе машины непрерывного литья заготовок // Металлы, 2007. – № 3. – С. 20–26.
4. Шестаков Н.И., Калягин Ю.А., Манько О.В., Лукин С.В. Теплообмен в рабочей стенке щелевого кристаллизатора машины непрерывного литья заготовок // Проблемы машиностроения и надежности машин, 2004. – №3. – С. 78 – 81.
5. Цаплин А.И. Теплофизика внешних воздействий при кристаллизации стальных слитков на машинах непрерывного литья. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН. 1995. – 238 с.
6. Хорбах У., Коккентидт Й., Юнг В. Литье сортовых заготовок с высокой скоростью через кристаллизатор параболического профиля // МРТ. – 1999. – С. 42 – 51.
7. .

621.825.52.001.2

МЕХАНИЗМ УПРОЧНЕНИЯ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

Докт. техн. наук, проф. В.А. Бубнов, канд. техн. наук, доц. С.Г. Костенко

Установлено влияние пластической деформации аустенитных сталей на изменение их механических характеристик прочности, пластичности, ударной вязкости, а также магнитных свойств. На основании экспериментальных данных получена зависимость для определения предела выносливости аустенитных сталей, прошедших деформационное упрочнение.