

The evaluation of changing of the cast temperature in crystallizer is carried out.

А. М. БОДЯКО, П. И. ЗИМОНИН, И. А. МЕЛЬНИКОВ, А. А. СУПОНЕВ,
Институт технологии металлов НАН Беларуси

УДК 621.746.27

ЗАТВЕРДЕВАНИЕ ОТЛИВКИ ПРИ НЕПРЕРЫВНО-ЦИКЛИЧЕСКОМ ЛИТЬЕ НАМОРАЖИВАНИЕМ

Качество литых изделий во многом определяется скоростью отвода теплоты от отливки. Для получения заготовок с заданными структурой и свойствами необходимо знать кинетику затвердевания и охлаждения металла и влияние этих факторов на процесс формирования отливки. Анализ механизма формирования поллой отливки без применения стержня, т.е. непосредственно из расплава, показывает, что условия ее охлаждения значительно изменяются по высоте зоны затвердевания. Отливка наиболее интенсивно охлаждается и затвердевает в зоне формирования начальной корки, затем интенсивность охлаждения и скорость затвердевания уменьшаются за счет образования газового зазора. Величина зазора определяется величиной усадки твердой корки. В течение всего времени формирования отливки фронт затвердевания подвержен воздействию жидкого перегретого металла, находящегося в полости кристаллизатора, поэтому характерная особенность формирования непрерывно-циклической отливки заключается в том, что в кристаллизаторе в каждый данный момент можно отметить наличие всех последовательных стадий охлаждения металла. Анализ условий формирования непрерывной отливки показывает, что теплофизические характеристики процесса не остаются постоянными во времени и пространстве, поэтому в расчетах пользуются их средними значениями.

Так как в процессе затвердевания отливки между ее наружной поверхностью и кристаллизатором образуется газовый зазор, то в связи с этим коэффициент теплопередачи значительно уменьшается, что вызывает замедление роста корки. До определенной толщины затвердевшей корки коэффициент теплопередачи имеет постоянную величину и поэтому наблюдается почти прямолинейная зависимость между временем выдержки и толщиной затвердевшей корки.

В дальнейшем увеличивается газовый зазор, который оказывает существенное влияние на теплообмен, что приводит к уменьшению коэффициента теплопередачи с течением времени. Особенностью формирования отливки в кристаллизаторе является то, что отливка охлаждается, а кристаллизатор прогревается с определенной интенсивностью. Увеличение количества затвердевшей фазы сопровождается значительным изменением температур, обменивающихся теплотой поверхностей. На процесс влияют особенности выделения теплоты кристаллизации перегрева металла, изменение термического сопротивления и температурного напора в зазоре между отливкой и кристаллизатором. Известно, что наиболее эффективным, доступным и дешевым средством влияния на процесс охлаждения отливок является применение в качестве охлаждающего агента воды. В связи с этим в кристаллизаторе используется охлаждающая способность воды для интенсификации направленного затвердевания отливок.

На внутренней поверхности отливки в течение всего времени ее формирования сохраняется температура $T_{\text{сол}}$. В общем случае затвердевание реальной отливки происходит в интервале температур кристаллизации $\Delta T_{\text{кр}}$. При $\Delta T_{\text{кр}} > 0$ перед фронтом затвердевания имеет место переходная зона. В этой зоне температура металла изменяется от солидуса до ликвидуса, а состояние металла — от твердого до жидкого, причем количество твердой фазы уменьшается в направлении от корки к жидкому ядру отливки.

Формирование наружной корки отливки начинается сразу же после заполнения кристаллизатора расплавом, а затвердевание внутренних слоев отливки — через некоторый промежуток времени в зависимости от перегрева металла. Время с момента окончания заполнения кристаллизатора до достижения металлом температуры начала затвердевания определяется по формуле

$$\alpha_1 F T dt = FR \rho_1 c_1' dT, \quad (1)$$

где α_1 — коэффициент теплопередачи; R , F — радиус и площадь внутренней поверхности кристаллизатора.

Интегрируя выражение (1), получаем

$$t_0 = \frac{R\rho_1 c_1'}{\alpha_1} \ln \frac{T_{\text{зал}}}{T_{\text{сол}}} \quad (2)$$

Составим уравнение теплового баланса отливки и кристаллизатора. При затвердевании корки толщиной ξ к поверхности отливки изнутри подводится количество теплоты [1]:

$$dQ_1 = Fq_{\text{кр}}\rho_1 \left(1 - \frac{\xi}{R}\right) d\xi, \quad (3)$$

где ρ_1 – плотность материала отливки; R и ξ – радиус отливки и толщина затвердевшей корки; $q_{\text{кр}}$ – эффективная удельная теплота кристаллизации, включающая перегрев металла. Количество тепла, аккумулированное твердой коркой, определяется из уравнения [2]:

$$dQ_2 = \left(F\rho_1 c_1' (T_{\text{зал}} - T_{\text{сол}}) + F\rho_1 c_1 (T_{\text{сол}} - T_1) \frac{1 - \frac{\xi}{R}}{2 - \frac{\xi}{R}} \right) d\xi, \quad (4)$$

где c_1' и c_1 – удельная теплоемкость жидкого и твердого чугуна; F – площадь поверхности отливки; T_1 – температура отливки.

Интегрируя выражения (1) и (2), получаем

$$Q_1 = Fq_{\text{кр}}\rho_1 \xi \left(1 - \frac{\xi}{2R}\right), \quad (5)$$

$$Q_2 = F\rho_1 c_1' (T_{\text{зал}} - T_{\text{сол}}) \xi \left(1 - \frac{\xi}{2R}\right) + F\rho_1 c_1 (T_1 - T_{\text{сол}}) \left(\frac{\xi^2}{6R} + \frac{R}{3} \ln|2R - \xi| \right). \quad (6)$$

Дифференцируем выражение (3) по температуре T_1 :

$$dQ_2 = F\rho_1 c_1 \left(\frac{\xi^2}{6R} + \frac{R}{3} \ln|2R - \xi| \right) dT_1. \quad (7)$$

Данное количество теплоты передается через газовый зазор:

$$Q = F\beta(T_1 - T_2)t, \quad (8)$$

где $\beta = \lambda_3/X_3$ – термическая проводимость зазора; λ_3 , X_3 – толщина и теплопроводность зазора.

Дифференцируем выражение (6) по времени:

$$dQ = F\beta(T_1 - T_2) dt. \quad (9)$$

Составим уравнение теплового баланса:

$$\beta(T_1 - T_2)t = q_{\text{кр}}\rho_1 \xi \left(1 - \frac{\xi}{2R}\right) + \rho_1 c_1' (T_{\text{зал}} - T_{\text{сол}}) \xi \left(1 - \frac{\xi}{2R}\right) + \rho_1 c_1 (T_1 - T_{\text{сол}}) \left(\frac{\xi^2}{6R} + \frac{R}{3} \ln|2R - \xi| \right). \quad (10)$$

Составим уравнение теплового баланса в дифференциальной форме:

$$\beta(T_1 - T_2) dt = \rho_1 c_1 \left(\frac{\xi^2}{6R} + \frac{R}{3} \ln|2R - \xi| \right) dT_1. \quad (11)$$

Температуру внутренней поверхности кристаллизатора определяем из уравнения (8):

$$T_2 = T_1 - \frac{1}{\beta t} \left(q_{\text{кр}}\rho_1 \xi \left(1 - \frac{\xi}{2R}\right) + \rho_1 c_1' (T_{\text{зал}} - T_{\text{сол}}) \xi \left(1 - \frac{\xi}{2R}\right) + \rho_1 c_1 (T_1 - T_{\text{сол}}) \left(\frac{\xi^2}{6R} + \frac{R}{3} \ln|2R - \xi| \right) \right). \quad (12)$$

Подставляя T_2 в (9) и разделяя переменные, получаем дифференциальное уравнение

$$\frac{dt}{t} = \frac{c_1 \left(\frac{\xi^2}{6R} + \frac{R}{3} \ln|2R - \xi| \right) dT_1}{q_{\text{кр}} \xi \left(1 - \frac{\xi}{2R}\right) + c_1' (T_{\text{зал}} - T_{\text{сол}}) \xi \left(1 - \frac{\xi}{2R}\right) - c_1 T_{\text{сол}} \left(\frac{\xi^2}{6R} + \frac{R}{3} \ln|2R - \xi| \right) + c_1 \left(\frac{\xi^2}{6R} + \frac{R}{3} \ln|2R - \xi| \right) T_1}. \quad (13)$$

Интегрируя выражение (11), получаем

$$T_1 = \frac{c_1 T_{\text{сол}} \left(\frac{\xi^2}{6R} + \frac{R}{3} \ln|2R - \xi| \right) - q_{\text{кр}} \xi \left(1 - \frac{\xi}{2R} \right) - c_1' (T_{\text{зал}} - T_{\text{сол}}) \xi \left(1 - \frac{\xi}{2R} \right) + (t - t_0)}{c_1 \left(\frac{\xi^2}{6R} + \frac{R}{3} \ln|2R - \xi| \right)} \quad (14)$$

Для определения значения толщины затвердевшей корки используем закон квадратного корня [3]

$$\xi = K\sqrt{\tau}, \quad (15)$$

где $\tau = t - t_0$; K – коэффициент затвердевания.

Возможность применения этого выражения для расчета затвердевания реальных, имеющих конечные размеры отливок неоднократно анализировалась в разных исследованиях. Считается общепринятым, что для отливок круглого сечения закон квадратного корня применим в начальный период затвердевания до значений относительной толщины затвердевшей корки $\delta = \frac{\xi}{R} = 0,3 - 0,4$.

Подставляя выражение (13) в уравнение (12), окончательно получаем

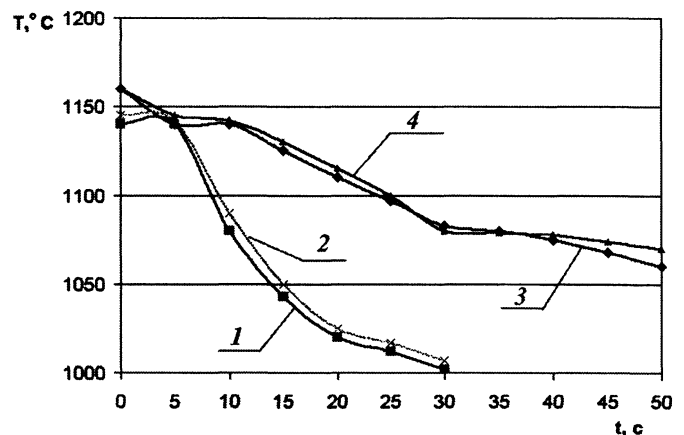
$$T_1 = T_{\text{сол}} - \frac{q_{\text{кр}} K\sqrt{\tau} \left(1 - \frac{K\sqrt{\tau}}{2R} \right) + c_1' (T_{\text{зал}} - T_{\text{сол}}) K\sqrt{\tau} \left(1 - \frac{K\sqrt{\tau}}{2R} \right) - \tau}{c_1 \left(\frac{K^2\tau}{6R} + \frac{R}{3} \ln|2R - K\sqrt{\tau}| \right)} \quad (16)$$

В качестве примера выполним расчет затвердевания маслостных заготовок из серого чугуна для торцовых уплотнительных колец диаметром 93 мм (отливка №1) и уплотнительных колец с крючковым замком диаметром 185 мм (отливка №2) для гидромеханических передач пропашных тракторов МТЗ 1522 и К-700 соответственно. Геометрические размеры отливок приведены ниже.

Номер отливки	Наружный диаметр отливки $D_{\text{отв}}$, мм	Высота отливки H , мм
1	98	175
2	193	175

Теплофизические характеристики материала отливок, а также неизвестные параметры теплообмена принимали в соответствии с рекомендациями [1], где $T_{\text{зал}} = 1250$ °С; $T_{\text{сол}} = 1140$ °С; $\alpha_1 = 2560$ Вт/(м²·град); $\beta = 2500$ Вт/(м²·град); $\rho_1 = 7200$ кг/м³; $c_1 = 755$ Дж/кг град; $c_1' = 837$ Дж/(кг·град); $K = 0,25$ см/с^{1/2}.

Результаты расчетов показали, что температура наружной поверхности отливки диаметром 193 мм в процессе ее затвердевания снижается медленнее, чем отливки диаметром 98 мм и соответственно увеличивает продолжительность нахождения ее в области высоких температур. Полученные расчетные зависимости изменения температуры наружной поверхности указанных отливок достаточно полно соответствуют кривым охлаждения, записанным с помощью термопар (см. рисунок), что позволяет рекомендовать данную методику расчета охлаждения отливки для управления структурообразованием и свойствами отливок.



Изменение температуры отливки в процессе охлаждения в кристаллизаторе: отливка №1 (1 – результаты расчета; 2 – результаты эксперимента); отливка №2 (3 – результаты расчета; 4 – результаты эксперимента)

Литература

1. Анисович Г.А. Затвердевание отливки. Мн.: Наука и техника, 1979.
2. Бевза В.Ф., Марукович Е.И., Павленко З.Д., Тутов В.И. Непрерывное литье намораживанием. Мн.: Наука и техника, 1979.