

А.М. БОДЯКО, канд. техн. наук, П.И. ЗИМОНИН,
И.А. МЕЛЬНИКОВ, А.А. СУПОНЕВ
(ИТМ НАН Беларуси)

РАСЧЕТ ВТОРИЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ОТЛИВКИ ПРИ ЛИТЬЕ МЕТОДОМ НЕПРЕРЫВНО-ЦИКЛИЧЕСКОГО ЛИТЬЯ НАМОРАЖИВАНИЕМ

При литье методом непрерывно-циклического литья намораживанием (НЦЛН) полых цилиндрических заготовок мерной длины без применения стержня наружная поверхность отливки формируется в контакте с рабочей полостью кристаллизатора, а внутренняя получается непосредственно из расплава. Для намораживания заготовки с необходимой толщиной стенки после заполнения кристаллизатора расплавом дают выдержку заданной продолжительности. Затем затвердевшую корку, представляющую собой тело отливки, извлекают из кристаллизатора и расплава и перемещают в ячейку камеры отжига. В это время в кристаллизатор через сифонную литниковую систему подают новую порцию расплава объемом, равным объему извлеченной отливки, вновь заполняя его до заданного уровня. Особенности данного метода литья обеспечивают ряд преимуществ по сравнению с другими способами получения полых цилиндрических заготовок, важнейшим из которых является извлечение отливок из кристаллизатора с достаточно высокой температурой (всего на 30...50 град ниже температуры солидус). Это открывает широкие возможности для управления процессом структурообразования в период их охлаждения вне кристаллизатора и получения заданных свойств без дополнительной термообработки, т.е. за счет использования теплоты, аккумулированной отливками при затвердевании.

Выполним теоретический анализ процесса охлаждения отливки в камере отжига (рис. 1).

Охлаждение отливки в камере происходит по-разному в зависимости от степени ее прогрева. Рассмотрим два наиболее типичных случая:

- 1) отливка охлаждается в камере, стенка которой не прогрета, и фактор внешнего охлаждения не сказывается;
- 2) стенка камеры прогрета, и в процессе остывания отливки фактор внешнего охлаждения должен учитываться сразу.

Температурное поле отливки и камеры отжига определяем аналитически, используя метод исключения переменных. Считаем, что температурное поле камеры отжига описывается параболой n -го порядка (рис. 2)

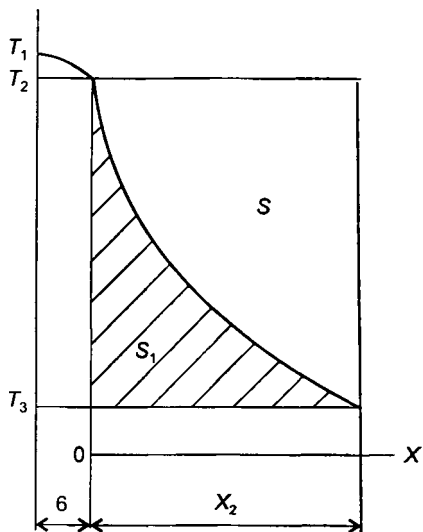
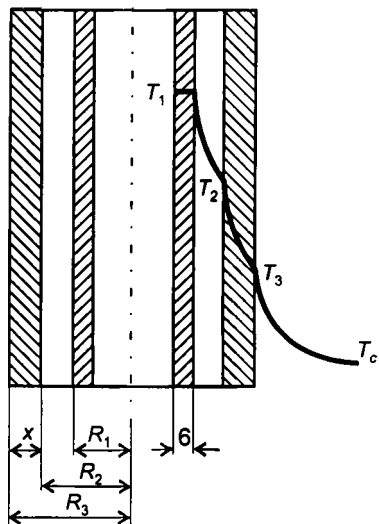


Рис. 2. Температурное поле камеры отжига

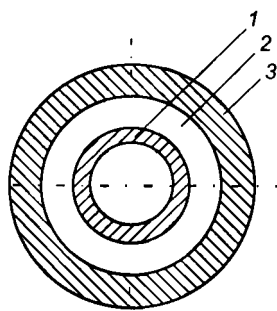


Рис. 1. Схема распределения температуры в отливке и стенке камеры: 1 - ячейка камеры отжига; 2 - воздушная прослойка; 3 - отливка

При остывании отливка теряет количество теплоты [1]

$$dQ_l = -c_l \rho_l \xi \left(1 - \frac{\xi}{2R_1} \right) F_1 dT_1,$$

где c_l , ρ_l - удельная теплоемкость и плотность материала отливки; ξ , F_1 - толщина стенки и площадь поверхности отливки.

Данное количество теплоты передается через воздушную прослойку лучеиспусканием, воздушной конвекцией и аккумулиру-

ется внутренней поверхностью ячейки камеры отжига. Количество теплоты, передаваемое через воздушную прослойку,

$$dQ_2 = \left\{ C_1 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] + \alpha_B (T_1 - T_2) \right\} F_1 dt,$$

где C_1 – коэффициент лучеиспускания поверхности отливки; T_1 , T_2 – температуры соответственно поверхности отливки и внутренней поверхности ячейки камеры отжига; α_B – проводимость воздушной прослойки:

$$\alpha_B = \lambda_B / X_B. \quad (1)$$

Количество теплоты, аккумулируемое ячейкой камеры отжига [1],

$$dQ_3 = \frac{X}{n_2 + 1} \rho_2 c_2 \left(1 + \frac{X}{(n_2 + 2) R_2} \right) F_2 dT_2,$$

где ρ_2 , c_2 – плотность и удельная теплоемкость материала внутренней поверхности ячейки камеры отжига; F_2 – площадь внутренней поверхности ячейки камеры отжига; T_2 – температура внутренней поверхности ячейки камеры отжига.

Составляем уравнение теплового баланса:

$$\begin{aligned} -c_1 \rho_1 \xi \left(1 - \frac{\xi}{2R_1} \right) dT_1 &= \left\{ C_1 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] + \alpha_B (T_1 - T_2) \right\} dt = \\ &= \frac{X \rho_2 c_2}{n_2 + 1} \left(1 + \frac{X}{(n_2 + 2) R_2} \right) \frac{F_2}{F_1} dT_2. \end{aligned} \quad (2)$$

Температуру поверхности отливки, температуру внутренней поверхности ячейки камеры отжига и глубину прогрева формы определяем из условия неразрывности теплового потока на внутренней поверхности ячейки камеры отжига:

$$\beta (T_1 - T_2) = \frac{\lambda_2 n_2}{X} T_2. \quad (3)$$

Проводимость воздушной прослойки

$$\beta = \alpha_B + \alpha_n. \quad (4)$$

Лучистая составляющая проводимости α_{λ} может быть определена из уравнения

$$\alpha_{\lambda} = \frac{C_1 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}{T_1 - T_2}. \quad (5)$$

Подставляя выражения (1), (4), (5) в уравнение (3), получаем:

$$C_1 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] + \frac{\lambda_b}{X_b} (T_1 - T_2) = \frac{\lambda_2 n_2}{X} T_2. \quad (6)$$

Подставляя полученное выражение (6) в уравнение (2), получаем:

$$-c_1 \rho_1 \xi \left(1 - \frac{\xi}{2R_1} \right) dT_1 = \beta (T_1 - T_2) dt = \frac{X}{n_2 + 1} \rho_2 c_2 \left(1 + \frac{X}{(n_2 + 2)R_2} \right) \frac{F_2}{F_1} dT_2. \quad (7)$$

Решая уравнения (3), определяем T_2 :

$$T_2 = \frac{\beta T_1}{\lambda_2 n_2 / X + \beta}. \quad (8)$$

Подставляя выражение (8) в уравнение (7), получаем:

$$\begin{aligned} -c_1 \rho_1 \xi \left(1 - \frac{\xi}{2R_1} \right) F_1 dT_1 &= \beta T_1 \left(\frac{\lambda_2 n_2}{\lambda_2 n_2 + X\beta} \right) F_1 dt = \\ &= \frac{X \rho_2 c_2}{(n_2 + 1)} \left[1 + \frac{X}{(n_2 + 2)R_2} \right] F_2 dT_2. \end{aligned} \quad (9)$$

Разделяя переменные в выражении (9) и интегрируя в пределах $t_2 - t_1$ и $T_0 - T_1$, получаем:

$$T_1 = T_0 \exp \left[- \frac{\beta \lambda_2 n_2 (t_2 - t_1)}{(\lambda_2 n_2 + \beta X) c_1 \rho_1 \xi \left(1 - \frac{\xi}{2R_1} \right)} \right]. \quad (10)$$

Учитывая выражение (8), находим T_2 :

$$T_2 = T_0 \frac{\beta}{\frac{\lambda_2 n_2}{X} + \beta} \exp \left[- \frac{\beta \lambda_2 n_2 (t_2 - t_1)}{(\lambda_2 n_2 + \beta X) c_1 \rho_1 \xi \left(1 - \frac{\xi}{2R_1} \right)} \right].$$

Преобразуя уравнение (2) с учетом выражения (6), получаем:

$$\frac{dT_1}{dt} = \frac{C_1 \left\{ \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \left[1 - \left(\frac{\beta}{\frac{\lambda_2 n_2}{X} + \beta} \right)^4 \right] \right\} + \frac{\lambda_B}{X_B} T_1 \left(1 - \frac{\beta}{\frac{\lambda_2 n_2}{X} + \beta} \right)}{c_1 \rho_1 \xi \left(1 - \frac{\xi}{2R_1} \right)}. \quad (11)$$

Дифференцируем выражение (10) по времени:

$$\frac{dT_1}{dt} = - \frac{\beta \lambda_2 n_2}{(\lambda_2 n_2 + \beta X) c_1 \rho_1 \xi \left(1 - \frac{\xi}{2R_1} \right)} T_0 \exp \left(- \frac{\beta \lambda_2 n_2 (t_2 - t_1)}{(\lambda_2 n_2 + \beta X) c_1 \rho_1 \xi \left(1 - \frac{\xi}{2R_1} \right)} \right). \quad (12)$$

Решая совместно уравнения (11) и (12), имеем:

$$t_2 - t_1 = \frac{1}{3} \left[\frac{(\lambda_2 n_2 + \beta X) c_1 \rho_1 \xi \left(1 - \frac{\xi}{2R_1} \right)}{\beta \lambda_2 n_2} \right] \ln \left| \frac{C_1 T_0^3 10^{-8} (\lambda_2 n_2 + \beta X)}{\lambda_2 n_2 \left(\beta - \frac{\lambda_B}{X_B} \right)} \left[1 - \left(\frac{\beta}{\frac{\lambda_2 n_2}{X} + \beta} \right)^4 \right] \right|.$$

После прогрева камеры отжига необходимо учитывать теплообмен между отливкой, камерой отжига и окружающей средой.

Составляем уравнение теплового баланса для отливки и ячейки камеры отжига:

$$-c_1 \rho_1 \xi \left(1 - \frac{\xi}{2R_1} \right) \frac{F_1}{F_3} T_1 = \frac{X_2 \rho_2 c_2}{n_2 + 1} \left[1 + \frac{X_2}{(n_2 + 2) R_2} \right] \frac{F_2}{F_3} (T_2 - T_3) + X_2 \rho_2 c_2 \left(1 - \frac{X_2}{2R_2} \right) T_3 + \alpha (T_3 - T_c) (t_3 - t_2). \quad (13)$$

Условие неразрывности теплового потока на внутренней поверхности ячейки камеры отжига имеет вид

$$\beta(T_1 - T_2) = \frac{\lambda_2 n_2}{X_2} (T_2 - T_3). \quad (14)$$

Температуру наружной поверхности ячейки камеры отжига определяем из условия (14):

$$T_3 = \left(1 + \frac{\beta X_2}{\lambda_2 n_2}\right) T_2 - \frac{\beta X_2}{\lambda_2 n_2} T_1. \quad (15)$$

Составляем уравнение теплового баланса в дифференциальной форме для данного периода охлаждения:

$$\begin{aligned} -c_1 \rho_1 \xi \left(1 - \frac{\xi}{2R_1}\right) \frac{F_1}{F_3} dT_1 = \beta(T_1 - T_2) \frac{F_1}{F_3} dt = \frac{X_2 \rho_2 c_2}{n_2 + 1} \left(1 + \frac{X_2}{(n_2 + 2)R_2}\right) \frac{F_2}{F_3} \times \\ \times (dT_2 - dT_3) + X_2 \rho_2 c_2 \left(1 - \frac{X_2}{2R_2}\right) dT_3 + \alpha(T_3 - T_c) dt. \end{aligned} \quad (16)$$

Температуру внутренней поверхности ячейки камеры отжига определяем из уравнения (13):

$$\begin{aligned} T_2 = \frac{\left\{ \frac{X_2 \rho_2 c_2}{n_2 + 1} \left[1 + \frac{X_2}{(n_2 + 2)R_2}\right] \frac{\beta X_2 F_2}{\lambda_2 n_2 F_3} + c_1 \rho_1 \xi \left(1 - \frac{\xi}{2R_1}\right) \frac{F_1}{F_3} - \right. \\ \left. - X_2 \rho_2 c_2 \left(1 - \frac{X_2}{2R_2}\right) \frac{\beta X_2}{\lambda_2 n_2} - \alpha \frac{\beta X_2}{\lambda_2 n_2} (t_3 - t_2) \right\} T_1 - \alpha T_c (t_3 - t_2)}{\frac{X_2}{n_2 + 1} \rho_2 c_2 \left(1 + \frac{X_2}{(n_2 + 2)R_2}\right) \frac{\beta X_2 F_2}{\lambda_2 n_2 F_3} - \\ - X_2 \rho_2 c_2 \left(1 - \frac{X_2}{2R_2}\right) \left(1 + \frac{\beta X_2}{\lambda_2 n_2}\right) - \alpha \left(1 + \frac{\beta X_2}{\lambda_2 n_2}\right) (t_3 - t_2)}. \end{aligned}$$

Подставляя T_2 в уравнение (16), получаем дифференциальное уравнение

$$\begin{aligned} -c_1 \rho_1 \xi \left(1 - \frac{\xi}{2R_1}\right) \frac{F_1}{F_3} dT_1 = \frac{\left[c_1 \rho_1 \xi \left(1 - \frac{\xi}{2R_1}\right) \frac{F_1}{F_3} - X_2 \rho_2 c_2 \left(1 - \frac{X_2}{2R_2}\right) - \alpha t \right] T_1}{\frac{X_2}{n_2 + 1} \rho_2 c_2 \left[1 + \frac{X_2}{(n_2 + 2)R_2}\right] \frac{\beta X_2 F_2}{\lambda_2 n_2 F_3} - \\ - X_2 \rho_2 c_2 \left(1 - \frac{X_2}{2R_2}\right) \left(1 + \frac{\beta X_2}{\lambda_2 n_2}\right) - \alpha \left(1 + \frac{\beta X_2}{\lambda_2 n_2}\right) t}. \end{aligned} \quad (17)$$

Разделяя переменные в выражении (17) и интегрируя в пределах $t_3 - t_2$ и $T_0 - T_1$, окончательно получаем:

$$T_1 = T_0 \exp \left\{ \frac{\alpha \beta \left(1 + \frac{\beta X_2}{\lambda_2 n_2} \right) \left[c_1 \rho_1 \xi \left(1 - \frac{\xi}{2R_1} \right) \frac{F_2}{F_3} - X_2 \rho_2 c_2 \left(1 - \frac{X_2}{2R_2} \right) \right] - \alpha \beta \left\{ \frac{X_2}{n_2 + 1} \rho_2 c_2 \left[1 + \frac{X_2}{(n_2 + 2)R_2} \right] \frac{\beta X_2 F_2}{\lambda_2 n_2 F_3} - X_2 \rho_2 c_2 \left(1 - \frac{X_2}{2R_2} \right) \left(1 + \frac{\beta X_2}{\lambda_2 n_2} \right) \right\}}{\left[\alpha \left(1 + \frac{\beta X_2}{\lambda_2 n_2} \right) \right]^2 c_1 \rho_1 \xi \left(1 - \frac{\xi}{2R_1} \right)} \right\} \times$$

$$\times \ln \left\{ \frac{\frac{X_2}{n_2 + 1} \rho_2 c_2 \left(1 + \frac{X_2}{(n_2 + 2)R_2} \right) \frac{\beta X_2 F_2}{\lambda_2 n_2 F_3} - X_2 \rho_2 c_2 \left(1 - \frac{X_2}{2R_2} \right) \left(1 + \frac{\beta X_2}{\lambda_2 n_2} \right) - \alpha \left(1 + \frac{\beta X_2}{\lambda_2 n_2} \right) (t_3 - t_2)}{\left[\alpha \left(1 + \frac{\beta X_2}{\lambda_2 n_2} \right) \right]^2 c_1 \rho_1 \xi \left(1 - \frac{\xi}{2R_1} \right)} \right\} +$$

$$\alpha \beta \left\{ \frac{\frac{X_2}{n_2 + 1} \rho_2 c_2 \left[1 + \frac{X_2}{(n_2 + 2)R_2} \right] \frac{\beta X_2 F_2}{\lambda_2 n_2 F_3} - X_2 \rho_2 c_2 \left(1 - \frac{X_2}{2R_2} \right) \left(1 + \frac{\beta X_2}{\lambda_2 n_2} \right) - \alpha \left(1 + \frac{\beta X_2}{\lambda_2 n_2} \right) (t_3 - t_2)}{\left[\alpha \left(1 + \frac{\beta X_2}{\lambda_2 n_2} \right) \right]^2 c_1 \rho_1 \xi \left(1 - \frac{\xi}{2R_1} \right)} \right\}.$$

Значения показателя n_2 находим из распределения температуры по толщине стенки камеры отжига. Как показывает практика, значение n мало изменяется в течение всего процесса и рассчитывается по отношению площади над параболой S к площади под параболой S_1 в прямоугольнике с координатами $T_{\text{п}} - X$, в котором вписана парабола (см. рис. 2):

$$n_2 = \frac{S}{S_1} = \frac{\vartheta_{\text{п}} X - S_1}{S_1} = \frac{\vartheta_{\text{п}} X}{S_1} - 1.$$

Зная из опыта распределение температуры в камере охлаждения, количество аккумулированной теплоты легко подсчитать с точностью до 1...2% простым планиметрированием площади [1].

Для нахождения аналитически значения показателя n применим формулу для вычисления площади с помощью определенного интеграла:

$$S_1 = \int_{\vartheta_n} \left(1 - \frac{x}{X}\right)^n dX.$$

По известным ординатам параболы, применив формулу Симпсона, находим:

$$S_1 = \frac{h}{3} \left[\vartheta_{n0} + 4(\vartheta_{n1} + \vartheta_{n3} + \dots + \vartheta_{n2n-1}) + 2(\vartheta_{n2} + \vartheta_{n4} + \dots + \vartheta_{n2n-2}) + \vartheta_{2n} \right],$$

где $h = \frac{b-a}{2k}$.

Окончательно получаем:

$$n_2 = \frac{3\vartheta_G X}{h \left[\vartheta_{n0} + 4(\vartheta_{n1} + \vartheta_{n3} + \dots + \vartheta_{n2n-1}) + 2(\vartheta_{n2} + \vartheta_{n4} + \dots + \vartheta_{n2n-2}) + \vartheta_{2n} \right]} - 1.$$

В качестве примера выполним расчет охлаждения маслостных заготовок из серого чугуна для торцовых уплотнительных колец диаметром 95 мм (отливка № 1) и уплотнительных колец с крючковым замком диаметром 175 мм (отливка № 2) ведущего вала пропашных тракторов МТЗ-1522 и К-700 соответственно. Геометрические размеры литых заготовок и ячейки камеры отжига приведены в табл. 1.

Таблица 1

Размеры заготовок и ячейки камеры отжига

Номер отливки	D_1 , мм	ξ , мм	H , мм	D_2 , мм	D_3 , мм
1	185	20	175	190	380
2	95	20	175		

Теплофизические характеристики материала отливок, футеровки камеры отжига, а также неизвестные параметры теплообмена принимали в соответствии с рекомендациями [1], где $T_0 = 1100^\circ\text{C}$; $\alpha = 60 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; $\beta = 2500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; $\rho_1 = 7200 \text{ кг}/\text{м}^3$; $\rho_2 = 1600 \text{ кг}/\text{м}^3$; $c_1 = 755 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$; $c_2 = 1250 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$; $\lambda_2 = 0,8 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$; $n_2 = 2,4$.

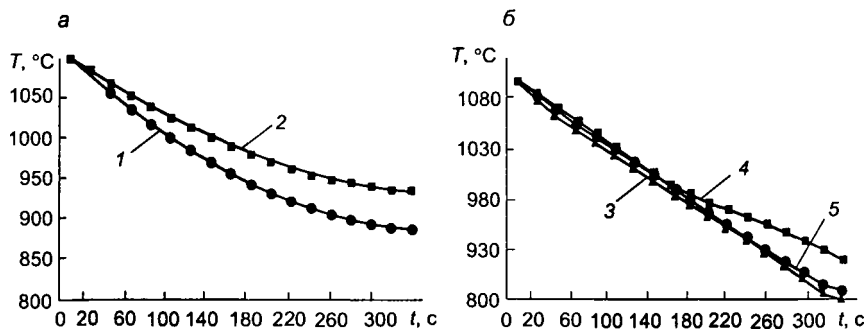


Рис. 3. Изменение температуры отливки в процессе охлаждения в камере: а – отливка № 2; б – отливка № 1; 1, 5 – до прогрева камеры отжига; 2, 4 – после прогрева камеры отжига; 3 – результаты эксперимента

Результаты расчетов показали (рис. 3, а, б), что прогрев камеры отжига ведет к снижению скорости охлаждения отливок и соответственно увеличивает продолжительность нахождения их в области высоких температур. В частности, в результате прогрева футеровки камеры отжига время охлаждения до температуры 950 °С отливки диаметром 95 мм может возрасти более чем на 50%, т.е. до 260 с, что в серых чугунах с углеродным эквивалентом $CE = 3,7...3,9\%$ обеспечивает устранение структурно-свободного цементита только за счет аккумулированной отливкой теплоты. Для отливки диаметром 185 мм прогрев футеровки сказывается на изменении скорости охлаждения в меньшей степени, однако время нахождения ее в области высоких температур достаточно для завершения распада структурно-свободного цементита в чугунах аналогичного химического состава. Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными (рис. 3, б) показывает их достаточное для литейной практики совпадение, что позволяет использовать вышеприведенный подход при совершенствовании технологии непрерывно-циклического литья намораживанием и получении заданных свойств отливок за счет теплоты, аккумулированной при кристаллизации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анисович, Г.А. Затвердевание отливки / Г.А. Анисович. Мн.: Наука и техника, 1979. 232 с.