



*The calculation procedure of temperature field of a mold and specific heat flow on its working surface during cyclic thermal exposure is set forth. The results of calculation are given.*

А. М. БОДЯКО, В. Ф. БЕВЗА, ИТМ НАН Беларуси

## ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ КРИСТАЛЛИЗАТОРА

УДК 621.774.04

Тепловое нагружение кристаллизатора при непрерывных процессах литья зависит от условий его взаимодействия с жидким металлом и затвердевающей коркой. Это взаимодействие в свою очередь определяется методом литья. При непрерывно-циклическом литье полых заготовок намораживанием жидкий металл в кристаллизатор подают снизу сифоном до заданного уровня, после чего делают определенную выдержку, в течение которой на внутренней (рабочей) поверхности кристаллизатора затвердевает корка металла, составляющая тело отливки. Толщина этой корки определяется продолжительностью выдержки, теплофизическими характеристиками сплава и технологическими параметрами литья. По истечении времени выдержки затвердевшую оболочку полностью извлекают из кристаллизатора и расплава вверх, а в кристаллизатор одновременно с этим подают новую порцию жидкого металла, равную массе извлеченной отливки. Такие циклы повторяются многократно в течение всего времени разлива [1]. При этом каждый раз в момент извлечения отливки перегретый жидкий металл, постоянно находящийся в осевой части кристаллизатора, непосредственно контактирует со всей его рабочей поверхностью. Таким образом, периодически извлекая отливки и подавая жидкий металл, создают идентичную циклическую тепловую нагрузку на его внутренней поверхности в определенном температурном интервале. Для оценки тепловых условий работы кристаллизатора достаточно рассмотреть изменение температуры его стенки в течение одного цикла.

В установившемся режиме литья колебания температуры рабочей поверхности кристаллизатора происходят около некоторого среднего значения  $T_{\text{зcp}}$ . Причем диапазон этих колебаний остается практически неизменным в течение всего процесса разлива. Температура водоохлаждаемой поверхности рабочей втулки кристаллизатора и характер ее изменения зависят от теплофизических характеристик материала кристаллизатора, толщины его стенки и условий охлаждения. Однако в любом случае при установившемся режиме литья эта температура может быть принята постоянной, так как даже если на этой поверхности и имеют место колебания температуры, то они не превышают 5–7 % от уровня колебаний температуры на рабочей поверхности кристаллизатора.

Таким образом, рассмотрим теплоперенос в стенке кристаллизатора, одна поверхность которой изменяется по определенному циклическому закону, а температура другой поверхности постоянна.

Уравнение теплопроводности для плоской стенки имеет вид

$$\frac{\partial T(x;t)}{\partial t} = \alpha_2 \frac{\partial^2 T(x;t)}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где  $\alpha_2$  — коэффициент температуропроводности материала кристаллизатора.

Задача решалась при граничных условиях первого рода. Определение температуры стенки кристаллизатора на рабочей поверхности при непрерывных процессах литья представляет значительные трудности. Температура же внутри стенки кристаллизатора в любой его точке, в том числе и в непосредственной близости от рабочей поверхности, может быть определена с достаточной точностью. В связи с этим при решении задачи был использован экспериментально-теоретический метод, сущность которого заключается в том, что опытным путем определяется температура в двух точках по толщине стенки кристаллизатора, а ее распределение по толщине стенки, удельный тепловой поток на рабочей и водоохлаждаемой поверхностях и их изменение во времени рассчитываются аналитически.

В связи с изложенным граничные условия задавались не на рабочей поверхности кристаллизатора, а на некотором удалении ( $x_1$ ) от нее (в месте установки термодатчиков) и на водоохлаждаемой поверхности. Полученное решение распространили на всю толщину стенки и, таким образом, получили закон изменения температуры во времени в любой точке кристаллизатора, в том числе и на рабочей поверхности.

Поскольку изменение температуры на рабочей поверхности кристаллизатора представляет собой некоторую периодическую функцию  $T(0, t)$  от времени с периодом  $2\pi/\omega$ , граничное условие на этой поверхности можно представить в виде [2]:

$$T(0; t) = T_{2cp} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega t - \varepsilon_n); \quad (2)$$

на водоохлаждаемой поверхности

$$T(X_2; t) = T_3 = \text{const}, \quad (3)$$

где  $n$  — номер гармоники;  $T_{2cp}$  — среднее значение температуры;  $A_n$  и  $\varepsilon_n$  — амплитуда колебаний и начальная фаза соответствующей гармоники;  $\omega$  — круговая частота изменения температуры;  $t$  — время.

Решение дифференциального уравнения (1) с граничными условиями (2) и (3) имеет вид

$$T(x; t) = T_{cp}(x) + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp\left[-x\left(\frac{n\omega}{2\alpha_2}\right)^{1/2}\right] \cos\left[n\omega t - x\left(\frac{n\omega}{2\alpha_2}\right)^{1/2} - \varepsilon_n\right]. \quad (4)$$

Первое слагаемое ( $T_{cp}(x)$ ) не зависит от времени и представляет собой среднее значение температуры за период на расстоянии ( $x$ ) от рабочей поверхности. Сумма остальных членов дает отклонение температуры от среднего значения в точке ( $x$ ) в любой момент времени.

Полученное решение позволяет определить изменение удельного теплового потока на рабочей поверхности кристаллизатора ( $q_2$ ). По закону Фурье

$$q_2 = -\lambda_2 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0},$$

$$q_2 = \frac{\lambda_2}{X_2} (T_2 - T_3) + \sum_{n=1}^{\infty} A_n b_2 \sqrt{n\omega} \cos\left(n\omega t - \varepsilon_n + \frac{\pi}{4}\right), \quad (5)$$

где  $\lambda_2$  — коэффициент теплопроводности материала кристаллизатора;  $b_2 = \lambda_2 / \sqrt{\alpha_2}$  — коэффициент аккумуляции тепла материалом кристаллизатора;  $X_2$  — толщина стенки кристаллизатора.

Выражения для расчета температурного поля и удельного теплового потока цилиндрической стенки кристаллизатора имеют более сложный вид [2]

$$T(r; t) = \frac{T_{R_1} \ln \frac{R_2}{r} + T_{R_2} \ln \frac{r}{R_1}}{\ln \frac{R_2}{R_1}} + \frac{\ln \frac{R_2}{r}}{\ln \frac{R_2}{R_1}} \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega t - \varepsilon_n) + \pi \sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_0^2(\eta\mu_k) V_0\left(\mu_k \frac{r}{R_1}\right)}{I_0^2(\mu_k) - I_0^2(\eta\mu_k)} \times$$

$$\times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n(n\omega)}{\left(\frac{\alpha_2 \mu_k^2}{R_1^2}\right)^2 + (n\omega)^2} \left[ n\omega \cos(n\omega t - \varepsilon_n) - \frac{\alpha_2 \mu_k^2}{R_1^2} \sin(n\omega t - \varepsilon_n) \right], \quad (6)$$

$$q_2 = \lambda_2 \left\{ \frac{B(\Theta_2 - T_{R_2})}{r} + \pi E \left[ \sum_{n=1}^{\infty} N_k \left(\frac{\mu_k}{R_1}\right) I_1\left(\frac{\mu_k}{R_1} r\right) - \sum_{n=1}^{\infty} M_k \left(\frac{\mu_k}{R_1}\right) Y_1\left(\frac{\mu_k}{R_1} r\right) \right] \right\}, \quad (7)$$

где  $R_1$  и  $R_2$  — радиусы поверхностей, на которых заданы граничные условия;  $r$  — текущая координата;

$\mu_k$  — корни характеристического уравнения  $I_0(\eta\mu_k) Y_0(\mu_k) - I_0(\mu_k) Y_0(\eta\mu_k) = 0$ ;  $V_0\left(\mu_k \frac{r}{R_1}\right)$  — ядро преобразования;  $I_0(x)$  и  $Y_0(x)$  — соответственно функции Бесселя первого и второго рода нулевого порядка;  $I_1(x)$  и  $Y_1(x)$  — функции Бесселя первого и второго рода первого порядка;

$$B = \frac{1}{\ln \frac{R_2}{R_1}}; \quad \Theta_2 = T_{R_1} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega t - \varepsilon_n);$$

$$E = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n(n\omega)}{\left(\frac{\alpha_2 \mu_k^2}{R_1^2}\right)^2 + (n\omega)^2} \left[ n\omega \cos(n\omega t - \varepsilon_n) - \frac{\alpha_2 \mu_k^2}{R_1^2} \sin(n\omega t - \varepsilon_n) \right];$$

$$N_k = \frac{I_0^2(\eta\mu_k) Y_0(\mu_k)}{I_0^2(\mu_k) - I_0^2(\eta\mu_k)}; \quad M_k = \frac{I_0^2(\eta\mu_k) I_0(\mu_k)}{I_0^2(\mu_k) - I_0^2(\eta\mu_k)}$$

Следует отметить, что формулы, полученные для пластины, могут быть использованы и для расчетов цилиндрических кристаллизаторов при условии, что  $X_2/R \ll 1$ . Погрешность расчетов в этом случае заведомо меньше величины  $X_2/R$  [3] ( $R$  — внутренний радиус кристаллизатора).

Из уравнений (4) и (6) видно, что распределение температуры по толщине стенки кристаллизатора во времени носит волновой характер. Амплитуда этой волны затухает по мере удаления от рабочей поверхности.

Скорость распространения ( $C_B$ ), длина ( $\lambda_B$ ) и глубина проникновения ( $X_B$ ) температурной волны могут быть определены по формулам [4]:

$$C_B = \sqrt{\frac{\pi\alpha_2}{P}}, \quad \lambda_B = 2\sqrt{\pi\alpha_2 P},$$

при затухании колебаний температуры до 1 %

$$X_B = 2,6\sqrt{\alpha_2 P},$$

где  $P$  — период колебания температуры.

Толщина слоя заметного колебания температуры в стенке кристаллизатора будет тем больше, чем продолжительнее цикл получения отливок, т.е. чем больше период колебания температуры на рабочей поверхности и чем больше коэффициент теплопроводности материала кристаллизатора.

Для примера на рис. 1 показано изменение температуры стенки стального кристаллизатора толщиной  $X_2 = 11,85$  мм, диаметром 157 мм при литье заготовок из чугуна с периодом 21 с. В момент контакта с жидким металлом температура рабочей поверхности резко возрастает до максимального значения (кривая 1). Скорость повышения температуры в этот момент превышает 150 К/с. Затем, после образования твердой оболочки, ее температура относительно плавно уменьшается. Размах колебаний температуры на рабочей поверхности в течение цикла составляет около 180 К. По мере удаления от рабочей поверхности колебания температуры заметно уменьшаются и на водоохлаждаемой поверхности они не превышают 5 % от амплитуды колебаний на рабочей поверхности.

Из рис. 2 наглядно виден волнообразный характер теплопередачи через стенку кристаллизатора.

На рисунке по оси абсцисс отложено время, равное одному периоду колебания температуры ( $P = 2\pi$ ), а по оси ординат — относительная амплитуда колебания температуры в стенке кристаллизатора ( $v$ ):

$$v = \frac{T(x) - T(x, t)}{\Delta T_2},$$

где  $T(x)$  — среднее значение температуры на заданной глубине;  $T(x, t)$  — текущая температура на заданной глубине;  $\Delta T_2$  — максимальное отклонение температуры от среднего значения на рабочей поверхности кристаллизатора.

Изменение удельного теплового потока на рабочей поверхности кристаллизатора носит такой же характер, как и изменение температуры. Во всех случаях тепловой поток в момент контакта кристаллизатора с жидким металлом практически мгновенно возрастает и носит пиковый характер (рис. 3). В этот же момент происходит

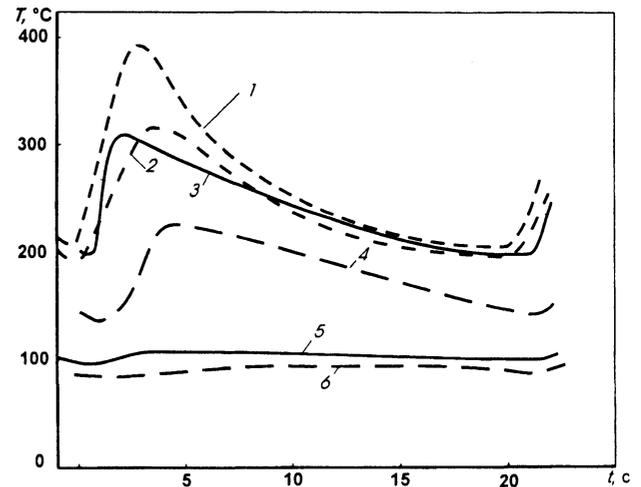


Рис. 1. Изменение температуры стенки кристаллизатора в течение одного цикла на различном удалении ( $x$ ) от рабочей поверхности: 1 —  $x = 0$ ; 2, 3 —  $x = 1,75$  мм; 4 — 6,0; 5 — 10,9; 6 —  $x = 11,85$  мм. — эксперимент; - - - - - расчет

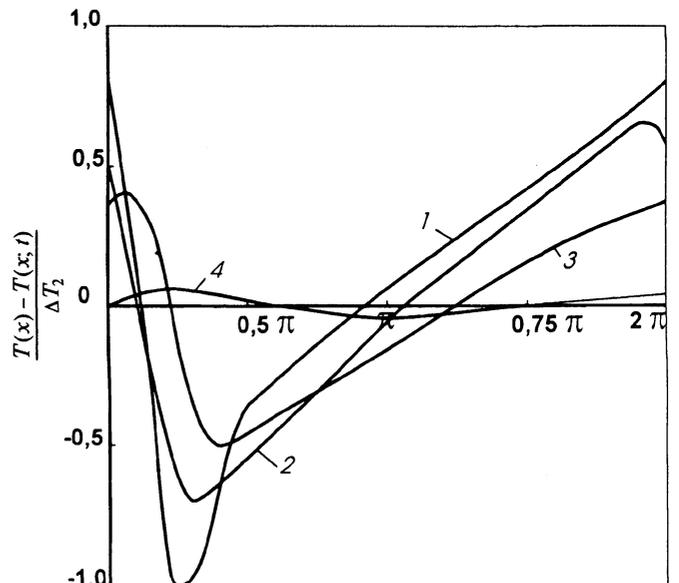


Рис. 2. Относительное изменение колебаний температуры в стенке кристаллизатора на различном удалении ( $x$ ) от рабочей поверхности: 1 —  $x = 0$ ; 2 —  $x = 1,75$  мм; 3 — 6,0; 4 —  $x = 11,85$  мм

затвердевание начальной корки, что вызывает его резкое снижение. При этом в первые 3—5 с формирования отливки тепловой поток падает в несколько раз по отношению к максимальному значению. Дальнейшее намораживание корки и возникновение газового зазора на контактной поверхности отливки и кристаллизатора ведет к уменьшению скорости изменения теплового потока и его плавному снижению до минимального значения. При следующем цикле теплового воздействия колебания теплового потока на рабочей поверхности кристаллизатора повторяются вновь.

Разработанная методика определения теплового режима кристаллизатора и полученные данные позволяют перейти к расчету процесса затвердевания отливки и определению термонапряженного состояния рабочей втулки кристаллизатора, а также к анализу термодформационного взаимодействия кристаллизатора и отливки в процессе ее формирования.

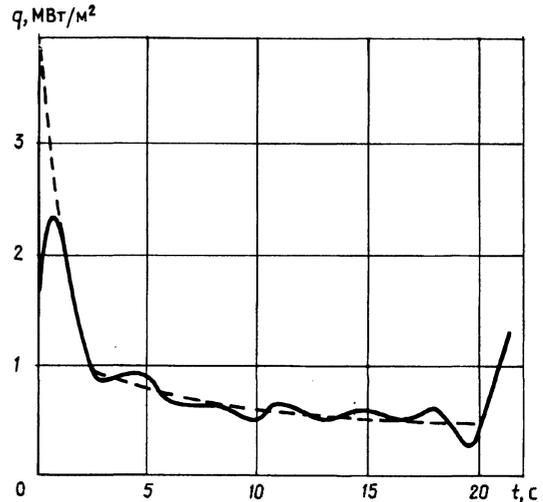


Рис. 3. Изменение удельного теплового потока на рабочей поверхности кристаллизатора в течение цикла

### Литература

1. Специальные способы литья: Справ. / Под ред. В. А. Ефимова. М.: Машиностроение, 1991.
2. Бевза В. Ф., Марукович Е. И., Павленко З. Д., Тугов В. И. Непрерывное литье намораживанием. Мн.: Наука и техника, 1979.
3. Вейник А. И. Приближенный расчет процессов теплопроводности. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1959.
4. Шорин С. Н. Теплопередача. М.: Высшая школа, 1964.



**ИНСТИТУТ ТЕХНОЛОГИИ МЕТАЛЛОВ НАН БЕЛАРУСИ**

предлагает:



**уплотнительные и поршневые кольца**  
из серого и высокопрочного чугуна  
диаметром 12—250 мм, заготовки гильз цилиндров ДВС  
и пневмокомпрессоров, втулки различного назначения.

Изделия получают по новой технологии,  
обеспечивающей высокие эксплуатационные  
характеристики.

Контактный тел./факс (0222) 267256