



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 α_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 ε_n — амплитуда колебаний и начальная фаза соответствующей гармоники; ω — 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 λ_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;

μ_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 (λ_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; ΔT_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

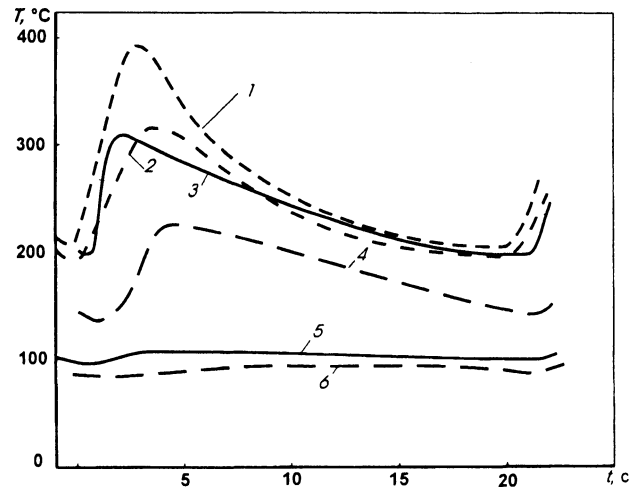


Рис. 1. Изменение температуры стенки кристаллизатора в течение одного цикла на различном удалении (x) от рабочей поверхности: 1 — $x = 0$; 2, 3 — $x = 1,75$ мм; 4 — 6,0; 5 — 10,9; 6 — $x = 11,85$ мм. — эксперимент; - - - - - расчет

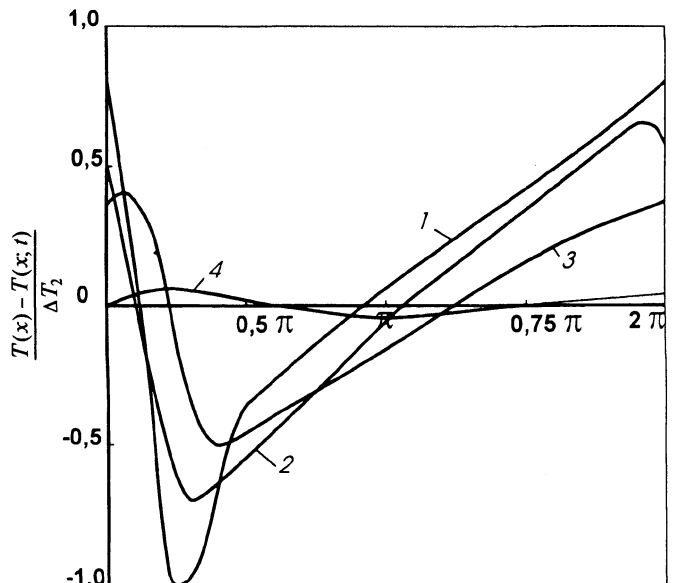


Рис. 2. Относительное изменение колебаний температуры в стенке кристаллизатора на различном удалении (x) от рабочей поверхности: 1 — $x = 0$; 2 — $x = 1,75$ мм; 3 — 6,0; 4 — $x = 11,85$ мм

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.

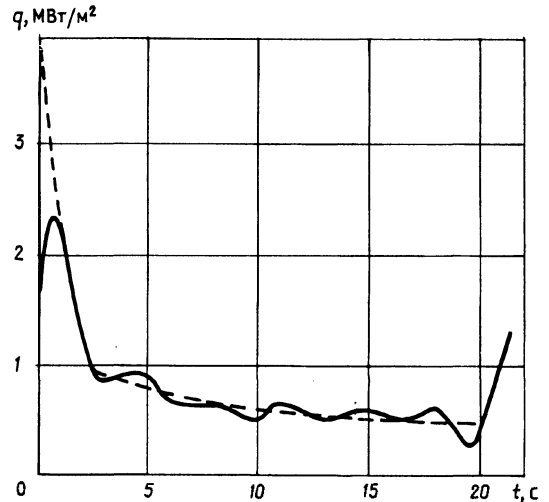


Рис. 3. Изменение удельного теплового потока на рабочей поверхности кристаллизатора в течение цикла

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