

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОвого ПОТОКА ЧЕРЕЗ КРИСТАЛЛИЗАТОР  
ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ТЕПЛОвой НАГРУЗКЕ В УСЛОВИЯХ  
НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ**

Особенностью существующих способов непрерывного литья металлов и сплавов является циклическое движение отливки относительно кристаллизатора. Режим движения отливки обуславливает циклические тепловые нагрузки на рабочую поверхность кристаллизатора, которые вызывают изменение температуры рабочей поверхности по определенному периодическому закону; температура водоохлаждаемой поверхности практически остается постоянной.

Определим температурное поле плоской стенки кристаллизатора, которая с одной стороны имеет постоянную температуру, а температура другой ее поверхности изменяется по гармоническому закону.

Для вывода формулы используем дифференциальное уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial T(x; t)}{\partial t} = a_1 \frac{\partial^2 T(x; t)}{\partial x^2} \quad (1)$$

Задача сводится к решению уравнения (1) 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 легко определена с достаточной точностью. В связи с этим граничное условие задано не на самой рабочей поверхности кристаллизатора, а на некотором расстоянии  $X_1$  от нее. Полученное решение распространено на всю толщину стенки кристаллизатора  $X_2$  и, таким образом, установлен закон изменения температуры во времени в любой точке кристаллизатора, в том числе и на рабочей поверхности.

Граничные условия запишутся в следующем виде:

$$T(0; t) = T_{x_{cp}} + A \cos(\omega t - \varepsilon); \quad (2)$$

$$T(x_2'; t) = T_3 = \text{const}, \quad (3)$$

где  $x_2' = x_2 - x_i$ .

Примем среднее распределение температур в стенке кристаллизатора прямолинейным

$$T(x; 0) = T_{x_i \text{ ср.}} - \frac{T_{x_i \text{ ср.}} - T_3}{x_2'} \cdot x. \quad (4)$$

Для процесса с установившимися колебаниями температуры с периодом  $2\pi/\omega$  решение уравнения (I) с граничными условиями (2) и (3) и начальным условием (4) имеет вид [1]

$$T(x; t) = T(x; 0) + A \exp\left[-x\left(\frac{\omega}{2a_2}\right)^{1/2}\right] \cos\left[\omega t - x\left(\frac{\omega}{2a_2}\right)^{1/2} - \varepsilon\right]. \quad (5)$$

В реальных процессах непрерывного литья тепловые воздействия на стенку кристаллизатора носят периодический, но не гармонический характер. В этом случае граничное условие на расстоянии  $x_i$  от рабочей поверхности кристаллизатора запишется в виде [2]

$$T_1(0; t) = T_{x_i \text{ ср.}} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega t - \varepsilon_n). \quad (6)$$

Тогда решение дифференциального уравнения (I) с граничными условиями (3) и (6) и начальным условием (4) по аналогии с (5) получим в виде

$$T(x; t) = T(x; 0) + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp\left[-x\left(\frac{n\omega}{2a_2}\right)^{1/2}\right] \cos\left[n\omega t - x\left(\frac{n\omega}{2a_2}\right)^{1/2} - \varepsilon_n\right]. \quad (7)$$

Из выражения (7) видно, что изменение температуры в произвольной точке  $x$  представляет собой циклическое изменение температуры с периодом  $2\pi/\omega$  около соответствующего среднего

значения.

Рассмотрим теперь изменение удельного теплового потока ( $q_{2n}$ ) на рабочей поверхности кристаллизатора. По закону Фурье

$$q_{2n} = -\lambda_2 \frac{dT}{dx} \quad (8)$$

При гармонических колебаниях температуры рабочей поверхности кристаллизатора на основании выражений (5) и (8) формулу для определения теплового потока получим в виде

$$q_{2n} = \frac{\lambda_2}{x_2} (T_2 - T_3) + A' \cdot \beta_2 \sqrt{\omega} \cos \left( \omega t + \frac{\pi}{4} - \varepsilon \right), \quad (9)$$

где

$$\beta_2 = \sqrt{\lambda_2 c_2 \gamma_2} \quad - \text{коэффициент аккумуляции тепла материалом кристаллизатора.}$$

Выражение для удельного теплового потока на рабочей поверхности кристаллизатора при циклических, но не гармонических тепловых воздействиях на его стенку, на основании уравнений (7) и (8) запишется следующим образом:

$$q_{2n} = \frac{\lambda_2}{x_2} (T_2 - T_3) + \sum_{n=1}^{\infty} A'_n \beta_2 \sqrt{n\omega} \cos \left( n\omega t + \frac{\pi}{4} - \varepsilon_n \right) \quad (10)$$

Полученные решения были использованы для теплового расчета кристаллизатора при литье тонкостенных труб диаметром 102 мм методом непрерывного намораживания [3]. На рис. 1, а, б показано изменение удельного теплового потока на рабочей поверхности кристаллизатора в течение одного цикла в зоне периодического контакта стенки кристаллизатора с жидким металлом. Кривые 1 рассчитаны по формуле (10), кривые 2 - по формуле (9). Из рисунков видно, что при ведении процесса литья с достаточно большой частотой ( $\omega \gg 12,56 \text{ сек}^{-1}$ ) определение удельного теплового потока на рабочей поверхности кристаллизатора допустимо производить по более простой формуле (9). При этом относительная погрешность в определении максимального удельного теплового потока не превышает 5-6% (рис. 1, а). При малых частотах вытяжки определение удельного теплового потока по формуле (9) может привести к значительной ошибке

(рис.1б).

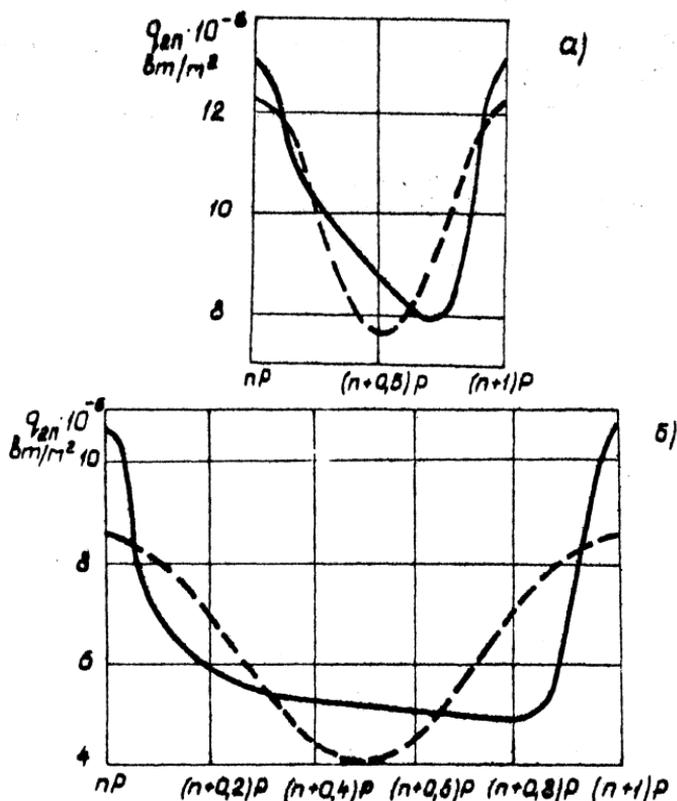


Рис.1. Изменение удельного теплового потока в течение одного цикла при литье стали:  
а -  $\omega = 12,56 \text{ сек}^{-1}$ ;  $P = 0,5 \text{ сек}$ ;  
б -  $\omega = 3,14 \text{ сек}^{-1}$ ;  $P = 2,0 \text{ сек}$ .

Возможность дифференцированного определения теплового потока в течение одного цикла позволяет произвести расчет затвердевания начальной корки отливки по истинным значениям теплового потока при различных технологических параметрах литья.

Полученные решения могут быть использованы для теплового расчета других литейных форм, работающих при циклических тепловых

нагрузках: кокилей, изложниц для центробежного литья, пресс-форм для литья под давлением и др.

### Л и т е р а т у р а

1. К а р с л о у Г., Е г е р Д. Теплопроводность твердых тел. "Наука", 1964.

2. С е р е б р е н н и к о в М.Г. Гармонический анализ. М.-Л., Гостехтеориздат, 1948.

3. В е й н и к А.И., Т у т о в В.И. Литье труб методом на-  
моразивания. Киев, Сб. "Машиностроение", № 1. 1964.