

Н.П.Жмакин, канд.техн.наук,
Ю.А.Лосюк, канд.техн.наук,
А.В.Никитин, А.С. Калиниченко

АНАЛИЗ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА СИСТЕМЫ "РАСПЛАВ - КОРКА - КРИСТАЛЛИЗАТОР"

При литье намораживанием одна сторона заготовки формируется на поверхности кристаллизатора, а другая образована растущим фронтом кристаллов. Процесс намораживания является высокоинтенсивным в тепловом отношении, поэтому вследствие неустановившегося теплового режима при формировании заготовки могут идти процессы намораживания и подплавления. Проанализируем влияние теплового режима кристаллизатора на характер процесса намораживания для малых чисел Фурье (Fo). Рассмотрим уравнение теплового баланса на границе раздела фаз

$$\lambda_1 \frac{dT_1}{dx} = \rho_1 r_1 \frac{d\xi}{dt} + \lambda'_1 \frac{dT'_1}{dx}, \quad (1)$$

где T_1 и T'_1 - температуры корки и расплава у границы раздела фаз соответственно К; λ_1 и λ'_1 - коэффициенты теплопроводности твердой корки и расплава соответственно, Вт/м·К; r_1 - удельная теплота кристаллизации, Дж/кг; ξ - толщина затвердевшего слоя, м; t - время, с; ρ - плотность, кг/м³.

Процессы намораживания, равновесия или подплавления корочки характеризуются неравенствами

$$\frac{d\xi}{dt} > 0; \quad \frac{d\xi}{dt} = 0; \quad \frac{d\xi}{dt} < 0. \quad (2)$$

Преобразовывая (1) получим

$$\lambda_1 \frac{dT_1}{dx} \leq \lambda'_1 \frac{dT'_1}{dx}. \quad (3)$$

Правую часть неравенства (3) можно представить в виде

$$\lambda'_1 \frac{dT'_1}{dx} = \alpha_c (T_{\text{зал}} - T_{\text{кр}}), \quad (4)$$

где α_c - коэффициент теплоотдачи от расплава к корке, Вт/м²·К; $T_{\text{зал}}$, $T_{\text{кр}}$ - температуры заливки и кристаллизации, соответственно, К.

Так как толщина корочки много меньше глубины ванны и материал заготовки имеет высокий коэффициент теплопроводности, то можно принять температуру корки равной температуре кристаллизации. Допустим, что температура в зазоре меняется по линейному закону. Тогда запишем

$$\lambda_1 \frac{dT}{dx} = \alpha_1 [T_{\text{кр}} - T_{2\text{п}}(t)], \quad (5)$$

где α_1 - коэффициент теплопроводности через зазор, Вт/м²·К; $T_{2\text{п}}(t)$ - температура рабочей поверхности кристаллизатора, К.

Величина α_1 определяется согласно [1]:

$$\alpha_1 = \frac{2\lambda_{\text{заз}}}{\delta_{\text{заз}}} + 4,2 \eta \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \cdot 10^{-4}, \quad (6)$$

где $\lambda_{\text{заз}}$ - коэффициент теплопроводности вещества в зазоре, Вт/м·К; $\delta_{\text{заз}}$ - средняя высота микронеровностей, м; η - относительная площадь контакта; λ_2 - коэффициент теплопроводности материала кристаллизатора, Вт/м·К.

Условие намораживания с учетом (2), (4), (5) будет

$$\alpha_1 [T_{\text{кр}} - T_{2\text{п}}(t)] > \alpha_c (T_{\text{зал}} - T_{\text{кр}}). \quad (7)$$

Температуру рабочей поверхности $T_{2\text{п}}(t)$ найдем из [2]:

$$T_{2\text{п}}(t) = \frac{T_{\text{кр}}}{1 + \frac{1}{\text{Bi}}} + T_{\text{зп}} + \sum A_n \sin \mu_n \exp(-\mu_n^2 \text{Fo}), \quad (8)$$

где $\text{Fo} = \frac{\alpha_2 t_{\text{н}}}{x_2^2}$; $\text{Bi} = \frac{\alpha_1 x_2}{\lambda_2}$; x_2 - толщина кристаллизатора, м.

Значения μ_n находим как корни характеристического уравнения

$$\frac{\mu_n}{Bi} = -\operatorname{tg} \mu_n. \quad (9)$$

Преобразовывая (7), получим

$$\frac{T_{кр} - T_{2п(t)}}{T_{зал} - T_{кр}} > \frac{\alpha_c}{\alpha_1}. \quad (10)$$

Обозначим

$$\theta = \frac{T_{кр} - T_{2п(t)}}{T_{зал} - T_{кр}}; \quad B = \frac{\alpha_c}{\alpha_1} \quad (11)$$

и условие (3) запишем в виде

$$\theta \leq B. \quad (12)$$

Для нахождения параметров, при которых наблюдается намораживание, равновесие или подплавление корочки, была составлена и реализована "Фортран" - программа. Данные расчета позволили построить номограммы для нахождения областей устойчивого намораживания и расчета скорости роста корочки. Скорость роста найдем из (1) с учетом (4), (5), (11):

$$\frac{d\xi}{dt} = \frac{\Delta T_{пер}}{\rho_1 r_1} (\alpha_1 \theta - \alpha_c), \quad (13)$$

где $T_{пер} = T_{зал} - T_{кр}$.

Для определенных значений $\Delta T_{пер}$, B и F_0 по номограмме можно определить параметр θ и рассчитать скорость роста корочки, а также характер формирования.

Л и т е р а т у р а

1. Шлык Ю.П., Ганин Е.А., Царевский С.Н. Контактное термическое сопротивление. М., 1977. 2. Лосюк Ю.А., Никитин А.В., Определение толщины ленты, намораживаемой на вращающийся кристаллизатор. - В сб.: Металлургия, вып. 9. Минск, 1976.