

НЕПРЕРЫВНАЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ ТРУБ МАЛОГО ДИАМЕТРА ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Скачков В.А., Колобов Г.А., Иванов В.И., Оверчук О.Р. (ЗГИА, г. Запорожье,
Украина)

Из условия баланса распределения теплоты процесса охлаждения в зоне кристаллизации при непрерывном формировании труб малого диаметра из расплава алюминиевых сплавов получена система двух дифференциальных уравнений, описывающих распределение температуры по длине центрального формирующего стержня и расплава. Получено решение данной системы, которое задается конечными соотношениями для температуры формирующего центрального стержня и расплава до точки кристаллизации.

Основными параметрами, определяющими процесс литья труб малого диаметра, являются геометрические размеры кристаллизатора и условия его охлаждения.

В настоящее время трубы малого диаметра изготавливают путем литья крупногабаритных трубных заготовок в кристаллизаторах с последующей их обработкой (прессованием, прокаткой и вытяжкой).

Литье трубных заготовок выполняют центробежным и полунепрерывным методами. Охлаждение металла при его литье в длинном кристаллизаторе осуществляется путем теплоотдачи через боковую поверхность кристаллизатора, а при его литье в коротком кристаллизаторе - при помощи потоков воды, подаваемых на заготовку, чем достигается резкое возрастание интенсивности ее охлаждения [1,2]. Особенности процесса охлаждения металла при непрерывной кристаллизации прутков малого диаметра из алюминиевых сплавов описаны в работе [3].

При литье труб малого диаметра из алюминиевых сплавов необходимо знать влияние условий внешнего теплообмена на процесс их кристаллизации.

Данный процесс может быть реализован в металлическом кристаллизаторе с размещенным внутри него центральным формирующим стержнем, при этом кристаллизатор подвергают охлаждению в среде жидкости или газа.

В зоне расплава температура алюминиевого сплава T_p на величину перегрева T_{np} превышает температуру его плавления $T_{пл}$.

При рассмотрении теплового баланса процесса охлаждения на участке кристаллизатора, ограниченном сечениями $[x, x + dx]$ (см. рисунок), можно записать

$$Q_x - Q_{x+dx} = dQ, \quad (1)$$

где Q_x, Q_{x+d} - приход и отвод теплоты в сечениях x и $x + dx$ кристаллизатора соответственно; dQ - отвод теплоты через боковую поверхность кристаллизатора.

Значение параметра dQ определяется передачей теплоты от текущего расплава к внутренней поверхности кристаллизатора dQ_p и наружной поверхности центрального стержня dQ_{cm} , а также передачей теплоты по толщине стенки кристаллизатора dQ_{cm} и от его наружной поверхности в окружающую среду dQ_e в соответствии с соотношением:

$$dQ = dQ_p = dQ_{cm} = dQ_e. \quad (2)$$

Компоненты соотношения (2) определяются выражениями [4]:

$$dQ_{cm} = \alpha_{cm} \cdot \pi \cdot D_{cm} \cdot (T_{cm} - T_p) dx; \quad (3)$$

$$dQ_p = \alpha_p \cdot \pi \cdot D_1 \cdot (T_p - T_{c1}) dx; \quad (4)$$

$$dQ_m = \frac{2\pi \cdot (T_{c1} - T_{c2}) \cdot \lambda}{\ln \frac{D_2}{D_1}} dx ; \quad (5)$$

$$dQ_e = \alpha_{m\theta} \cdot \pi \cdot D_2 \cdot (T_{c2} - T_\theta) dx , \quad (6)$$

где $\alpha_{ст}$, α_p , $\alpha_{тв}$ – коэффициенты теплоотдачи от расплава к наружной поверхности стержня и внутренней поверхности кристаллизатора, а также от наружной поверхности кристаллизатора к внешней среде соответственно, Вт/(м² К); λ – коэффициент теплопроводности материала кристаллизатора, Вт/(м К); T_p , T_{cm} , T_{c1} , T_{c2} , T_θ – соответственно температура расплава, стержня, внутренней и наружной поверхности кристаллизатора, а также окружающей среды, К; D_1 , D_2 , D_{cm} – соответственно внутренний и наружный диаметр кристаллизатора, а также диаметр стержня, м.

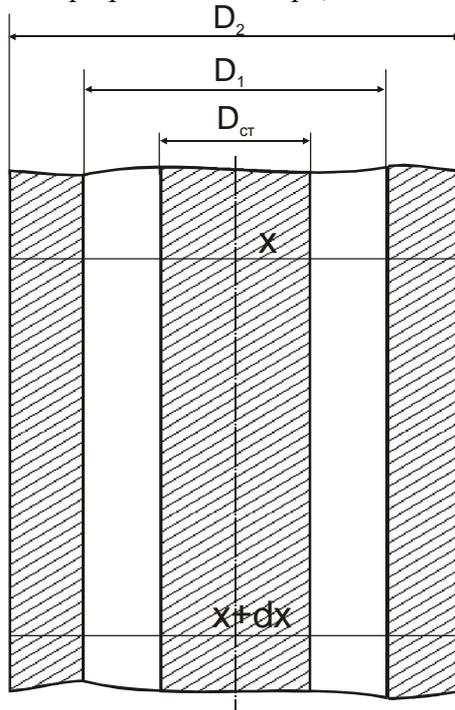


Рис. 1. Расчетная схема кристаллизации

Путем исключения температуры T_{c1} и T_{c2} из уравнений (4), (5) и (6), а также несложных преобразований можно записать:

$$dQ = \frac{\pi \cdot (T_p - T_\theta) dx}{\frac{1}{\alpha_{ж-м} \cdot D_1} + \frac{1}{2\lambda} \cdot \ln \frac{D_2}{D_1} + \frac{1}{\alpha_{m\theta} \cdot D_2}} . \quad (7)$$

Левая часть уравнения (1) определяется как

$$Q_x - Q_{x+dx} = 0,25\pi \cdot D_1^2 \cdot c \cdot \rho \cdot W \frac{dT}{dx} + \alpha_{cm} \cdot \pi \cdot D_{cm} \cdot (T_{cm} - T_p) dx. \quad (8)$$

где c – теплоемкость текущего расплава, кДж/(кг К); ρ – плотность расплава, кг/м³; W – линейная скорость течения расплава (скорость вытяжки трубки), м/с.

Сформулируем ряд допущений, положенных в основу математической модели теплообмена в кристаллизаторе:

- в рассматриваемом диапазоне изменения температуры теплофизические параметры текущего расплава принимаются постоянными;

- распределение температуры расплава по диаметру кристаллизатора считается равномерным;

- скорость течения расплава по длине кристаллизатора предполагается неизменной.

После подстановки уравнений (7) и (8) в уравнение (1) получают систему уравнений, описывающих распределение температуры по длине центрального формирующего стержня и кристаллизующего расплава:

$$\frac{d^2 T_{cm}}{dx^2} = \theta \cdot (T_{cm} - T_p); \quad (9)$$

$$\frac{dT_p}{dx} = (A + B) \cdot T_p - B \cdot T_{cm} - A \cdot T_\theta, \quad (10)$$

где $\theta = \frac{4\alpha}{\lambda}$; $A = \frac{4}{K_1 \cdot c \cdot \rho \cdot W \cdot (T_1^2 - T_{cm}^2)}$; $B = \frac{4}{c \cdot \rho \cdot W \cdot (T_1^2 - T_{cm}^2)}$;

$$K_1 = \frac{1}{\alpha_p \cdot D_1} + \frac{1}{2\lambda_k} \cdot \ln \frac{D_2}{D_1} + \frac{1}{\alpha_{me} \cdot D_2};$$

Используя замену переменных: $T_{cm} \equiv \psi$; $T_p \equiv \eta$, систему уравнений (9) и (10) можно записать в виде:

$$\psi'' = \theta \cdot (\psi - \eta); \quad (11)$$

$$\eta' = F \cdot \eta - B \cdot \psi + G. \quad (12)$$

С учетом выражений (11) и (12) система уравнений (9) и (10) может быть представлена уравнением третьего порядка:

$$\psi''' - F \cdot \psi'' - \theta \cdot \psi' + \Omega \cdot \psi + \theta \cdot G = 0. \quad (13)$$

Решение уравнения (13) имеет вид:

$$\psi = C_1 \cdot \exp(k_1 \cdot x) + \exp(k_2 \cdot x) \cdot [C_2 \cdot \cos(k_3 \cdot x) + C_3 \cdot \sin(k_3 \cdot x)] - \frac{\theta \cdot G}{\Omega}. \quad (14)$$

где C_1, C_2, C_3 - постоянные интегрирования, k_1, k_2, k_3 - корни характеристического уравнения; $G = -A \cdot T_\theta$, $\Omega = \theta \cdot F - B \cdot \theta$.

Граничные условия для системы уравнений (9)-(10) предполагают равенство температуры в начале кристаллизатора и температуры зоны расплава:

$$T_{cm}|_{x=0} = T_{np}^p; \quad (15)$$

$$T_{cm}|_{x \rightarrow \infty} = 0; \quad (16)$$

$$T_{np}|_{x=0} = T_{np}^p, \quad (17)$$

где T_{np}^p - температура расплава.

Постоянные интегрирования c_1, c_2 и c_3 уравнений (9) и (10), которые определяют из удовлетворения граничных условий (15)-(17), имеют вид:

$$C_1 = 0; \quad (18)$$

$$C_2 = T_{np}^p + \frac{\theta \cdot G}{\Omega}; \quad (19)$$

$$C_3 = \frac{1}{2k_2 \cdot k_3} \cdot \left[\left(W_2 - T_{np}^p - \frac{\theta \cdot G}{\Omega} \right) \cdot \theta - W_2 \cdot (k_2^2 + k_3^2) \right]. \quad (20)$$

Учитывая решение (14) и значения постоянных интегрирования (17)-(20), температура формирующего стержня определится как:

$$T_{cm} = \exp(k_2 \cdot x) \cdot [W_2 \cdot \cos(k_3 \cdot x) + W_3 \cdot \sin(k_3 \cdot x)] - \frac{\theta \cdot G}{\Omega}; \quad (21)$$

где $W_2 = T_{np}^p + \frac{\theta \cdot G}{\Omega}$.

Температура расплава в зоне кристаллизации

$$T_p = T_p - \frac{1}{\theta} \cdot \frac{d^2 T_p}{dx^2} \quad (22)$$

Используя решение (21), соотношение (22) будет иметь вид:

$$T_p = \exp(k_2 \cdot x) \cdot \left[\left(W_2 - \frac{W_2 \cdot k_2^2 + 2k_2 \cdot k_3 \cdot W_3 - W_2 \cdot k_3^2}{\theta} \right) \cdot \cos(k_3 \cdot x) + \left(W_3 - \frac{W_3 \cdot k_2^2 - 2k_2 \cdot k_3 \cdot W_2 - W_3 \cdot k_3^2}{\theta} \right) \cdot \sin(k_3 \cdot x) \right] - \frac{\theta \cdot G}{\Omega}; \quad (23)$$

Соотношения (21) и (23) определяют распределение температуры по длине центрального формирующего стержня и в расплаве до точки кристаллизации. Указанные характеристики зависят от температуры расплава, температуры среды, охлаждающей кристаллизатор, и параметров внешнего теплообмена кристаллизатора.

Решение (23) позволяет определить длину зоны кристаллизации расплава для заданной скорости вытяжки трубы в условиях заданного внешнего теплообмена.

Выводы. Предложена математическая модель процесса охлаждения труб малого диаметра из алюминиевых сплавов в кристаллизаторе от температуры расплава до температуры кристаллизации. Модель учитывает условия теплоотдачи от расплава к кристаллизатору и стержню, а также передачу теплоты через боковую поверхность кристаллизатора в окружающую среду.

Список литературы: 1. Хахалин В.Д., Семко В.И., Смоляков А.Н. и др. Труболитейное производство. - М.: Металлургия, 1977. - 224 с. 2. Гецелев З.Н., Балахонцев Г.А., Квасов Ф.И. и др. Непрерывное литье в электромагнитный кристаллизатор. - М.: Металлургия, 1983. - 152 с. 3. Скачков В.А., Колобов Г.А., Иванов В.И., Оверчук О.Р. Непрерывная кристаллизация тонких прутков из алюминиевых сплавов / Прогрессивные технологии и системы машиностроения. - Донецк: Изд-во ДНТУ, 2005. - С.262-266. 4. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплоотдача. - М.: Энергия, 1981. - 416 с.

Сдано в редакцию 10.02.07