

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

А. И. ВЕЙНИК

ОБ ОХЛАЖДЕНИИ ОТЛИВКИ

(Представлено академиком И. П. Бардиным 22 V 1952)

В настоящей работе рассматриваются закономерности, которым подчиняется процесс кристаллизации отливки в окрашенной изнутри металлической форме. Полученные решения дают связь между температурными полями отливки и формы. В решениях непосредственно учитывается влияние на процесс кристаллизации зазора между отливкой и формой и теплообмена формы с окружающей средой (рассматриваются формы как охлаждаемые, так и неохлаждаемые⁽¹⁻³⁾).

Процесс охлаждения фасонной отливки в окрашенном изнутри кокиле (так же как и в неметаллической форме⁽⁴⁾) характеризуется относительно малой интенсивностью⁽⁵⁾. Это объясняется тем, что фасонная отливка обычно имеет малую толщину, а слой краски, покрывающей внутреннюю поверхность формы, обладает значительным термическим сопротивлением. Условия, при которых интенсивность теплообмена отливки с формой и формы с окружающей средой можно считать практически малой, характеризуются малыми значениями двух критериев K и Bi (величины этих критериев должны быть много меньше единицы^(6, 7)).

Критерий

$$K = \frac{\lambda_{\text{ззз}}}{\lambda} \frac{X}{X_{\text{ззз}}}, \quad (1)$$

где $\lambda_{\text{ззз}}$ — эффективный коэффициент теплопроводности вещества, заполняющего зазор между отливкой и формой; λ — коэффициент теплопроводности материала отливки (или формы); X — половина толщины отливки (или толщина стенки формы) и $X_{\text{ззз}}$ — величина зазора.

Критерий Био

$$Bi = \frac{\alpha_2}{\lambda_2} X_2, \quad (2)$$

где α_2 — коэффициент теплоотдачи от внешней поверхности формы*.

Для удобства дальнейших рассуждений разобьем весь процесс охлаждения отливки на три отдельных (независимых) стадии.

Первая стадия охлаждения характеризуется отводом теплоты перегрева от жидкого металла отливки и повышением температуры формы. Уравнения теплового баланса для отливки и формы при малой интенсивности теплообмена имеют вид

$$\alpha_1 (\vartheta_1 - \vartheta_2) F_1 d\tau = - V_1 \gamma_1 c_1 d\vartheta_1, \quad (3)$$

$$\alpha_1 (\vartheta_1 - \vartheta_2) F_1 d\tau = \alpha_2 \vartheta_2 F_2 d\tau + V_2 \gamma_2 c_2 d\vartheta_2, \quad (4)$$

* Индексы 1 везде относятся к отливке, а индексы 2 — к форме.

где

$$\alpha_1 = \frac{\lambda_{\text{зал}}}{X_{\text{зал}}}, \quad (5)$$

F_1 — площадь поверхности соприкосновения отливки и формы; τ — время; V — объем; γ — удельный вес; c — удельная теплоемкость; F_2 — площадь поверхности охлаждения формы; ϑ — среднее значение температуры в сечении отливки или формы. Температура ϑ отсчитывается от температуры окружающей форму среды как от нуля.

Решением этих уравнений является выражение

$$\frac{\vartheta_1}{\vartheta_{1 \text{ нач}}} \left(\frac{U}{U_{\text{нач}}} \right)^{k_1} \sqrt{\frac{U'_{\text{нач}}}{U'}}. \quad (6)$$

где

$$U = \frac{2u + k_2 - k_3}{2u + k_2 + k_3}, \quad U_{\text{нач}} = \frac{2u_{\text{нач}} + k_2 - k_3}{2u_{\text{нач}} + k_2 + k_3},$$

$$U' = u^2 + k_2 u - k_1,$$

$$U'_{\text{нач}} = u_{\text{нач}}^2 + k_2 u_{\text{нач}} - k_1,$$

$$k_1 = \frac{V_1 \gamma_1 c_1}{V_2 \gamma_2 c_2}, \quad k_2 = k_1 \left(1 + \frac{\alpha_2 E_2}{\alpha_1 F_1} \right) - 1,$$

$$k_3 = \sqrt{4k_1 + k_2^2}, \quad k_4 = \frac{2 + k_2}{2k_3},$$

$$u = \frac{\vartheta_2}{\vartheta_1}, \quad u_{\text{нач}} = \frac{\vartheta_{2 \text{ нач}}}{\vartheta_{1 \text{ нач}}}.$$

В формуле (6) температура отливки ϑ_1 выражена в виде функции от величины u . Задаваясь различными значениями u (меньше единицы), можно из (6) найти ϑ_1 , а затем температуру формы ϑ_2 .

Время τ находится также из уравнений (3) и (4):

$$\tau = k_5 \ln \frac{U_{\text{нач}}}{U} + \tau_{\text{нач}}, \quad (7)$$

где

$$k_5 = \frac{V_1 \gamma_1 c_1}{\alpha_1 F_1 k_3}.$$

Рассчитывая первую стадию охлаждения, необходимо в расчетные формулы подставлять вместо $\vartheta_{1 \text{ нач}}$ — температуру заливаемого металла $\vartheta_{\text{зал}}$; вместо $\vartheta_{2 \text{ нач}}$ — начальную температуру кокиля в момент заливки; величина $\tau_{\text{нач}} = 0$. Константы γ_1 и c_1 должны соответствовать металлу отливки в жидком состоянии.

Для второй стадии охлаждения, если металл кристаллизуется в интервале температур $\Delta t_{\text{кр}} = \vartheta_{\text{нач. кр}} - \vartheta_{\text{кон. кр}}$, формулы (6) и (7) также справедливы, ибо при малой интенсивности теплообмена температура кристаллизующейся отливки по всему сечению непрерывно уменьшается внутри интервала $\Delta t_{\text{кр}}$. При этом в формулах (6) и (7) начальные значения величин $\vartheta_{1 \text{ нач}}$, $\vartheta_{2 \text{ нач}}$ и $\tau_{\text{нач}}$ для второй стадии должны соответствовать моменту отвода всей теплоты перегрева, т. е. моменту окончания первой стадии охлаждения. Вместо величины c_1 необходимо подставить величину $c_1 + \rho_1 / \Delta t_{\text{кр}}$, где ρ_1 — удельная теплота кристаллизации.

Если металл отливки кристаллизуется при постоянной температуре $\vartheta_{кр}$, то температуру ϑ_2 можно получить из уравнения теплового баланса для формы (4), положив $\vartheta_1 = \vartheta_{кр} = \text{const}$:

$$\vartheta_2 = k_6 - (k_6 - \vartheta_{2 \text{ нач}}) e^{-\frac{\tau - \tau_{нач}}{k_7}}, \quad (8)$$

где

$$k_6 = \frac{\vartheta_{кр}}{1 + \frac{\alpha_2 F_2}{\alpha_1 F_1}}, \quad k_7 = \frac{V_2 \gamma_2 c_2}{\alpha_1 F_1 + \alpha_2 F_2}.$$

Значения величин $\vartheta_{2 \text{ нач}}$ и $\tau_{нач}$ соответствуют концу первой стадии охлаждения.

Объем v металла, закристаллизовавшегося к моменту времени τ , может быть найден из уравнения теплового баланса отливки

$$\alpha_1 (\vartheta_{кр} - \vartheta_2) F_1 d\tau = \gamma_1 \rho_1 dv. \quad (9)$$

Из (8) и (9) получим

$$\frac{\gamma_1 \rho_1}{\alpha_1 F_1} v = k_7 (k_6 - \vartheta_{2 \text{ нач}}) \left(1 - e^{-\frac{\tau - \tau_{нач}}{k_7}}\right) + (\vartheta_{кр} - k_6) (\tau - \tau_{нач}). \quad (10)$$

При $v = V_1$ отливка полностью затвердевает. Зная v и конфигурацию отливки, нетрудно найти толщину затвердевшей корочки ξ к моменту τ (4, 8).

В течение третьей стадии происходит охлаждение затвердевшей отливки. Расчет этой стадии ведется по формулам (6) и (7). Для третьей стадии начальные значения величин $\vartheta_{1 \text{ нач}}$, $\vartheta_{2 \text{ нач}}$ и $\tau_{нач}$ должны соответствовать моменту окончания второй стадии — стадии кристаллизации (независимо от того, кристаллизуется металл при постоянной температуре или в интервале температур). При этом теплофизические константы материала отливки должны выбираться для металла в твердом состоянии.

На рис. 1 изображены кривые изменения средней температуры плоской алюминиевой отливки (1) и окрашенного изнутри чугунного кокиля (2) со временем. Сплошные линии получены расчетом по вышеприведенным формулам, точки соответствуют экспериментальным данным. У отливки

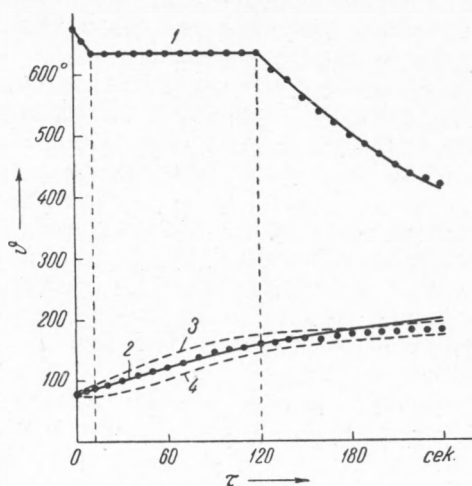


Рис. 1. Охлаждение плоской алюминиевой отливки в окрашенном изнутри чугунном кокиле (толщина отливки и стенок кокиля равна 30 мм). Точки соответствуют экспериментальным данным, сплошные линии получены теоретически ($X_{\text{зас}} = 0,6$ мм). 1 — температура отливки, 2 — средняя температура в сечении кокиля, 3 — температура внутренней поверхности стенки кокиля, 4 — температура наружной поверхности стенки кокиля

разницы в температурах отдельных точек сечения обнаружено не было. У кокиля средняя температура несколько отличается от истинных значений температуры в различных точках сечения (кривые 3 и 4 соответствуют температурам на внутренней и внешней поверхностях кокиля). Имеющаяся разница в значениях температуры раз-

личных точек сечения кокиля принципиального значения не имеет, так как практически не влияет на закономерности, отображающие процесс затвердевания отливки. Среднее значение температуры окрашенного изнутри кокиля вполне характеризует этот процесс.

Совпадение экспериментальных данных с теоретическими результатами следует признать вполне удовлетворительным.

Поступило
30 VII 1951

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ А. И. Вейник, ЖТФ, 20, 9, 1029 (1950). ² А. И. Вейник и А. А. Гухман, ЖТФ, 21, 1, 51 (1951); Тр. МАТИ, № 20 (1951). ³ А. И. Вейник, Тр. МАТИ, № 11 (1951). ⁴ А. И. Вейник, Литейное производство, № 6 (1951). ⁵ А. И. Вейник, там же, № 7 (1951). ⁶ А. А. Гухман, Физические основы теплопередачи, 1934. ⁷ А. В. Лыков, Теплопроводность нестационарных процессов, 1948. ⁸ А. И. Вейник и А. А. Гухман, ЖТФ, 21, 1, 65 (1951); Тр. МАТИ, № 20 (1951).