РАСЧЕТ ВРЕМЕНИ И КОЭФФИЦИЕНТА ЗАТВЕРДЕВАНИЯ ОТЛИВОК В МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ФОРМЕ

О.Г. Приходько, И.Ф. Селянин, А.И. Куценко *(г. Новокузнецк, Россия)*

Многими исследователями экспериментально зафиксировано [1, 2], что при затвердевании отливки в металлической форме температура всех точек системы стремится к определенному уровню, который можно определить как среднюю калориметрическую температуру – $\overline{T}_{к}$.

Средняя калориметрическая температура системы остается постоянной при условии, что потеря теплоты в окружающую среду с поверхности кокиля заметно не влияет на процесс затвердевания. Это возможно в случае, когда масса кокиля $m_ф$ значительно выше массы отливки m_o, то есть для массивного кокиля. В этом случае

$$\overline{T_K} = \frac{L_{KP}\rho_M V_o + c_M \rho_M V_o T_З + c_Ф \rho_Ф V_Ф T_Ф^0}{c_M \rho_M V_o + c_Ф \rho_Ф V_Ф}, \quad (1)$$

где $L_{кр}$ – удельная теплота кристаллизации, Дж/кг; $\rho_м$, $\rho_ф$ – плотность материалов отливки и формы, кг/м^3; $c_м$, $c_ф$ – теплоемкость материалов отливки и формы, Дж/(кг·К); V_o, $V_ф$ – объем отливки и формы, м^3; $T_з$, $T_ф^0$ – температура заливки металла и начальная температура формы, К.

Для реальных отливок, затвердевающих в металлических формах, часто не выполняется условие: $m_o << m_ф$, то есть происходит охлаждение кокиля в окружающую среду. Количество теплоты, отведенное с внешней поверхности кокиля к моменту времени τ, изменяется со временем и определяется по формуле

$$Q_{окр} = \alpha_З F_{пов}(T_{пов} - T_{окр}) \cdot \tau, \quad (2)$$

где $\alpha_з$ – коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности кокиля в окружающую среду, Вт/(м^{2}К); коэффициент $\alpha_з$ оказывает влияние в случае, когда толщина прогретого слоя формы $\delta_Ф$ больше, либо равна толщине стенки кокиля $x_Ф$; $F_{пов}$ – площадь наружной поверхности кокиля, м^2; $T_{пов}$, $T_{окр}$ – температуры наружной поверхности кокиля и окружающей среды, К.

Для бесконечной плиты

$$F_{пов} = F_o; \quad (3)$$

для бесконечного цилиндра

$$F_{пов} = F_o\left(1 + \frac{x_ф}{R}\right); \quad (4)$$

для шара

$$F_{пов} = F_o\left(1 + \frac{x_ф}{R}\right)^2, \quad (5)$$

где F_o – площадь поверхности отливки, м^2; R – приведенный размер отливки, м.

Таким образом, калориметрическая температура системы отливка-кокиль будет понижаться со временем и в момент времени τ будет равна

$$\overline{T}_K^{\tau} = \frac{L_{KP}\rho_M V_o + c_M \rho_M V_o T_З + c_Ф \rho_Ф V_Ф T_Ф^0 - Q_{окр}}{c_M \rho_M V_o + c_Ф \rho_Ф V_Ф}. \quad (6)$$

Тепловой поток с фронта кристаллизации передается на нагрев формы и в окружающую среду через затвердевшую корочку металла и прогретый слой кокиля. Поэтому можно записать равенство

$$K_T F_o (T_З - T_{окр}) d\tau = c_Ф \rho_Ф F_Ф d\delta_Ф \left(\overline{T}_K^{\tau} - T_Ф^0\right) + \alpha_З F_{пов}(T_{пов} - T_{окр}) d\tau, \quad (7)$$

где K_T – коэффициент теплопередачи для плоской многослойной стенки, Вт/(м^{2}К); $F_ф$ – площадь поверхности прогретого слоя формы, м^2.

$$K_T = \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\varepsilon}{\lambda_M} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta_Ф}{\lambda_Ф} + \frac{1}{\alpha_З}\right)^{-1}, \quad (8)$$

где ε – толщина затвердевшей корочки, м; $\lambda_м$, $\lambda_ф$ – теплопроводность материала отливки и формы, Вт/(м·К); α_1, α_2 – коэффициенты теплоотдачи на фронте кристаллизации, на границе отливка – кокиль, Вт/(м^{2}К).

Коэффициент теплоотдачи на границе отливка-кокиль можно определить из условных термических сопротивлений газового зазора и слоя краски [3]

$$\alpha_2 = \left(\frac{x_{газ}}{\lambda_{газ}} + \frac{x_{кр}}{\lambda_{кр}}\right)^{-1}, \quad (9)$$

где $\lambda_{газ}$, $\lambda_{кр}$ – коэффициенты теплопроводности газовой прослойки и краски, Вт/(мК); $x_{газ}$, $x_{кр}$ – толщина газовой прослойки и толщина слоя краски, м.

Толщину газовой прослойки можно определить по формуле [1]

$$x_{газ} = \alpha_m^M (T_{кр} - \overline{T_M}) X_o + \alpha_m^Ф (\overline{T_Ф} - T_Ф^0) X_0, \quad (10)$$

где α_m^M, $\alpha_m^Ф$ — коэффициенты линейного расширения твердого металла отливки и материала формы, 1/К; X_0 - толщина отливки в направлении теплоотвода, м.

$$\alpha_3 = \frac{Nu \cdot \lambda_м}{l},$$

где Nu – критерий Нуссельта, характеризующий интенсивность теплообмена соприкосновением; $l=X_0+2x_ф$ – характерный размер системы отливка-кокиль в направлении теплоотвода, м.

$$Nu = C_1 (Gr \cdot Pr)^{C_2},$$

где C_1 и C_2 – табличные коэффициенты [2], *Gr* – критерий Грасгофа; *Pr* – критерий Прандтля.

Так как, тепло поглощается формой только до ее полного прогрева, то для определения толщины прогретого слоя формы можно записать уравнение теплового баланса

$$\begin{aligned} &L_{КР}\rho_М F_{ЁÐ} d\varepsilon + c_М \rho_М F_{ЁÐ} d\varepsilon (T_Ç - Ò_{КР}) + \tilde{n}_ì \times \\ &\times \rho_ì F_{ЁÐ} d\varepsilon (T_{ЁÐ} - \overline{Ò}_Ê^{\tau}) = c_Ô \rho_Ô F_Ô d\delta_Ô \left(\overline{T}_Ê^{\tau} - Ò_Ô^0\right) \end{aligned} \quad (11)$$

Таким образом, толщина прогретого слоя формы определяется из уравнения

$$d\delta_Ф = b \frac{F_{КР:}}{F_Ф} d\varepsilon \quad , \quad (12)$$

где $F_{кр}$ – площадь поверхности фронта кристаллизации, м^2, при этом

$$b = \frac{L_{КР}\rho_M + c_M \rho_M \left(T_З - \overline{T}_M\right)}{c_Ф \rho_Ф \left(\overline{T}_Ф - T_Ф^0\right)}. \quad (13)$$

Для бесконечной плиты

$$F_{КР} \div F_O \div F_Ф = 1 \div 1 \div 1, \quad (14)$$

для бесконечного цилиндра

$$F_{КР} \div F_O \div F_Ф = \left(1 - \frac{\varepsilon}{R}\right) \div 1 \div \left(1 + \frac{\delta_Ф}{R}\right), \quad (15)$$

для шара

$$F_{КР} \div F_O \div F_Ф = \left(1 - \frac{\varepsilon}{R}\right)^2 \div 1 \div \left(1 + \frac{\delta_Ф}{R}\right)^2. \quad (16)$$

Таким образом, дифференциальное уравнение для определения времени затвердевания отливок в металлических формах имеет вид

$$d\tau = \frac{b \cdot c_ф \rho_ф (\overline{T}_K^{\tau} - T_Ф^0) \cdot \frac{F_{КР}}{F_0}}{K_T (T_З - T_{окр}) - \alpha_3 \frac{F_{пов}}{F_0} (T_{пов} - T_{окр})} d\varepsilon \quad (17)$$

Для отливки типа бесконечной плиты

$$d\tau = \frac{b \cdot c_ф \rho_ф (\overline{T}_K^{\tau} - T_Ф^0)}{K_T (T_З - T_{окр}) - \alpha_3 (T_{пов} - T_{окр})} \cdot d\varepsilon, \quad (18)$$

для отливки типа бесконечного цилиндра

$$d\tau = \frac{b \cdot c_ф \rho_ф (\overline{T}_K^{\tau} - T_Ф^0) \cdot \left(1 - \frac{\varepsilon}{R}\right)}{K_T \left(T_З - T_{окр}\right) - \alpha_3 \left(1 + \frac{x_Ф}{R}\right) \cdot \left(T_{пов} - T_{окр}\right)} d\varepsilon, \quad (19)$$

для отливки типа шара

$$d\tau = \frac{b \cdot c_ф \rho_ф (\overline{T}_K^{\tau} - T_Ф^0) \cdot \left(1 - \frac{\varepsilon}{R}\right)^2}{K_T \left(T_З - T_{окр}\right) - \alpha_3 \left(1 + \frac{x_Ф}{R}\right)^2 \cdot \left(T_{пов} - T_{окр}\right)} d\varepsilon \cdot \quad (20)$$

По представленным выше формулам на ЭВМ производится расчет времени затвердевания чугунного валка в окрашенном кокиле. Расчет производится численными методами.

Результаты экспериментов и расчетов по разработанной модели процесса затвердевания отливок из серого чугуна в окрашенном чугунном кокиле представлены в таблице 1 и на рисунке 1.

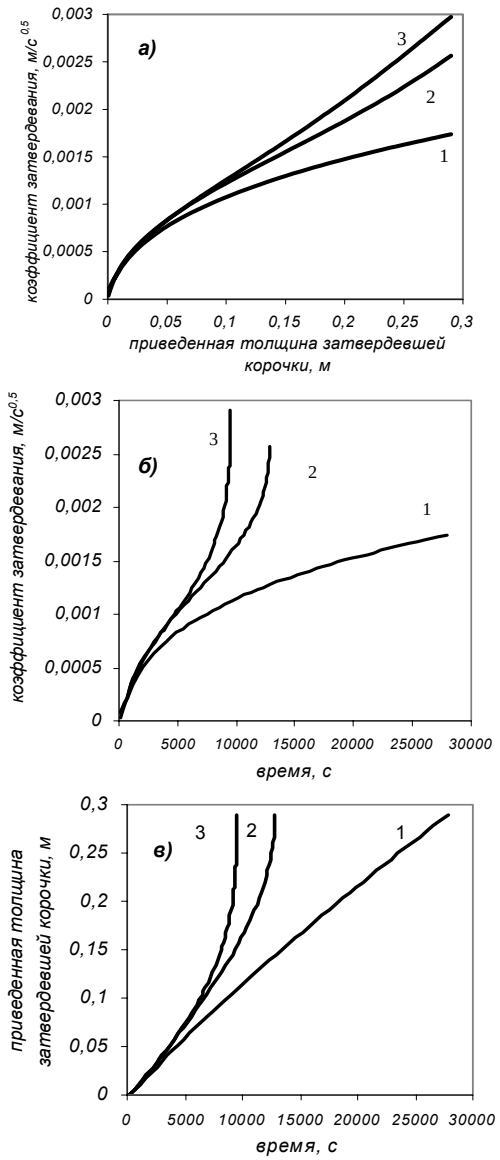

Рисунок 1 – Кривые затвердевания отливок в металлической форме для трех основных тел: 1 – плиты, 2 – цилиндра, 3 – шара:

а) зависимость коэффициента затвердевания от приведенной толщины отливки;

б) зависимость коэффициента затвердевания от времени;

в) зависимость приведенной толщины затвердевшей корочки от времени

Таблица 1 – Сопоставление результатов расчетов для отливок различной конфигурации с одинаковым приведенным размером

Отливка	Характерный размер, м	Время затвердевания, час	Коэффициент затвердевания, м/с^{0,5}
плита	толщина 0,58	7,74/7,82	0,001737
цилиндр	диаметр 1,16	3,61/3,56	0,002563
шар	диаметр 1,74	–/2,64	0,002975

числитель-эксперимент; знаменатель-расчет

На начальном этапе характер движения границы затвердевания для всех трех тел одинаков: корочка нарастает линейно. На конечной стадии наблюдается резкое ускорение процесса затвердевания для цилиндрической отливки, и еще большее ускорение процесса для шара. Для плиты ускорение процесса при $\varepsilon \to R$ отсутствует. Зависимость толщины затвердевшей корочки от времени для плит носит практически линейный характер, для цилиндрической и шаровой отливки – параболический характер.

Характер изменения коэффициента затвердевания для трех основных тел различен. В начальный момент коэффициент затвердевания нарастает от нуля для всех типов конфигурации отливок. В дальнейшем он плавно нарастает для плиты, для цилиндра скорость возрастает, для шара скорость затвердевания максимальна. Для плиты коэффициент затвердевания с момента ≈7000 с нарастает практически линейно. Для цилиндра коэффициент затвердевания нарастает практически линейно в промежутке времени 2000÷11000 с, для шара – в промежутке времени 2000÷7000 с. На конечном этапе ($\tau \to \tau_3$) коэффициент затвердевания цилиндрической отливки резко возрастает. Для шаровой отливки наблюдается еще большее нарастание коэффициента затвердевания на конечном этапе.

Характер изменения коэффициента затвердевания в зависимости от толщины нарастающей корочки хорошо согласуется с литературными данными [4, 5].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вейник А.И. Теория затвердевания отливки / Вейник А.И. – М.: Машгиз, 1960. – 436 с.

2. Баландин Г.Ф. Основы теории формирования отливки. Ч. 1. Тепловые основы теории литья. Затвердевание и охлаждение отливки: Учеб. пособие / Г.Ф. Баландин – М.: Машиностроение, 1976. – 328 с.

3. Контактное взаимодействие отливка-форма под действием вибрации /И.Ф. Селянин, А.И. Куценко, С.В. Морин, Р.М. Хамитов, О.Г. Приходько //Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения. Труды региональной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых / Под общей ред. Кулакова С.М. /СибГИУ. – Новокузнецк, 2004. – Вып. 8. – С. 243.

4. Некоторые теплофизические особенности кристаллизации крупных листовых слитков / В.И. Легенчук, В.А. Ефимов, В.Н. Синица и др. // Физико-химические и теплофизические процессы кристаллизации стальных слитков / Под ред. В.А. Ефимова. – М.: Металлургия, 1967. – С. 44 – 59.

5. Флемингс М. Процессы затвердевания: Пер. с англ. /Флемингс М. – М.: Мир, 1977. – 425 с.