

АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА СКОРОСТИ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ ОТЛИВОК В МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ФОРМЕ

О.Г. Приходько, И.Ф. Селянин, А.И. Куценко

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 – \bar{T}_K .

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_ϕ значительно выше массы отливки m_o , то есть для массивного кокиля. В этом случае

$$\bar{T}_K = \frac{L_{кр}\rho_M V_o + c_M \rho_M V_o T_3 + c_\phi \rho_\phi V_\phi T_\phi^0}{c_M \rho_M V_o + c_\phi \rho_\phi V_\phi}, \quad (1)$$

где $L_{кр}$ – удельная теплота кристаллизации, Дж/кг; ρ_M, ρ_ϕ – плотность материалов отливки и формы, кг/м³; c_M, c_ϕ – теплоемкость материалов отливки и формы, Дж/(кг·К); V_o, V_ϕ – объем отливки и формы, м³; T_3, T_ϕ^0 – температура заливки металла и начальная температура формы, К.

Для реальных отливок, затвердевающих в металлических формах, часто не выполняется условие: $m_o \ll m_\phi$, 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

$$Q_{окр} = \alpha_3 F_{нов} (T_{нов} - T_{окр}) \cdot \tau, \quad (2)$$

где α_3 – коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности кокиля в окружающую среду, Вт/(м²·К); коэффициент α_3 оказывает влияние в случае, когда толщина прогретого слоя формы δ_ϕ больше, либо равна толщине стенки кокиля x_ϕ ; $F_{нов}$ – площадь наружной поверхности кокиля, м²; $T_{нов}, T_{окр}$ – температуры наружной поверхности кокиля и окружающей среды, К.

Для бесконечной плиты

$$F_{нов} = F_o; \quad (3)$$

для бесконечного цилиндра

$$F_{нов} = F_o \left(1 + \frac{x_\phi}{R} \right); \quad (4)$$

для шара

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

где F_o – площадь поверхности отливки, м²; R – приведенный размер отливки, м.

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

$$\bar{T}_K^\tau = \frac{L_{кр}\rho_M V_o + c_M \rho_M V_o T_3 + c_\phi \rho_\phi V_\phi T_\phi^0 - Q_{окр}}{c_M \rho_M V_o + c_\phi \rho_\phi V_\phi}. \quad (6)$$

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

$$K_T F_o (T_3 - T_{окр}) d\tau = c_\phi \rho_\phi F_\phi d\delta_\phi (\bar{T}_K^\tau - T_\phi^0) + \alpha_3 F_{нов} (T_{нов} - T_{окр}) d\tau, \quad (7)$$

где K_T – коэффициент теплопередачи для плоской многослойной стенки, Вт/(м²·К); F_ϕ – площадь поверхности прогретого слоя формы, м².

$$K_T = \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\varepsilon}{\lambda_M} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta_\phi}{\lambda_\phi} + \frac{1}{\alpha_3} \right)^{-1}, \quad (8)$$

где ε – толщина затвердевшей корочки, м; λ_M, λ_ϕ – теплопроводность материала отливки и формы, Вт/(м·К); α_1, α_2 – коэффициенты теплоотдачи на фронте кристаллизации, на границе отливка – кокиль, Вт/(м²·К).

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

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

АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА СКОРОСТИ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ ОТЛИВОК В МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ФОРМЕ

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]

$$x_{газ} = \alpha_m^M (T_{кр} - \bar{T}_M) X_0 + \alpha_m^\Phi (\bar{T}_\Phi - T_\Phi^0) X_0, \quad (10)$$

где α_m^M , α_m^Φ – коэффициенты линейного расширения твердого металла отливки и материала формы, 1/К; X_0 – толщина отливки в направлении теплоотвода, м.

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

где Nu – критерий Нуссельта, характеризующий интенсивность теплообмена соприкосновением; $l = X_0 + 2x_\Phi$ – 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

$$L_{кр} \rho_M F_{\text{ЭД}} d\varepsilon + c_M \rho_M F_{\text{ЭД}} d\varepsilon (T_C - \dot{O}_{кр}) + \tilde{n}_1 \times \\ \times \rho_1 F_{\text{ЭД}} d\varepsilon (T_{\text{ЭД}} - \dot{O}_{\text{Э}}) = c_0 \rho_0 F_0 d\delta_0 (\bar{T}_{\text{Э}}^\tau - \dot{O}_0^0). \quad (11)$$

Таким образом, толщина прогретого слоя формы определяется из уравнения

$$d\delta_\Phi = b \frac{F_{кр}}{F_\Phi} d\varepsilon, \quad (12)$$

где $F_{кр}$ – площадь поверхности фронта кристаллизации, м², при этом

$$b = \frac{L_{кр} \rho_M + c_M \rho_M (T_3 - \bar{T}_M)}{c_\Phi \rho_\Phi (\bar{T}_\Phi - T_\Phi^0)}. \quad (13)$$

Для бесконечной плиты

$$F_{кр} \div F_0 \div F_\Phi = 1 \div 1 \div 1, \quad (14)$$

для бесконечного цилиндра

$$F_{кр} \div F_0 \div F_\Phi = \left(1 - \frac{\varepsilon}{R}\right) \div 1 \div \left(1 + \frac{\delta_\Phi}{R}\right), \quad (15)$$

для шара

$$F_{кр} \div F_0 \div F_\Phi = \left(1 - \frac{\varepsilon}{R}\right)^2 \div 1 \div \left(1 + \frac{\delta_\Phi}{R}\right)^2. \quad (16)$$

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

$$d\tau = \frac{b \cdot c_\Phi \rho_\Phi (\bar{T}_K^\tau - T_\Phi^0) \cdot \frac{F_{кр}}{F_0}}{K_T (T_3 - T_{окр}) - \alpha_3 \frac{F_{нов}}{F_0} (T_{нов} - T_{окр})} d\varepsilon \quad (17)$$

Для отливки типа бесконечной плиты

$$d\tau = \frac{b \cdot c_\Phi \rho_\Phi (\bar{T}_K^\tau - T_\Phi^0)}{K_T (T_3 - T_{окр}) - \alpha_3 (T_{нов} - T_{окр})} \cdot d\varepsilon, \quad (18)$$

для отливки типа бесконечного цилиндра

$$d\tau = \frac{b \cdot c_\Phi \rho_\Phi (\bar{T}_K^\tau - T_\Phi^0) \cdot \left(1 - \frac{\varepsilon}{R}\right)}{K_T (T_3 - T_{окр}) - \alpha_3 \left(1 + \frac{x_\Phi}{R}\right) \cdot (T_{нов} - T_{окр})} d\varepsilon, \quad (19)$$

для отливки типа шара

$$d\tau = \frac{b \cdot c_\Phi \rho_\Phi (\bar{T}_K^\tau - T_\Phi^0) \cdot \left(1 - \frac{\varepsilon}{R}\right)^2}{K_T (T_3 - T_{окр}) - \alpha_3 \left(1 + \frac{x_\Phi}{R}\right)^2 \cdot (T_{нов} - T_{окр})} d\varepsilon. \quad (20)$$

По представленным выше формулам на ЭВМ производится расчет времени затвердевания чугунного вала 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.

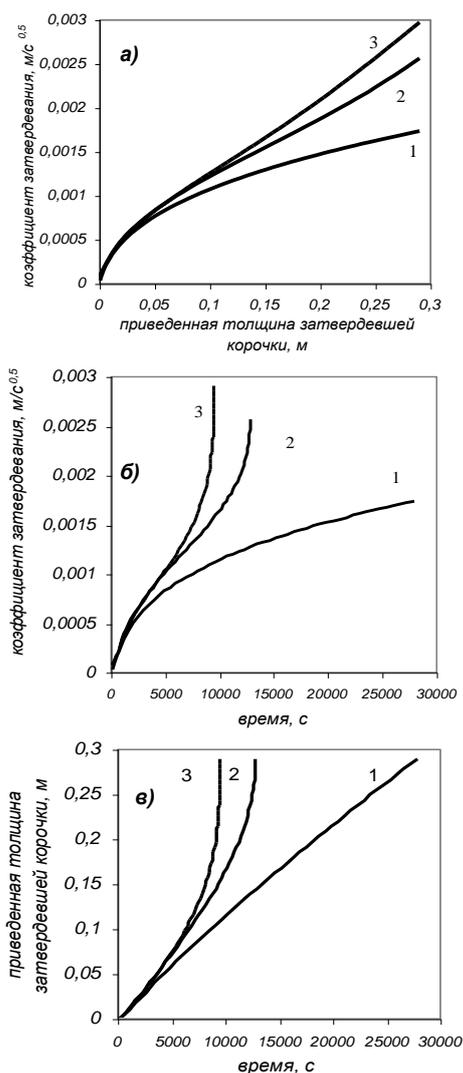


Рисунок 1 – Кривые затвердевания отливок в металлической форме для трех основных тел: 1 – плиты, 2 – цилиндра, 3 – шара:

- 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 ко-

нечной стадии наблюдается резкое ускорение процесса затвердевания для цилиндрической отливки, и еще большее ускорение процесса для шара. Для плиты ускорение процесса при $\epsilon \rightarrow R$ 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 $2000 \div 11000$ с, для шара – в промежутке времени $2000 \div 7000$ с. На конечном этапе ($t \rightarrow t_3$) 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. Сеница 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.

Сибирский государственный индустриальный университет