

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ КРИСТАЛІЗАЦІЇ СЕРДЕЧНИКІВ СТІЛОЧНИХ ПЕРЕВОДІВ У ДВОШАРОВІЙ ЛИВАРНІЙ ФОРМІ

В статті наведена математична модель температурного поля системи «відливка – двошарова ливарна форма», спроможна оцінити характер розповсюдження фронту кристалізації по перетину відливки і визначити параметри ливарної форми, які забезпечать найбільш сприятливі теплові умови формування структури сердечників.

В статье приведена математическая модель температурного поля системы «отливка – двухслойная литейная форма», позволяющая оценить характер распространения фронта кристаллизации по сечению отливки и определить параметры литейной формы, которые обеспечат наиболее благоприятные тепловые условия формирования структуры сердечников.

The mathematical model of the temperature field of the «Casting» system is presented in the article. «Casting» as a two-layer foundry form is supposed to estimate the character of propagation of crystallization front along the casting section and to define the parameters of the casting form, which will provide the most favorable thermal conditions of the core structure formation.

Надійність і довговічність стрілочних переводів, які відповідають за безпеку руху в місцях переходу рухомого складу з однієї колії на іншу, залежить від зносостійкості та строку служби сердечників і хрестовин – найбільш зношуваних елементів цієї відповідальної конструкції.

Суцільність рейкових ниток у межах хрестовини порушена і колеса рухомого складу, переходячи з вістря сердечника на вусову частину (або в протилежному напрямку), утворюють значні ударні та стираючі навантаження, які призводять до інтенсивного зношування сердечників. Тому питання підвищення експлуатаційної стійкості сердечників є актуальною задачею.

Сердечники і хрестовини відливають з високолегованої сталі 110Г13Л в сухих пісчано-глиняних формах.

Відомо [1], що структура і властивості литого металу значною мірою залежать від умов кристалізації та охолодження відливок у ливарній формі.

Одним з найбільш ефективних методів, який дозволяє керувати процесом кристалізації та охолодження відливок в широкому діапазоні, а отже, цілеспрямовано формувати необхідну структуру і властивості сталі в робочому шарі відливок, є використання двошарових ливарних форм зі змінною товщиною облицювального шару. Технологія відливання сердечників в двошаровій ливарній формі розроблена в ДІПТі [2].

Для визначення оптимальних параметрів двошарової ливарної форми, які забезпечать найбільш сприятливі умови кристалізації таких складних в тепловому відношенні відливок зі змінним поперечним перетином, як сердечники, необхідно провести складні експериментальні дослідження. Але отримання необхідних даних на основі тільки експериментальних досліджень, особливо в заводських умовах, зв'язано з великими організаційними, технологічними й матеріальними труднощами, часто нездоланими, що ініціює пошуки нових шляхів отримання необхідної інформації.

Найбільш ефективним і прийнятним рішенням даної проблеми може бути математичне моделювання процесу кристалізації сердечників у двошаровій ливарній формі.

Фізико-математична модель температурного поля системи «відливка – двошарова форма»

Модель призначена для дослідження процесу кристалізації сердечників у двошаровій ливарній формі в залежності від змінних умов тепловідведення на різних ділянках форми з урахуванням співвідношення між товщиною металевої оболонки і облицювального шару формовочної суміші, а також теплообміну з навколишнім середовищем. Процес теплообміну в межах ливарної форми напряму залежить від умов теплопередачі теплопровідністю, а тепло-

передача з зовнішньої поверхні відбувається природною конвекцією.

Враховуючи, що термічний опір облицювального покриття значно більше термічного опору газового прошарку на границі шарів форми, зневажаємо термічним опором останнього, тобто вважаємо систему «відливка – форма» за суцільне середовище зі змінними по координатах теплофізичними властивостями, залежними від температури. Вирішується плоска задача, тому що в третьому напрямку систему можна вважати нескінченно-довгою, що виправдано великою довжиною сердечників.

Математично процес тверднення відливки описується в наближенні квазірівноважної двофазної зони [3]. Розподіл температури в плоскому перетині системи «форма – відливка» описується квазілінійним диференціальним рівнянням теплопровідності зі змінними коефіцієнтами:

$$\frac{\partial}{\partial X_1} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial X_1} \right) + \frac{\partial}{\partial X_2} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial X_2} \right) = c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad (1)$$

де c – теплоємність, $c = c(X_1, X_2, T)$; ρ – щільність, $\rho = \rho(X_1, X_2)$; X_1, X_2 – поточні координати, $0 \leq X_1 \leq l_1$, $0 \leq X_2 \leq l_2$; l_1, l_2 – розміри моделі; T – температура, $T = T(X_1, X_2, \tau)$; τ – час; λ – коефіцієнт теплопровідності, $\lambda = \lambda(X_1, X_2, T)$.

Початкові умови:

$$T(X_1, X_2, 0) = T_0(X_1, X_2), \quad (2)$$

де $T_0 = 1690$ К – початкова температура металу, який заливається у форму.

Умови на границях:

$$X_1 = 0, X_1 = l_1, \lambda \frac{\partial T}{\partial X_1} = \alpha(T - T_{\text{сер}}) \quad (3)$$

$$X_2 = 0, X_2 = l_2, \lambda \frac{\partial T}{\partial X_2} = \alpha(T - T_{\text{сер}}) \quad (4)$$

де $T_{\text{сер}} = 293$ К – температура навколишнього середовища.

Теплоємність описується декількома рівняннями:

а) для стінки кокілю:

$$c(X_1, X_2, T) = c_k(T); \quad (5)$$

б) для облицювального шару:

$$c(X_1, X_2, T) = c_{\text{обл}}(T); \quad (6)$$

в) для виливка розглядається ефективна теплоємність з врахуванням виділення теплоти кристалізації та наявності твердо-рідкої фази:

$$c = \begin{cases} c_T, & \text{якщо } T \leq T_S, \\ c_{\text{эф}} = \frac{c_T + c_P}{2} + \chi \frac{dS}{dT}, & \text{якщо } T_S < T < T_L, \\ c_P, & \text{якщо } T \geq T_L, \end{cases}, \quad (7)$$

де c_P, c_T – теплоємності рідкої і твердої фаз; χ – теплота кристалізації; $\frac{dS}{dT}$ – частка твердої фази, обумовлена рівнянням:

$$\frac{dS}{dT} = \frac{1}{(1 - K_p)(T_A - T_0)} \left(\frac{T_A - T_0}{T_A - T} \right)^{\frac{2 - K_p}{1 - K_p}}, \quad (8)$$

де T_A – параметр рівняння лінії ліквідус; $T_A = 1812$ К; T_0 – температура ліквідус, що відповідає заданому вмісту вуглецю в розплаві; $T_0 = 1690$ К; K_p – коефіцієнт розподілу, $K_p = 0,45$ для сталі.

Коефіцієнт теплопровідності можна прийняти:

а) для стінки кокілю:

$$\lambda(X_1, X_2, T) = \lambda_k(T); \quad (9)$$

б) для облицювального шару:

$$\lambda(X_1, X_2, T) = \lambda_{\text{обл}}(T); \quad (10)$$

в) для виливка береться усереднений для рідкої та твердої фаз:

$$\lambda(X_1, X_2, T) = \lambda_{\text{отл}}(T). \quad (11)$$

Для наближених розрахунків наведені вище оцінки співвідношення теплоємності та коефіцієнта теплопровідності можна апроксимувати кусково-лінійними залежностями на інтервалах температур. Тоді вихідне рівняння (1) перетворюється в рівняння з кусково-розривними коефіцієнтами, що не залежать від температури, а є функціями координат. Рішення цього рівняння дозволить визначити температуру в кожній точці перетину в будь-який момент часу. Границі затверділої зони відповідають температурі солідус чи температурі, за якої твердне 95 % сплаву.

Кусково-різницева апроксимація задачі

На прямокутник розрахункової схеми, представленої на рис. 1, накладається сітка з осере-

дками $h_1 = \frac{l_1}{N_1}$ і $h_2 = \frac{l_2}{N_2}$, що складає $(N_1 - 1)(N_2 - 1)$ внутрішніх вузлів і $[2(N_1 + N_2 - 2) + 4]$ вузлів на границях області. Де N_1, N_2 – число розподілів по координатах X_1 та X_2 , відповідно. Відрізок часу t_{\max} відповідає періоду від заливання металу в форму до повного тверднення, теж розбивається на n рівних частин із кроком $\tau = \frac{t_{\max}}{n_{\max}}$.

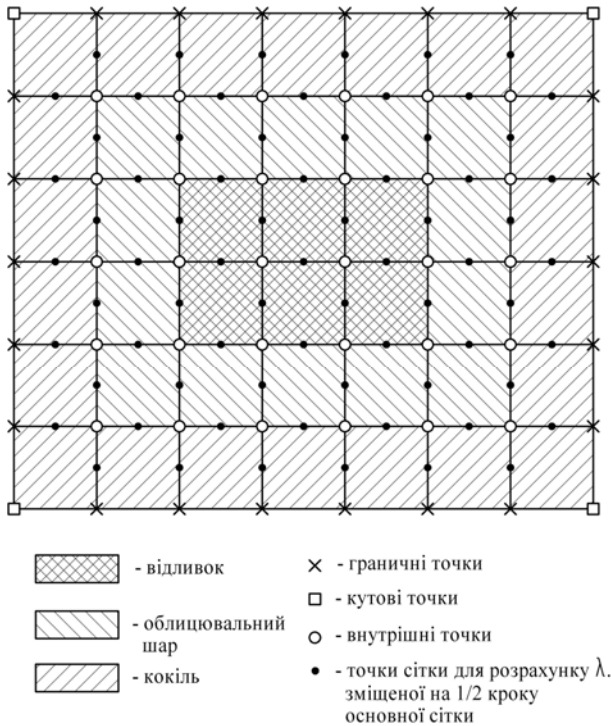


Рис. 1. Схема розташування сітки в перетині відливка

Використовуючи інтегро-інтерполяційний метод теплового балансу для всіх точок, неявну схему апроксимації похідної за часом і формули «наскрізного рахунку» [4], що не змінюються при переході від одного вузла сітки до іншого, одержують кінцево-різницеві апроксимації похідних по координатах.

Універсальним методом, придатним для рішення рівняння теплопровідності з перемінними чи навіть розривними коефіцієнтами в довільній області G , будь-якого числа вимірювань, є локально-одномірний метод. Сутність його складається в заміні, наприклад, двомірного рівняння теплопровідності послідовністю двох одномірних рівнянь.

Локально-одномірна схема (ЛОС) для рів-

няння (1) будується з послідовності двох різницевих схем. При цьому при переході від часового шару n до шару $n+1$ вводиться проміжний шар $n + \frac{1}{2}$. На шарі n рішення шукається в одному напрямку сітки. Це рішення є проміжним і служить початковим рішенням для рішення на другому напрямку сітки, яке буде остаточним для $n+1$ кроку за часом.

Для визначення $T^{n+\frac{1}{2}}$, а потім T^{n+1} використовується метод прогону, причому значення температури T , що входить аргументом у функції « c » та « λ », беруться із шару $n + \frac{1}{2}$. Оскільки ці значення невідомі, то їх шукають послідовними наближеннями по K -номеру ітерації. Число їх звичайно дорівнює 4...7.

В рамках даної статті немає необхідності наводити усі перетворення вихідного рівняння в остаточні рівняння ЛОС, розв'язувані методом прогону на ПЕОМ за програмою.

Результати розрахунків експериментальних досліджень

Використовуючи розроблену фізико-математичну модель тверднення сердечника, розраховується розподіл температур по перетину системи «відливка – двошарова форма» за різних умов тепловідведення. За цими даними можна оцінити характер і швидкість просування фронту кристалізації в будь-якому перетині вилівка і, як наслідок, визначити найбільш сприятливі умови кристалізації, які забезпечать щільну, дрібнозернисту структуру металу з високим рівнем механічних властивостей в робочому шарі поверхонь кочення сердечників.

Результати обчислень за запропонованою методикою підтверджуються експериментальними даними і добре просліджуються по кривих охолодження металу в різних точках по перетину системи «відливка – двошарова форма» (рис. 2). Експерименти проводились на натурних зразках із товщиною облицювального шару на ділянках форми, які відповідають поверхням кочення сердечників, від 0 до 5 мм і товщиною 35 мм на інших ділянках форми (рис. 3). Встановлено, що зі зміною товщини покриття темп охолодження $\left(\frac{\Delta T}{\Delta \tau}\right)$ змінюється і там, де шар облицювання менше, швидкість поширення фронту кристалізації зростає.

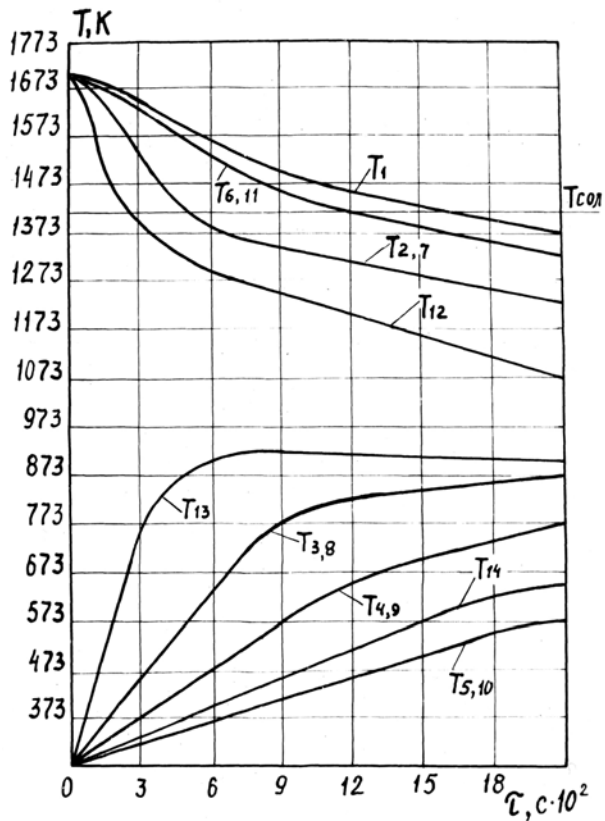


Рис. 2. Криві охолодження в контрольних точках (див. рис. 3) по перетину системи «відливки – двошарова форма»

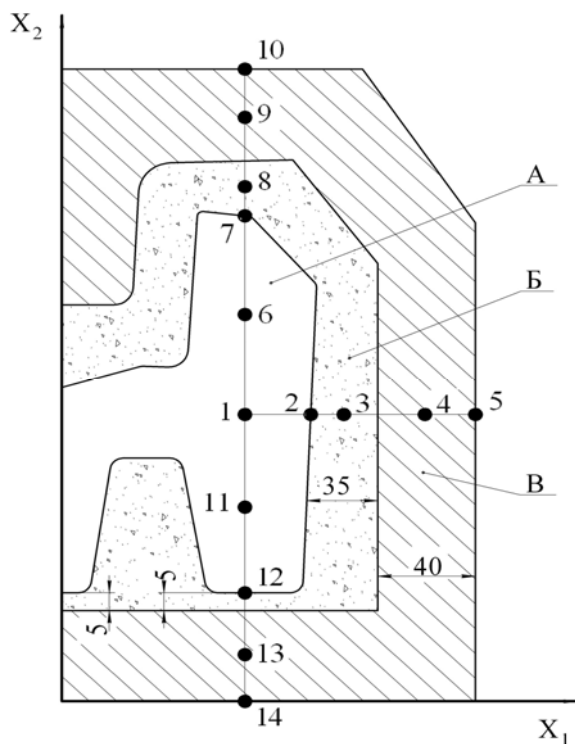
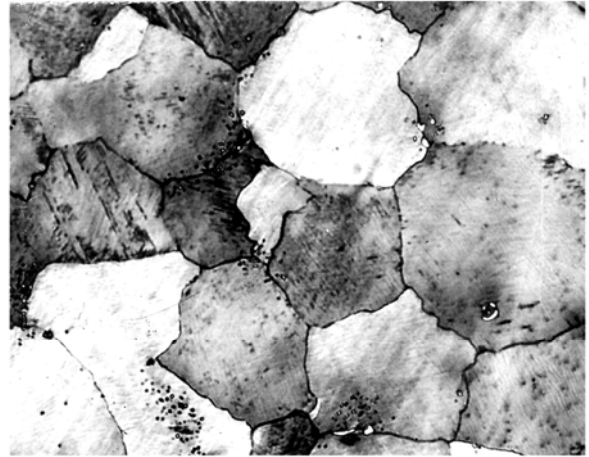


Рис. 3. Схема системи «двошарова форма – відливка»: А – відливка; Б – формовочна суміш; В – металева оболонка

У випадку, коли товщина покриття відсутня, тобто залишається тільки металева оболонка, швидкість процесу кристалізації найвища. Це супроводжується утворенням щільної дрібнозернистої структури. На рис. 4 показана залежність розміру зерен від товщини облицювального шару.



а



б

Рис. 4. Мікроструктура сталі 110Г13Л в поверхневому шарі сердечників, відлитої у двошаровій формі (збільшення 120):

а – товщина облицювального шару 5 мм;
б – товщина облицювального шару 35 мм

Але відсутність шару формовочної суміші неприпустима, тому що контакт з розплавом призводить до поступового руйнування металевої оболонки. Потрібен незначний шар формовочної суміші, до 5 мм. На рис. 5 видно характер розповсюдження фронту кристалізації по перетину сердечника, який охолоджується в двошаровій формі з товщиною формовочної суміші 5 мм на вістрі і вусовинах, і 35 мм на інших ділянках форми.

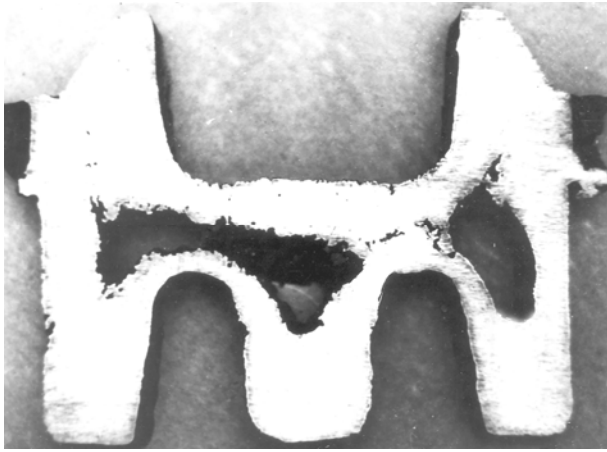


Рис. 5. Характер просування фронту кристалізації по перетину сердечника, який охолоджується в двошаровій формі з товщиною формовочної суміші 5 мм на вусовиках і вістрі та 35 мм – на інших ділянках форми

ВИСНОВКИ

1. Розроблено фізико-математичну модель тверднення сердечників зі сталі 110Г13Л у двошаровій ливарній формі. Модель дозволяє встановити характер і швидкість просування фронту кристалізації в будь-якому перетині відливка і визначити оптимальні параметри двошарової форми, які забезпечать найбільш сприятливі умови кристалізації.

2. Встановлено, що товщина формовочної суміші на ділянках форми, які відповідають вістрі і вусовикам сердечника, повинна бути

мінімальною до 5 мм. Це дозволяє отримати щільну мілкозернисту структуру в робочому шарі поверхонь кочення сердечників. На інших ділянках шар формовочної суміші товщиною 30...35 мм забезпечить необхідну податливість форми.

3. Збіг результатів розрахунків з експериментальними даними дає можливість отримання сердечників стрілочних переводів із прогнозованими експлуатаційними характеристиками.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Михайлов, А. М. Влияние режимов охлаждения отливок в форме на структуру и механические свойства стали 110Г13Л [Текст] / А. М. Михайлов. – М.: Литейное производство, 1980. – С. 5-7.
2. Литейная форма для отливки сердечника железнодорожной крестовины [Текст] : а. с. № 1470441 (СССР) : МКИ В22С / Б. Н. Смирнов. – 1989. – № 3. – С. 4.
3. Михеев, М. А. Основы теплопередачи [Текст] / М. А. Михеев, И. М. Михеев. – М.: Энергия, 1986. – 173 с.
4. Самарский, А. А. Теория разностных схем [Текст] / А. А. Самарский. – М.: Наука, 1977. – 140 с.

Надійшла до редколегії 24.12.2008.