

**Тарасевич М. І., Корнієць І. В., Пригунова А. Г.,
Недужий А. М. Бабюк В. Д., Жидков Є. А.**
(ФТІМС НАН України, Київ)

**МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРИ НА ФОРМУВАННЯ
СТРУКТУРИ ВИЛИВКА ЗІ СПЛАВУ АК5М2**

E-mail: adel_nayka@ukr.net



АНОТАЦІЯ. У статті за допомогою методів математичного та комп'ютерного моделювання проведено аналіз впливу початкової температури ливарного сплаву АК5М2 на умови формування структури вилівка. Досліджено процес затвердіння вилівка діаметром 30 мм у сталевому кокілі за умови зміни температури перегрівання розплаву над ліквідусом від 31 до 131 °С. Встановлено, що початкова температура металу суттєво впливає на час перебування сплаву в перегрітому стані, швидкість твердіння та інтенсивність тепловідведення. Результати моделювання дають змогу прогнозувати параметри структурних зон вилівка, що є критично важливим для забезпечення необхідних механічних та експлуатаційних властивостей литих виробів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: математичне моделювання, сплав АК5М2, температура перегрівання, структура вилівка, швидкість затвердіння.

Якість литого виробу, його властивості, в першу чергу, залежать від структури, яка утворюється під час переходу металу з рідкого у твердий стан. Серед основних чинників впливу на її формування треба виділити наступні: хімічний склад, початкова температура рідкого металу, час перебування в перегрітому та рідко-твердому (в інтервалі температур ліквідус-солідус) станах, інтенсивність тепловідведення через бічну поверхню, швидкості тверднення та охолодження.

Метами математичного і комп'ютерного моделювання проведено аналіз впливу початкової температури ливарного сплаву АК5М2 на умови формування вилівка діаметром 30 мм в серединному перерізі, який отримували у сталевому кокілі товщиною 0,2 мм. Температуру перегрівання (ΔT) над ліквідусом

($t_L = 619\text{ }^\circ\text{C}$) змінювали від $31\text{ }^\circ\text{C}$ до $281\text{ }^\circ\text{C}$. Теплофізичні характеристики матеріалів, які було використано в процесі обчислень, наведено в табл. 1, розміри і загальний вигляд кокілю – на рис. 1.

В процесі моделювання перенесення тепла в системі виливок-кокіль описано рівнянням Фур'є. Під час постановки задачі для забезпечення спрямованого характеру тверднення циліндричного виливка прийнято припущення щодо ідентичності умов теплообміну по всій поверхні. Враховували залежність теплофізичних характеристик виливка і кокілю від температури. У початковий момент часу задавали температури кокілю і рідкого металу ($t_L + \Delta T$). Для вирішення сформульованої задачі використано чисельний метод кінцевих різниць.

Таблиця 1 – Теплофізичні характеристики матеріалів

Характеристики	Матеріал	
	AK5M2 (виливок)	14X17H2 (кокіль)
Густина, $\text{кг}/\text{м}^3$	2700	$7680,0_{T=600\text{ }^\circ\text{C}}$ $7790,0_{T=400\text{ }^\circ\text{C}}$
Питома теплоємність, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$	838	$84,3_{T=600\text{ }^\circ\text{C}}$ $44,2_{T=200\text{ }^\circ\text{C}}$
Теплопровідність, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{K})$	163	22
Теплота фазового переходу, $\text{кДж}/\text{кг}$	500	180
Температура ліквідус, $^\circ\text{C}$	619	
Температура солідус, $^\circ\text{C}$	449	

Встановлено (табл. 2), що після зняття перегрівання з усього об'єму рідкого металу час знаходження виливка у двофазному стані (Δt_1), а також інтервал часу від початку формування твердої кірочки до повного тверднення (Δt_2) є інваріантними відносно значень температур перегрівання у досліджуваному діапазоні і становлять $162,37\text{ с}$ та $2,42\text{ с}$ відповідно. За умови збільшення температури заливання від $650\text{ }^\circ\text{C}$ до $900\text{ }^\circ\text{C}$ час зняття температури перегрівання з усього об'єму виливка збільшується з $5,758\text{ с}$ до $36,75\text{ с}$, що

призводить до зростання часу перебування областей виливка в рідкому стані (рис. 2, кр. 1 та 3). Загальна тривалість тверднення виливка змінюється з 170 с до 201 с (див. табл. 2).

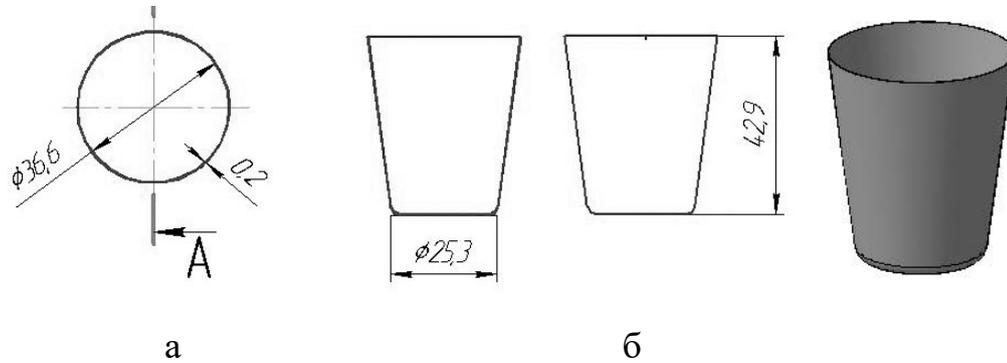


Рис. 1. Розміри (а) та загальний вигляд (б) кокілю

Таблиця 2 – Час зняття теплоти перегрівання розплаву і повного тверднення виливка із сплаву АК5М2 за умови зміни перегрівання відносно температури ліквідус

Початкова температура розплаву, °С (перегрівання відносно температури ліквідус, °С)	Час, с				
	зняття перегрівання ($\tau_{пер.}$)	початку твердіння ($\tau_{затв.1}$)	$\Delta\tau_1 = \tau_{затв.1} - \tau_{пер.}$	повного твердіння ($\tau_{затв.}$)	$\Delta\tau_2 = \tau_{затв.} - \tau_{затв.1}$
650 (31)	5,758	167,76	162,0	170,18	2,42
700 (81)	13,4	175,399	162,0	177,82	2,42
750 (131)	20,23	182,179	162,0	184,6	2,42
800 (181)	26,281	188,25	162,0	190,69	2,42
850 (231)	31,84	193,78	162,0	196,215	2,43
900 (281)	36,75	198,7	162,0	201,12	2,42

З використанням методу регресійного аналізу оцінено вплив температури перегрівання розплаву (ΔT) на час зняття теплоти перегрівання ($\tau_{пер.}$, с) та тривалість тверднення виливка ($\tau_{твер.}$, с). Одержано рівняння другого порядку, за якими розраховано вказані залежності:

– час зняття теплоти перегрівання:

$$\tau_{\text{пер.}} = 0,71124 + 0,16785 \cdot \Delta T - 0,000144 \cdot \Delta T^2, R^2 = 99,93; \quad (1)$$

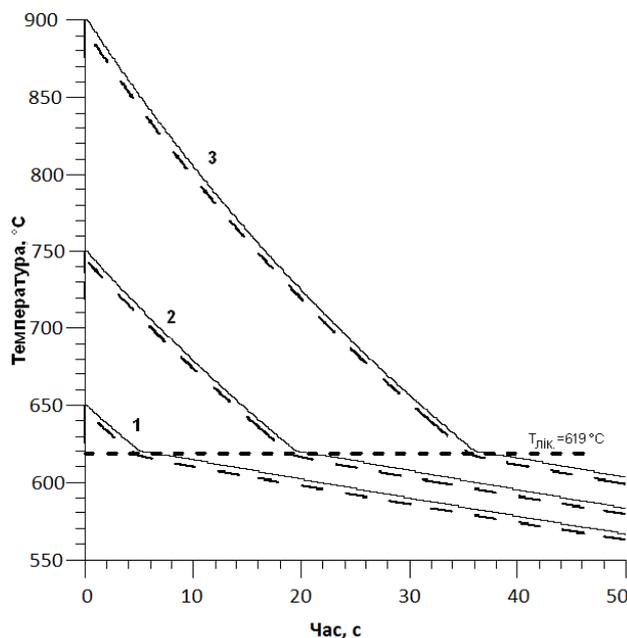


Рис 2. Зміна температури в центрі (---) та на бічній поверхні (—) вилівка залежно від температури заливання: 1 – 650 °C; 2 – 750 °C; 3 – 900 °C

– час повного твердіння вилівка:

$$\tau_{\text{твер.}} = 165,24217 + 0,16507 \cdot \Delta T - 0,000133 \cdot \Delta T^2, R^2 = 99,945, \quad (2)$$

де ΔT – величина перегрівання над ліквідусом, що змінювали від 31 °C до 281 °C;

R^2 – коефіцієнт детермінації (відсоток експериментальних даних, який співпадає з моделлю).

Зниження температури в центрі та на поверхні вилівка в процесі охолодження описується залежністю, близькою до лінійної (див. рис. 2). Через невелику масу металу, що твердне, їх величини суттєво не відрізняються. Тривалість охолодження визначається ступенем перегрівання.

Враховуючи лінійний характер зниження температури розплаву до температури ліквідус, зумовлений постійною площею охолодження, проведено

розрахунки із визначення зміни швидкості охолодження рідкого металу від температури його перегрівання до температури ліквідус. Встановлено, що цей процес можна описати рівнянням другого порядку:

$$v = 5,04897 + 0,0123 \cdot \Delta T - 1,1357 \cdot 10^{-5} \cdot (\Delta T)^2. \quad (3)$$

Зміна швидкості охолодження у двофазній зоні також характеризується лінійною залежністю:

$$v = -0,0004567 \cdot \Delta T + 1,2824. \quad (4)$$

Визначено, що швидкість охолодження рідкого металу під час зняття теплоти перегрівання становить біля $4 \text{ }^\circ\text{C/s}$, далі швидкість охолодження на фронті ліквідус змінюється за експоненціальним законом і під час зняття перегрівання центрального об'єму виливка складає $\sim 0,4 \text{ }^\circ\text{C/s}$ (рис. 3). Подальше формування виливка відбувається у двофазному стані, де швидкість охолодження змінюється від $\sim 0,9 \text{ }^\circ\text{C/s}$ у момент утворення твердої кірочки на поверхні виливка до $12\text{--}20 \text{ }^\circ\text{C/s}$ у момент повного тверднення виливка (рис. 4).

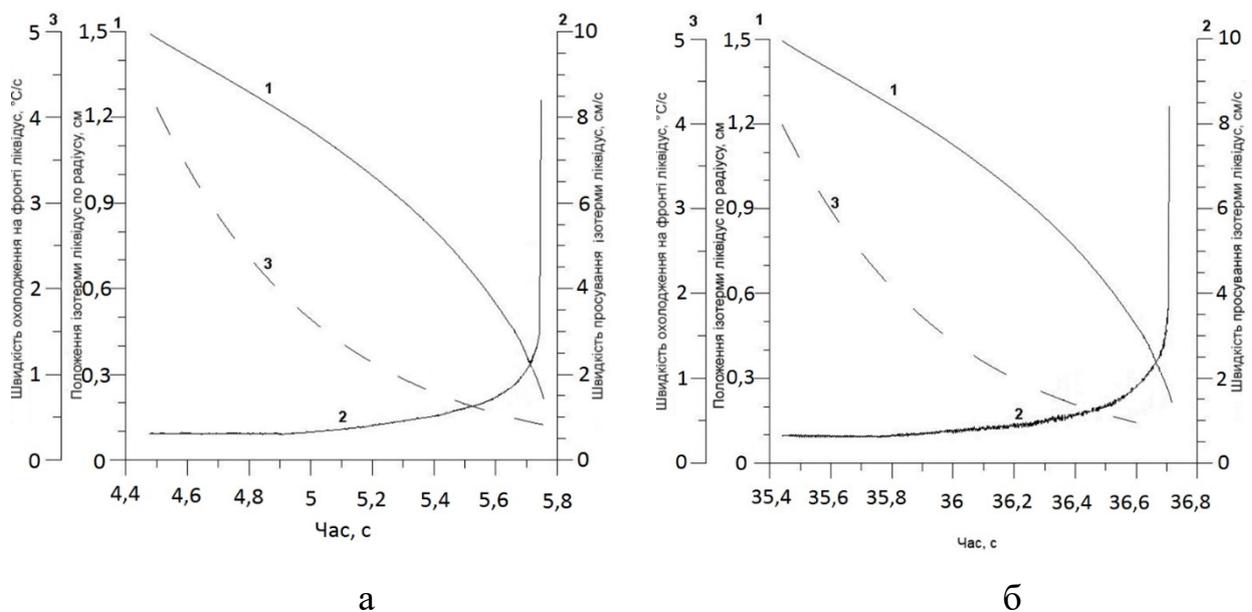


Рис. 3. Кінетика просування ізотерми ліквідус (1), зміна швидкості її просування (2) та швидкості охолодження на фронті ліквідус (3) за температури заливання розплаву $650 \text{ }^\circ\text{C}$ (а) та $900 \text{ }^\circ\text{C}$ (б)

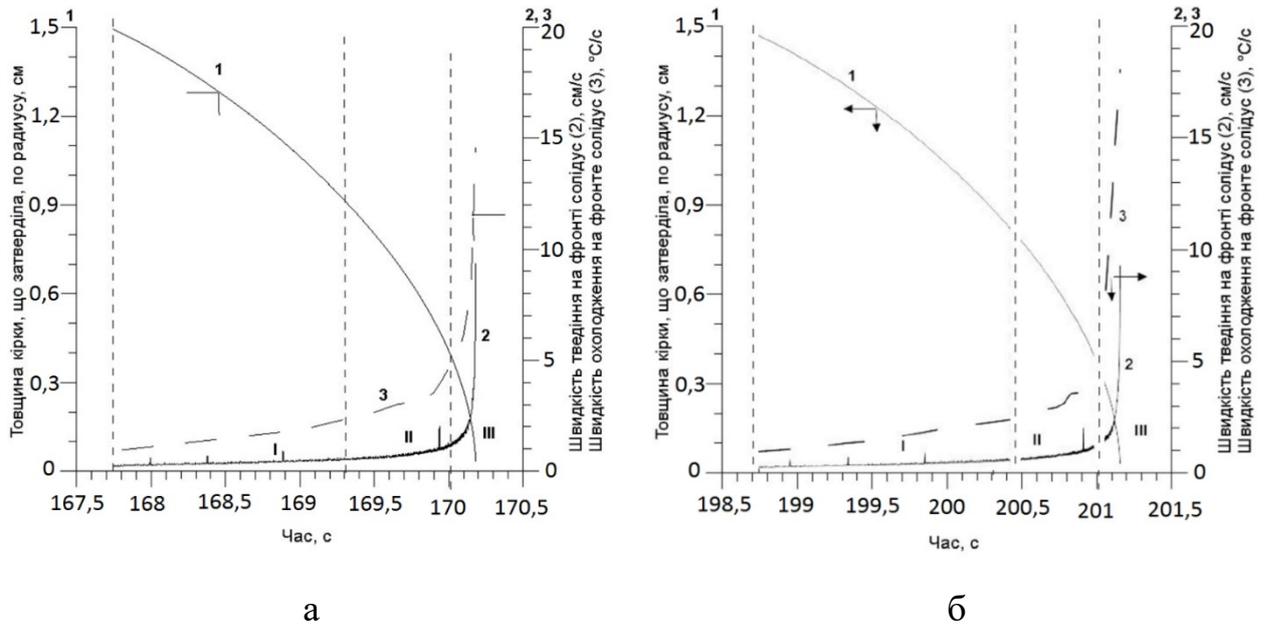


Рис. 4. Кінетика просування ізотерми солідус (1), швидкості твердіння (2) та швидкості охолодження за температури заливання розплаву 650 °C (а) та 900 °C (б)

Аналізуючи зміну параметрів тверднення (швидкості тверднення (см/с) та швидкості охолодження (°C/с), див. рис. 4), по радіусу виливка можна виділити три області, які призводять до зміни структурних зон виливка, який твердне: I $\approx 0,6$ см від поверхні виливка (згідно з прямолінійною ділянкою зростання швидкості тверднення); II – перехідна область розміром близько 0,5 см (параболічна ділянка підвищення швидкості тверднення); III $\approx 0,4$ см центральна частина виливка (ділянка значного збільшення швидкості охолодження). У табл. 3 наведено дані щодо кожної із вказаних ділянок для локальних швидкостей охолодження та тверднення на фронті солідус.

Проведення експериментальних досліджень підтвердило наявність визначених структурних зон по радіусу виливка із сплаву АК5М2, які відрізняються розміром, складом і морфологією структурних складових.

Таблиця 3 – Оцінка структурних зон вилівка із сплаву АК5М2

	Початкова температура розплаву, °С		
	650	750	900
I область			
Момент часу початку твердіння, с	167,75	182,17	198,7
Момент часу закінчення формування I зони, с	169,3	184,0	200,4
Початкова швидкість твердіння, біля бічної поверхні, см/с	0,247	0,18	0,178
Швидкість тверднення в кінці I зони	0,604	0,74	0,654
Початкова швидкість охолодження біля бічної поверхні, °С /с	0,919	0,797	0,894
Швидкість охолодження в кінці I зони, °С /с	2,347	2,402	2,325
Розмір твердої кірочки в момент часу початку тверднення, (за радіусом), см	0,0	0,0	0,0
Розмір твердої кірочки в момент часу закінчення формування I зони, см	0,59	0,731	0,68
II область			
Час початку формування II зони, с	169,3	182,17	198,7
Час закінчення формування II зони, с	170,0	184,5	200,97
Швидкість тверднення, на початку II зони, см/с	0,604	0,74	0,654
Швидкість тверднення, в кінці II зони, см/с	1,237	1,938	1,134
Швидкість охолодження на початку II зони, °С /с	2,347	2,402	2,325
Швидкість охолодження в кінці II зони, °С /с	4,933	5,527	4,772
Розмір твердої кірочки в II зоні, см	0,61	0,456	0,47
III область			
Час початку формування III зони, с	170,0	184,5	200,97
Час повного твердіння, вилівка (закінчення III зони), с	170,182	184,627	201,12
Швидкість твердіння, на початку III зони, см/с	1,237	1,938	1,134
Швидкість твердіння, в кінці III зони, см/с	9,259	10,632	9,24
Швидкість охолодження на початку III зони, °С /с	4,933	5,527	4,772
Швидкість охолодження в кінці III зони, °С /с	14,382	24,43	18,436
Розмір твердої кірочки в III зоні, см	0,3	0,313	0,3



ABSTRACT. The article uses mathematical and computer modeling methods to analyze the influence of the initial temperature of the AK5M2 casting alloy on the conditions of ingot structure formation. The solidification process of a 30 mm diameter casting in a steel mold was studied, with the melt superheat temperature above the liquidus varying from 31 to 131 °C. It was established that the initial metal temperature significantly affects the time the alloy remains in a superheated state, the solidification rate, and the intensity of heat removal. The modeling results allow for predicting the parameters of the casting's structural zones, which is critical for ensuring the required mechanical and operational properties of cast products.

KEYWORDS: mathematical modeling, AK5M2 alloy, superheat temperature, casting structure, solidification rate.