

пропану в насичувальному середовищі (біля 12 %) та тиску в розрядній камері (від 230 Па до 260 Па), при яких поверхнева мікротвердість буде максимальною. При збільшенні вмісту пропану в насичувальному середовищі поверхня зразків покривається сажею, що ускладнює проникнення насичувальних газів в поверхню металу і утворенню зміцненого шару. Для 12ХН3А: вміст пропану – 9 %, тиск – 230...280 Па, а для сталі 40Х вміст пропану – 7...9 %, тиск – 200 Па.

Таким чином знайдені оптимальні значення вмісту пропану в насичувальному середовищі та його тиску при заданій температурі 580 °С для досягнення максимальної поверхневої мікротвердості.

Література

1. Stechyshyn M.S. Physicochemical properties of carbonitrided 40kh steel / M. S. Stechyshyn, M.E. Skyba, N. M. Stechyshyna, O. O. Solariov, O. M. Kalnaguz // Materials Science, Vol. 56, No.6, November-December, 2021.-PP.837-842. (DOI 10.1007/s11003-021-00502-9).

2. Скиба М.Є. Планування експериментальних досліджень процесу карбоазотування в тліючому розряді / М.Є. Скиба, М.С. Стечишин, М.М. Лук'янюк, Н.М. Стечишина, // Проблеми тертя та зношування – К.: НАУ, 2020, №1(86). – С.78-86.

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

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРИ НА ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ ВИЛИВКА ЗІ СПЛАВУ АК5М2

E-mail: adel_nayka@ukr.net

Якість литого виробу, його властивості, в першу чергу, залежать від структури, яка утворюється при переході металу з рідкого в 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 тепловідводу через бічну поверхню, швидкості тверднення та охолодження.

Методами 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 в сталевому кокільі товщиною 0,2 мм. Температуру перегріву (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, використані при обчисленнях, наведено в табл. 1, розміри і загальний вигляд кокілью – на рис. 1.

При моделюванні перенос тепла в системі виливок-кокіль описано рівнянням Фур'є. При постановці задачі для забезпечення спрямованого характеру тверднення циліндричного виливка прийнято припущення щодо ідентичності умов теплообміну по всій поверхні. Враховували залежність теплофізичних характеристик виливка і кокілью від температури. В початковий момент часу задавали температури кокілью і рідкого металу ($T_L + \Delta T$). Для вирішення сформульованої задачі використано чисельний метод кінцевих різниць.

Таблиця 1 – Теплофізичні характеристики матеріалів

Характеристики	Матеріал	
	АК5М2 (вилівок)	14X17H2 (кокіль)
Щільність, кг/м^3	2700	$7680,0_{\square T=600 \text{ }^\circ\text{C}}$ $7790,0_{\square T=400 \text{ }^\circ\text{C}}$
Питома теплоємність, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	838	$84,3_{\square T=600 \text{ }^\circ\text{C}}$ $44,2_{\square T=200 \text{ }^\circ\text{C}}$
Теплопровідність, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	163	22
Теплота фазового переходу, $\text{кДж}/\text{кг}$	500	180
Температура ліквідус, $^\circ\text{C}$	619	
Температура солідус, $^\circ\text{C}$	449	

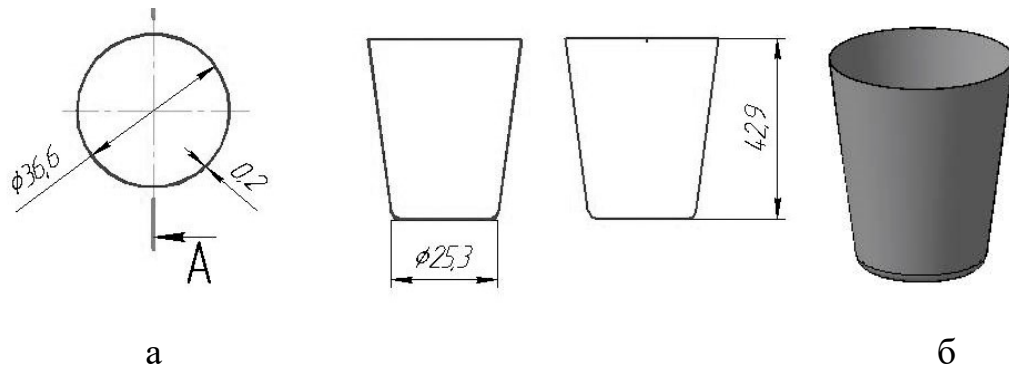


Рис. 1. Розміри (а) та загальний вигляд (б) кокілю

Встановлено (табл. 2), що після зняття перегріву з усього об'єму рідкого металу час знаходження вилівка в двофазному стані ($\Delta\tau_1$), а також інтервал часу від початку формування твердої кірочки до повного тверднення ($\Delta\tau_2$) є інваріантними відносно значень температур перегріву в досліджуваному діапазоні і становлять 162,37 с та 2,42 с відповідно. При збільшенні температури розливання від 650 °С до 900 °С час зняття температури перегріву зі всього об'єму вилівка збільшується з 5,758 с до 36,75 с, що призводить до зростання часу перебування областей вилівка в рідкому стані (рис. 2, кр. 1 та 3). Загальна тривалість тверднення вилівка змінюється з 170,18 с до 201,12 с (див. табл. 2).

Таблиця 2 – Час зняття теплоти перегріву розплаву і повного тверднення вилівка зі сплаву АК5М2 при зміні перегріву відносно температури ліквідус

Початкова температура розплаву, °С (перегрів відносно температури ліквідус, °С)	Час, с				
	зняття перегріву ($\tau_{\text{пер.}}$)	початку тверднення ($\tau_{\text{затв.1}}$)	$\Delta\tau_1 = \tau_{\text{затв.1}} - \tau_{\text{пер.}}$	повного тверднення ($\tau_{\text{затв.}}$)	$\Delta\tau_2 = \tau_{\text{затв.}} - \tau_{\text{затв.1}}$
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

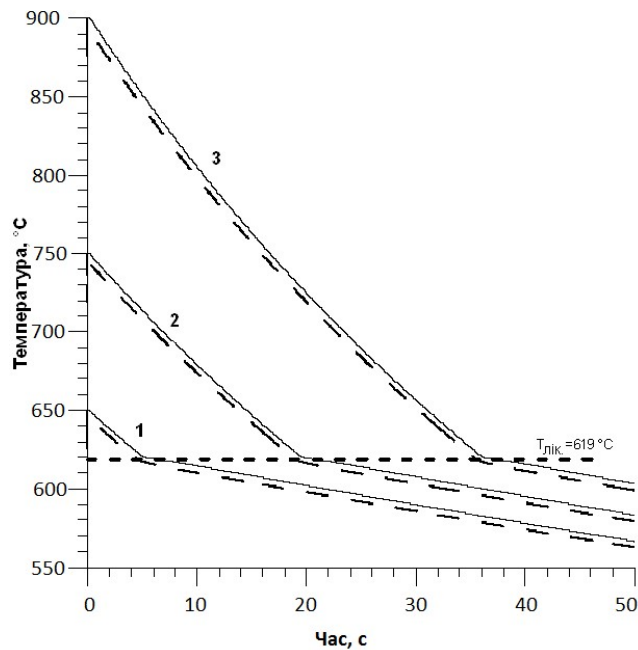


Рис 2 . Зміна температури в центрі (---) та на бічній поверхні (—) виливка залежно від температури заливки: 1 – 650 °C; 2 – 750 °C; 3 – 900 °C

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

– час зняття теплоти перегріву:

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

– час повного твердіння виливка:

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

де ΔT – величина перегріву 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 виливка 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 перегріву.

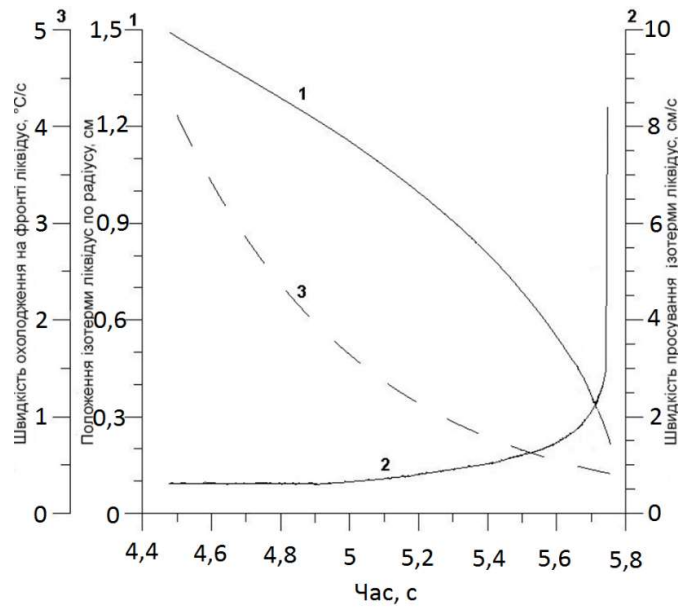
Ураховуючи лінійний характер зниження температури розплаву до температури ліквідус, зумовлений постійною площею охолодження, проведено розрахунки з визначення зміни швидкості охолодження рідкого металу від температури його перегріву до температури ліквідус. Встановлено, що цей процес можна описати рівнянням другого порядку:

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

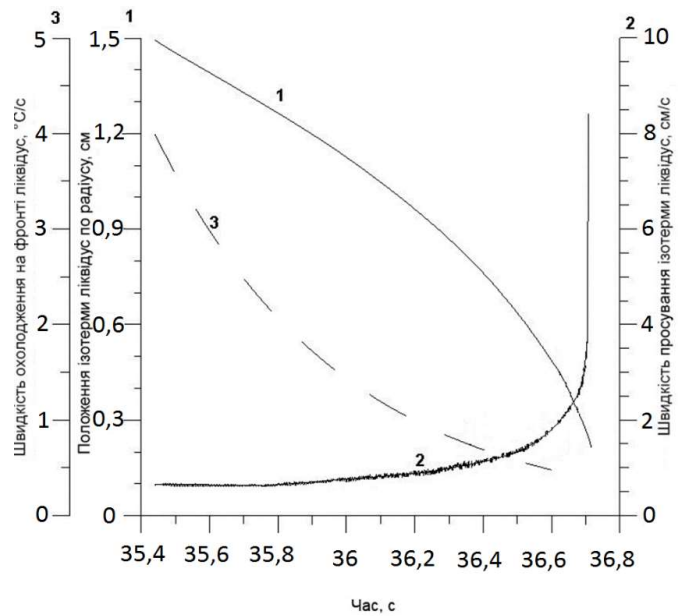
Зміна швидкості охолодження в двофазній зоні також характеризується лінійною залежністю:

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

Визначено, що швидкість охолодження рідкого металу при знятті теплоти перегріву становить біля 4 °C/c, далі швидкість охолодження на фронті ліквідус змінюється за експоненціальним законом і при знятті перегріву центрального об'єму виливка складає ~0,4 °C/c (рис. 3). Подальше формування виливка відбувається в двофазному стані, де швидкість охолодження змінюється від ~0,9 °C/c в момент утворення твердої кірочки на поверхні виливка до 12-20 °C/c в момент повного тверднення виливка (рис. 4).

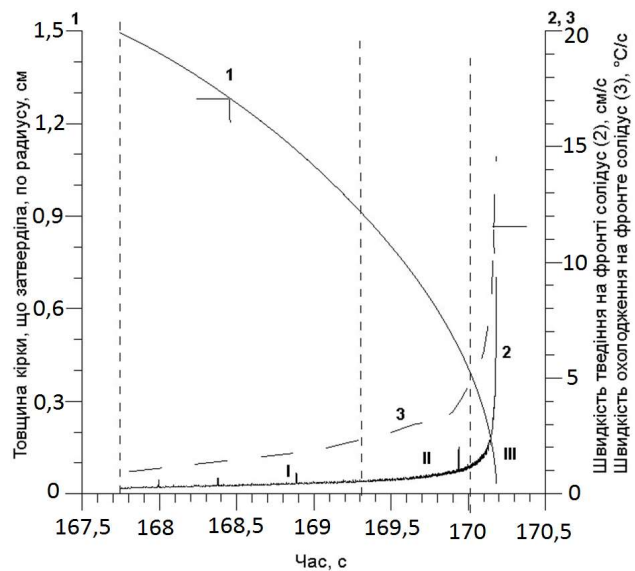


а

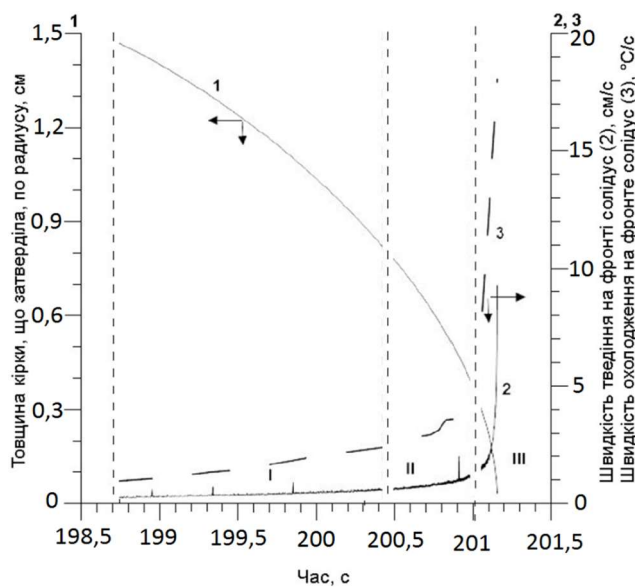


б

Рис. 3. Кінетика просування ізотерми ліквідус (1), зміна швидкості її просування (2) та швидкості охолодження на фронті ліквідус (3) при температурі заливки розплаву 650 °С (а) та 900 °С (б)



а



б

Рис. 4. Кінетика просування ізотерми солідус (1), швидкості тверднення (2) та швидкості охолодження при температурі заливки 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, що 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). В табл. 3 наведено дані щодо кожної з вказаних ділянок для локальних швидкостей охолодження та тверднення на фронті солідус.

Таблиця 3 — Оцінка структурних зон вилівка із сплаву АК5М2

	Початкова температура розплаву, °С		
	650	750	900
I область			
Момент часу початку тверднення, с	167,75	182,17	198,7
Момент часу закінчення формування I зони, с	169,3	184,0	200,4
Початкова швидкість тверднення, біля бічної поверхні, см/с	0,247	0,18	0,178
Швидкість твердіння 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 тверднення, вилівка (закінчення III зони), с	170,182	184,627	201,12
Швидкість тверднення, на початку III зони, см/с	1,237	1,938	1,134
Швидкість тверднення, 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

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