

В.Ю. Селівьорстов, Т.В. Селівьорстова

**ОСОБЛИВОСТІ ДИВЕРСИФІКАЦІЇ СПОСОБІВ  
ВИЗНАЧЕННЯ ТЕРМОЧАСОВИХ ПАРАМЕТРІВ  
ГЕРМЕТИЗАЦІЇ ВИЛИВКА В ЛИВАРНІЙ ФОРМІ ДЛЯ  
ЗДІЙСНЕННЯ ГАЗОДИНАМІЧНОГО ВПЛИВУ**

*Анотація. Представлений опис експериментальних натурних та розрахункових схем для дослідження процесу самогерметизації металу в ливарній формі. Обґрунтована можливість використання інженерного методу розрахунку температурних полів вилівка, що твердіє в об'ємній піщаній формі. Приведено вдосконалене аналітичне рішення Стефана-Шварца для розрахунку температурних полів.*

*Ключові слова: затвердіння, герметизація, розрахунок, температурне поле, розрахункова схема, комп'ютерне моделювання.*

**Вступ**

Одним із шляхів підвищення якості литого металу є використання тиску в процесі кристалізації. Відомо, що найбільш ефективною є передача наростаючого тиску в двофазну зону, особливо наприкінці періоду твердіння [1, 2]. Цим вимогам відповідає розроблена на кафедрі ливарного виробництва НМетАУ технологія газодинамічного впливу на розплав в ливарній формі, що реалізується при використанні газового тиску в діапазоні, переважно, 0,1 - 20 МПа без застосування складного спеціального устаткування, і може бути легко вбудована в діючий технологічний процес [3 – 7].

**Попередні публікації та постановка задачі.** Розроблена технологія може бути реалізованою для всіх найбільш вживаних способів лиття, таких як: лиття в об'ємну піщану форму, лиття в кокіль, лиття по витоплюваним моделям та при виробництві злитків [3, 8 – 10]. Проте, при реалізації технологічного процесу необхідним та дуже важливим етапом є герметизація системи «вилівок-пристрій для введення газу», встановлення термочасових параметрів якого є визначальним для розрахунку режиму здійснення газодинамічного впливу [8,

11]. Тому знаходження та обґрунтування різних шляхів визначення цих параметрів є актуальним завданням.

**Метою роботи** є аналіз результатів експериментальних та теоретичних досліджень за різними схемами процесу герметизації виливків різної маси та конфігурації із різних сплавів, що твердіють в кокілі, а також в об'ємній та оболонковій піщаних формах.

**Результати досліджень.** Для визначення часу, що необхідний для герметизації, використовували експериментальні термоелектричні дослідження, систему комп'ютерного моделювання ливарних процесів (СКМ ЛП) та інженерні методи розрахунку температурного поля вилівка. Зокрема, в результаті проведених натурних експериментів [12, 13] встановили, що тривалість затвердіння в кокілі осьової зони циліндричних виливків масою 160 кг із сталі 35Л складає більше 11 хв., а із сталі Х12Ф1Л – більше 15 хв. (рис.1). На поверхні вилівка формується шар затверділого металу вже через 3 – 4 хвилини (сталь 35Л) і 5 – 6 хвилин (сталь Х12Ф1Л), що дозволяє здійснити процес герметизації системи виливок-пристрій для введення газу з подальшим газодинамічним впливом.

Проведене порівняння результатів розрахунку процесу твердіння в об'ємній піщаній формі кулі та циліндра діаметром 200 мм, а також плити товщиною 200 мм з вуглецевої сталі та алюмінієвого евтектичного сплаву методом скінчених елементів і інженерним методом Стефана-Шварца [14]. Значення максимального відносного відхилення розподілів температур (1), що отримані за результатами розрахунків різними методами (табл. 1), дають можливість обґрунтованого використання аналітичного рішення Стефана-Шварца для побудови температурного поля вилівка.

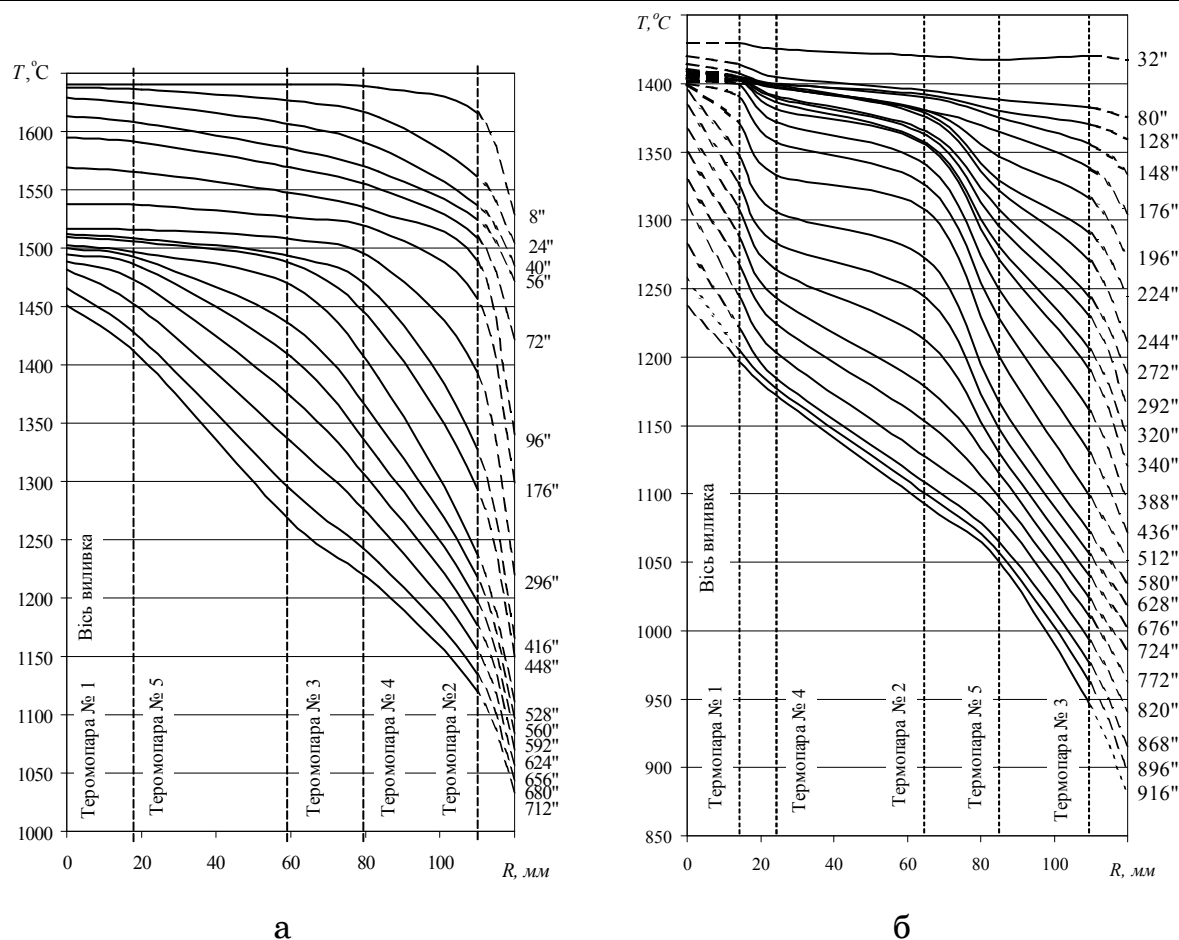


Рисунок 1 - Температурні поля виливків із сталі 35Л через 8 – 712 секунд (а) та із сталі X12Ф1Л через 32 – 916 секунд (б) після закінчення заливки

$$\Delta = \max_{i=1, \dots, n} \left\{ \frac{|T_{i1} - T_{i2}|}{(T_{i1} + T_{i2})/2} 100\% \right\} \quad (1)$$

де  $T_{i1}$  – значення температури в  $i$ -тій точці, отримане із застосуванням інженерного розрахунку Стефана-Шварца за допомогою програмного модуля «SBHeat»,  $T_{i2}$  – значення температури в  $i$ -тій точці, отримане із застосуванням СКМ ЛП «Полігон».

Таблиця 1

Порівняння результатів розрахунків твердіння виливків різної конфігурації інженерним методом і методом скінчених елементів

Матеріал вливка	Максимальне відносне відхилення (%) ізохрон при затвердінні часток приведеної товщини вливка								Відхилення часу затвердіння, %
	для вливка, $x/X$				для форми, $x/X$				
	0,1	0,5	0,9	1	0,1	0,5	0,9	1	
Куля									
Алюмінієвий сплав	0,8	0,6	0,2	0,8	10,2	40,7	41,4	41,6	1,6
Вуглецева сталь	0,2	0,9	1,5	1,9	13,8	45,8	45,9	46,3	0,5
Циліндр									
Алюмінієвий сплав	1,1	0,5	0,2	0,1	26,2	34,8	34,9	34,8	1,9
Вуглецева сталь	0,2	0,7	0,7	0,9	5,5	41,2	40,9	41,6	2,6
Плита									
Алюмінієвий сплав	0,8	0,5	0,3	0,2	9,4	1,3	0,8	0,8	1,8
Вуглецева сталь	1,9	0,3	0,2	0,2	17,1	2,9	0,9	0,7	1,4

При литті в кокіль традиційна постановка задачі Стефана-Шварца не застосовна, оскільки шар фарби на поверхні форми може бути врахований тільки непрямим чином за рахунок коефіцієнту затвердіння і коефіцієнту акумуляції тепла формою, визначення яких при зміні товщини шару фарби можливе експериментальним шляхом, проте, на практиці, це представляє значні труднощі, що призводить до невиправданого ускладнення розрахунку і необхідності реалізації громіздких алгоритмів. Тому розроблена комбінована розрахункова схема, здійснювана таким чином [15]. У відповідності до методики А.Й. Вейника проводиться розрахунок часу твердіння вливка в пофарбованому кокілі (2, 6), що дозволяє визначити коефіцієнт затвердіння (10) з урахуванням товщини шару фарби (3). Потім за формулою М.І. Хворінова розраховується коефіцієнт акумуляції тепла формою (11) та проводиться розрахунок температурних полів по методу Стефана-Шварца (12 – 15).

$$\tau_{неp} = \frac{V_1 \rho_L c_L (T_1 - T_L)}{\beta F_1 (T_1 - T'_{2cp})}, \quad (2)$$

$$\beta = \frac{\lambda_{кр}}{\chi_{кр}}, \quad (3)$$

$$T'_{2cp} = \frac{T'_{2n} + T'_{2к}}{2}, \quad (4)$$

$$T'_{2к} = \frac{V_2 \rho_F c_F T'_{2n} + V_1 \rho_L c_L (T_1 - T_L)}{V_2 \rho_F c_F}, \quad (5)$$

$$\tau_{затв} = \frac{V_1 \rho_L (c_{cp} \Delta T_{кр} + L)}{\beta F_1 (T_L - T''_{2cp})}, \quad (6)$$

$$T''_{2cp} = \frac{T'_{2к} + T''_{2к}}{2}, \quad (7)$$

$$T''_{2к} = \frac{V_2 \rho_F T'_{2к} + V_1 \rho_L c_{ef} (T_L - T_S)}{V_2 \rho_F c_F}, \quad (8)$$

$$c_{ef} = c_{cp} + \frac{L}{\Delta T_{кр}}, \quad (9)$$

де  $\tau_{неp}$  – час відводу теплоти перегріву,  $c$ ;  $\beta$  – умовний коефіцієнт тепловідводу від виливка до форми крізь зазор,  $Вт/м^2K$ ;  $T'_{2cp}$  – середнє значення температури по перетину стінки кокілю за даний проміжок часу,  $K$ ;  $T'_{2к}$  – середнє значення температури по перетину стінки кокілю в кінці стадії відведення теплоти перегріву розплаву,  $K$ ;  $\tau_{затв}$  – час затвердіння виливка,  $c$ ;  $T''_{2cp}$  – середнє значення температури по перетину стінки кокілю впродовж затвердіння виливка,  $K$ ;  $T''_{2к}$  – середнє значення температури по перетину стінки кокілю в кінці стадії затвердіння виливка,  $K$ ;  $c_{ef}$  – ефективна теплоємність матеріалу виливка,  $Дж/кг K$ ;  $L$  – теплота кристалізації сплаву,  $Дж/кг$ ;  $\Delta T_{кр}$  – температурний інтервал кристалізації,  $K$ ;  $V$  – об'єм,  $м^3$ ;  $F$  – площа поверхні,  $м^2$ ;  $\rho$  – щільність,  $кг/м^3$ . Індокси 1 та 2 означають, що величини відносяться відповідно до виливка або кокілю.

$$K = \frac{x}{\sqrt{\tau_{затв} + \tau_{неp}}}, \quad (10)$$

$$b_F = \frac{K \rho_L (L + c_L (T_1 - T_0))}{1,158 (T_0 - T_{F_0})}, \quad (11)$$

$$T_C = \frac{T_O}{1 + \frac{b_F}{b_S} \operatorname{erf}\left(\frac{K}{2\sqrt{a_S}}\right)} \quad (12)$$

$$T_L = (T_O + t) - t \frac{1 - \operatorname{erf}\left(\frac{y}{2\sqrt{a_L\tau}}\right)}{1 - \operatorname{erf}\left(\frac{K}{2\sqrt{a_L}}\right)} \quad (13)$$

$$T_S = T_C + (T_O - T_C) \frac{\operatorname{erf}\left(\frac{y}{2\sqrt{a_S\tau}}\right)}{\operatorname{erf}\left(\frac{K}{2\sqrt{a_S}}\right)} \quad (14)$$

$$T_F = T_C - (T_O - T_{F_0}) \operatorname{erf}\left(\frac{y}{2\sqrt{a_F\tau}}\right) \quad (15)$$

де  $K$  – коефіцієнт затвердіння,  $m/c^{0,5}$ ;  $T_C$  – температура в точці зіткнення вилівка і форми,  $K$ ;  $a$  – температуропровідність,  $m^2/c$ ;  $b_F$  – коефіцієнт акумуляції тепла формою,  $Bm c^{0,5}/m^2 K$ . Індекси  $S$  та  $L$  означають, що величини відносяться відповідно до твердої або рідкої частини вилівка,  $F$  – до форми.

Результати розрахунків часу затвердіння в кокоті фасонного вилівка «Опорний наконечник стійки конвеєра» масою 1,1 кг із сплаву АК5М (рис. 2) методом скінчених елементів (МСЕ) і методом Стефана-Шварца, показали необхідність врахування шару ливарної фарби та ефективність розробленої комбінованої схеми (табл. 2) [15].

## Розрахунковий час затвердіння вилівка

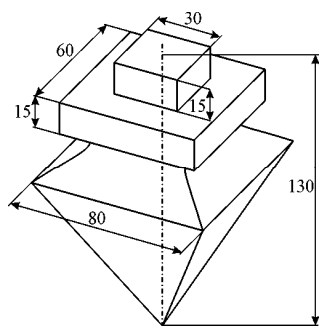


Рисунок 2 - Схема вилівка «Опорний накопечник стійки конвеєра»

Частка приведеної товщини, x/X	Час затвердіння, с		
	по Стефану-Шварцу		МСЕ
	без врахуван- ня шару фар- би	з врахуванням шару фарби	
0,1	0,3	6,1	7
0,3	0,6	13,8	16
0,5	1,8	38,3	40
1,0	7,3	153,1	157

Була здійснена оцінка придатності конструкції блоку ЛВМ для заготовок ріжучого інструменту циліндричної форми із сталі Р18Л за діючою технологією, а також розробка раціональної конструкції блоку для здійснення газодинамічного впливу [9]. Використовували МСЕ в програмній реалізації СКМ ЛП «Полігон». При реалізації традиційної технології до моменту формування затверділого шару на поверхні стояка вилівки опиняються повністю затверділими (рис. 3, а).

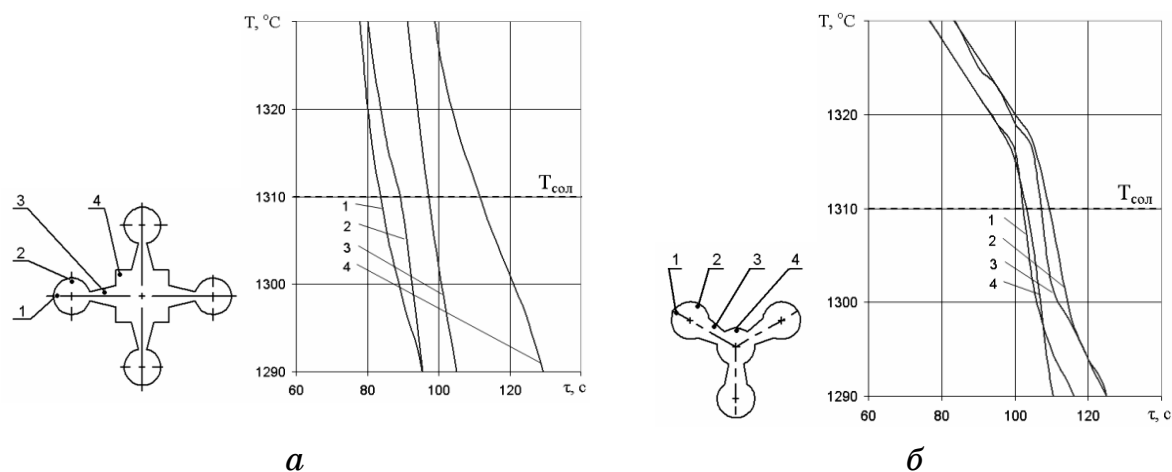


Рисунок 3 - Схема розміщення термопар в перетині блоку та криві охолодження у відповідних місцях: за діючою технологією (а) і зміненої конструкції (б)

При діючій конструкції блоку ЛВМ можна використовувати тільки міцність самої ливарної форми і реалізація технології можлива в діапазоні тиску, переважно, не більше 0,3 МПа. Зближення температурних кривих, одержаних у варіанті зміненої конструкції блоку, показує, що на різних ділянках поверхні блоку герметизуюча скоринка формується практично одночасно, що дозволяє реалізувати

газодинамічний вплив, заснований на відповідності товщини затверділого шару створюваному тиску в системі виливок-пристрій для введення газу.

Процес герметизації є найбільш ефективним в тому випадку, якщо на момент подачі газу в систему виливок-пристрій для введення газу на внутрішній поверхні холодильника, що закриває дзеркало металу, намерзає мінімальна його кількість. Разом з тим, час твердіння розплаву в зазорі між холодильником і бічною поверхнею робочої порожнини ливарної форми повинен бути мінімальним. Особливістю конструкції холодильників (що виготовляються, зазвичай, з того ж матеріалу, що і виливок) є наявність або відсутність вставки із теплоізоляційного матеріалу (рис. 4).

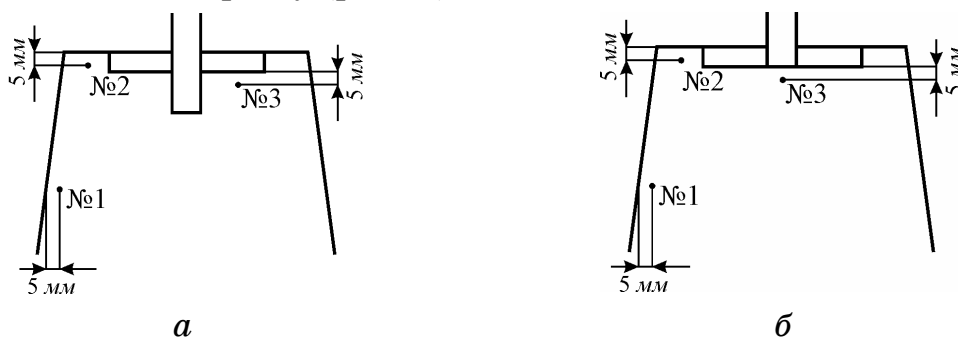


Рисунок 4 - Схема цільнометалевого холодильника (а), корпусного холодильника з утеплювальною вставкою (б) та розташування термопар №№ 1 – 3

Результати розрахунків в СКМ ЛП «Полігон», проведених для виливків із сталей 35Л та Х18Ф1Л, що твердіють в умовах тієї ж ливарної форми, процес твердіння в якій досліджувався раніше термоелектричним методом, показали, що при використанні цільнометалевого холодильника спостерігається мінімальний розрив між кривими охолодження на рівні температури солідус, що свідчить про несприятливе протікання процесу твердіння, на відміну від використання комбінованого холодильника більшого діаметру з утеплювачем (рис. 5). Встановлено збільшення часу твердіння розплаву безпосередньо під холодильником у разі використання в якості утеплювача формувальної суміші на основі золівідходів Придніпровської ТЕС з низьким коефіцієнтом теплопровідності (0,35 Вт/мК). Це дозволяє не тільки знизити непродуктивні втрати металу із-за намерзання на поверхні холодильника, але і поліпшити режим живлення при твердінні вилівка і здійсненні газодинамічного впливу.



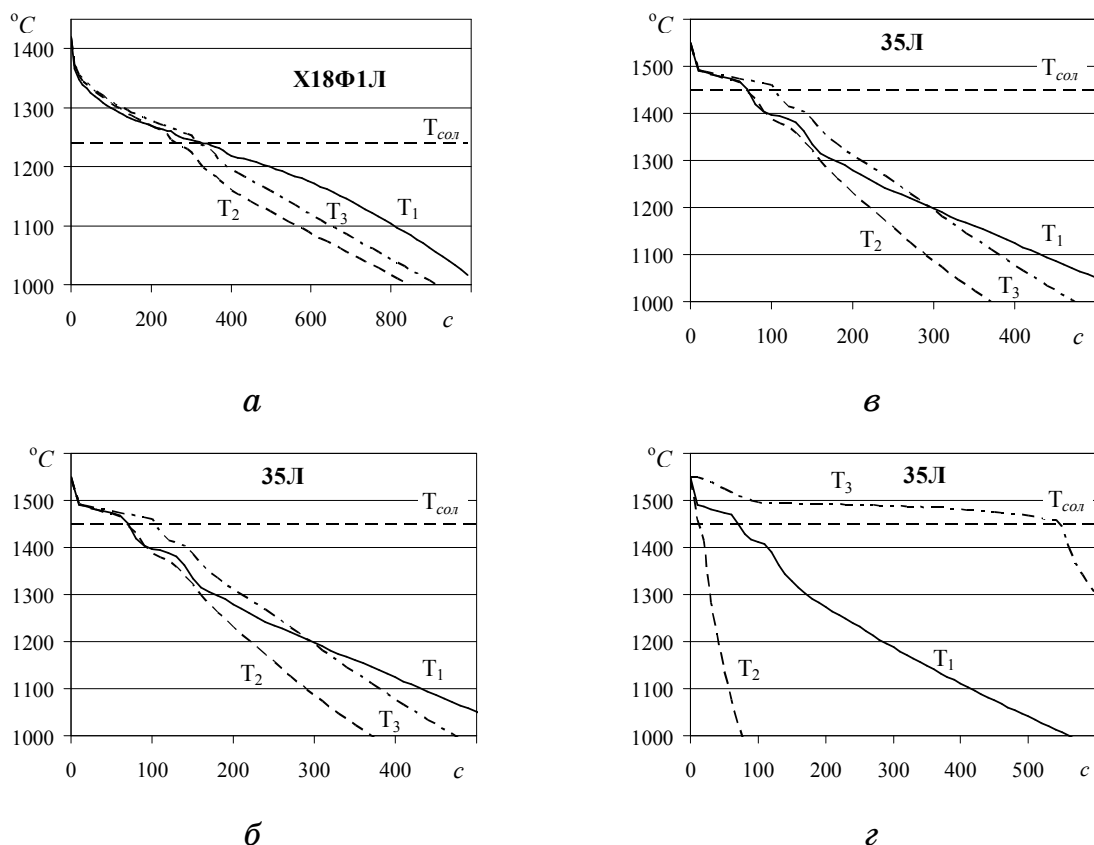


Рисунок 5 - Результати розрахунку процесу твердіння виливків з зовнішнім цільнометалевим (а, в) і комбінованим (б, г) холодильником з утеплювачем із формувальної суміші на основі золовідходів Придніпровської ТЕС в місцях розташування термопар №№ 1 – 3

### Висновки

1. Необхідною передумовою здійснення газодинамічного впливу є можливість герметизації системи виливок-пристрій для введення газу при атмосферному тиску до початку реалізації основного процесу.

2. Визначити час формування герметизуючого шару металу можна за допомогою експериментальних термоелектричних досліджень, систем комп'ютерного моделювання ливарних процесів (СКМ ЛП) та інженерних методів розрахунку температурного поля виливка.

3. Встановлено максимальне відносне відхилення результатів розрахунку розподілу температури у виливках основних конфігураційних типів з вуглецевої сталі та алюмінієвого евтектичного сплаву, що твердіє в об'ємній піщаній формі, методом скінчених елементів і інженерним методом Стефана-Шварца, яке не перевищує 3 % часу повного затвердіння виливка. При необхідності диверсифікації спосо-

бів розрахунку термочасових параметрів герметизації вилівка в об'ємній піщаній формі, це дає можливість обґрунтованого використання аналітичного рішення Стефана-Шварца для побудови температурних полів.

4. Розроблена комбінована схема розрахунку температурних полів вилівка, що включає розрахунок часу твердіння вилівка в пофарбованому неохолоджуваному кокілі згідно методиці А.Й. Вейника з визначенням коефіцієнту затвердіння, що враховує товщину та теплофізичні властивості шару фарби, а також розрахунок коефіцієнту акумуляції тепла формою згідно формулі М.І. Хворінова та температурних полів по методу Стефана-Шварца. Застосування вдосконаленого аналітичного рішення дозволяє коректно врахувати товщину і теплофізичні властивості ливарної фарби на поверхні неохолоджуваного кокілю при розрахунку часу твердіння вилівка.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Борисов Г.П. Давление в управлении литейными процессами /Г.П.Борисов. – Киев.: изд. Наук. Думка, 1988. – 272 с.
2. Ефимов В.А. Физические методы воздействия на процессы затвердевания сплавов /В.А. Ефимов, А.С. Эльдарханов. – М.: Metallurgiya. – 1995. – 272 с.
3. Селиверстов В.Ю. Технология газодинамического воздействия на расплав в литейной форме – один из перспективных способов повышения качества металла отливок // Сучасні проблеми металургії. Наукові праці. 2007. – Том 10. – С. 25 – 35.
4. Пат. 28858 Україна, МПК (2006) В22D 18/00. Спосіб отримання виливків / Селівьорстов В.Ю., Хричиков В.Є., Доценко Ю.В. – № 200708968; заявл.03.08.2007; опубл. 25.12.2007, Бюл.№21.
5. Пат. 28859 Україна, МПК (2006) В22D 18/00. Пристрій для отримання виливків / Селівьорстов В.Ю., Хричиков В.Є., Доценко Ю.В. – № 200708969; заявл.03.08.2007; опубл. 25.12.2007, Бюл.№21.
6. Спосіб отримання виливків [Текст]: Деклараційний патент, Україна МПК (2006) В22D 18/00 / Селівьорстов В.Ю., Хричиков В.Є., Доценко Ю.В. Заявник та патентовласник Національна металургійна академія України – № 200808859; заявл.07.07.2008; опубл. 10.12.2008, Бюл. №23.
7. Пристрій для отримання виливків [Текст]: Деклараційний патент, Україна МПК (2006) В22D 18/00 / Селівьорстов В.Ю., Хричиков В.Є., Доценко Ю.В. Заявник та патентовласник Національна металургійна академія України – № 200808858; заявл. 07.07.2008; опубл. 10.12.2008, Бюл. №23.
8. Селівьорстов В.Ю. Особливості розрахунку газодинамічного впливу на метал, що твердіє в кокілі [Текст]// Теорія і практика металургії. – 2009. - № 1-2. – С. 41 - 45.

9. Селівьорстов В.Ю. Використання технології газодинамічного впливу на розплав при литті по витоплюваним моделям [Текст]/В.Ю. Селівьорстов, П.Д. Куц. //Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ» – 2010. – № 4 – С. 89 – 94.
10. Пат. 55301 Україна, МПК (2009) B22D 18/00. Спосіб для отримання виливків [Текст]/ Селівьорстов В.Ю., Хричиков В.Є., Доценко Ю.В., Куц П.Д., Савега Д.О. № u201006702; заявл. 31.05.2010, опубл. 10.12.2010, Бюл. № 23.
11. Селівьорстов В.Ю. Автоматизоване визначення режиму газодинамічного впливу на розплав в ливарній формі /В.Ю. Селівьорстов, Т.В. Михайловська //Системні технології: Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Дніпропетровськ, 2010. – Вип. 4 (69). – С. 73 – 78.
12. Селиверстов В.Ю., Хрычиков В.Е., Доценко Ю.В. Экспериментальное термографическое исследование затвердевания отливки из стали 35Л в кокиле//Теория и практика металлургии. – 2006.-№6. - С.29-32.
13. Селиверстов В.Ю., Хрычиков В.Е., Доценко Ю.В. Температурное поле процесса затвердевания отливки из стали X12Ф1 в кокиле // Теория и практика металлургии. – 2007. - № 2-3. - С.83-86.
14. Селиверстов В.Ю. Инженерный расчет температурного поля отливки для процесса газодинамического воздействия на расплав в литейной форме // Металлургическая и горнорудная промышленность.–2008.-№6-С.31 – 34.
15. Селиверстов В.Ю. Особенности расчета температурного поля отливки из сплава АК5М, затвердевающей в окрашенном чугунном кокиле // Теория и практика металлургии. – 2008. - № 5-6. – С. 32 - 36.