



УКРАЇНА

(19) UA (11) 44589 (13) U
(51) МПК (2009)
G05B 1/00МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІОПИС
ДО ПАТЕНТУ
НА КОРИСНУ МОДЕЛЬвидається під
відповідальність
власника
патенту

(54) СПОСІБ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ТА ВМІСТУ ЕЛЕМЕНТІВ В БІМЕТАЛЕВОМУ ВИЛИВКУ

1

2

(21) u200903829

(22) 21.04.2009

(24) 12.10.2009

(46) 12.10.2009, Бюл.№ 19, 2009 р.

(72) РОМАНЕНКО ЮРІЙ МИКОЛАЙОВИЧ, АФТА-
НДІЛЯНЦ ЄВГЕНІЙ ГРИГОРОВИЧ, ШИНСЬКИЙ
ІГОР ОЛЕГОВИЧ(73) ФІЗИКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ МЕТА-
ЛІВ ТА СПЛАВІВ НАН УКРАЇНИ

(57) 1. Спосіб моделювання температури та вмісту елементів в біметалевому виливку, який включає задання початкової температури основи та робочого шару, покрокове рішення рівняння теплопровідності і отримання розрахункових значень температур, який **відрізняється** тим, що після отримання у плавильній печі розплавів основи та робочого шару визначають їх хімічний склад, температури заливання у ливарну форму, які приймають, як початкові температури основи та робочого шару, за заздалегідь складеними рівняннями визначають ефективну теплоємність, густину та теплопровідність ділянок виливка, з урахуванням яких вирішують рівняння теплопровідності, визначають розрахункові температури та дифузійну рухливість елементів, значення яких включають в заздалегідь складене рівняння масообміну та ви-

значають вміст елементів в ділянках біметалевого виливку.

2. Спосіб моделювання температури та вмісту елементів в біметалевому виливку за п. 1, який **відрізняється** тим, що рівняння, по якому визначають вміст елементів в ділянках біметалевого виливку, має вигляд:

$$C_x = C_n - (C_n - C_o) \cdot \left(0,08 \left(\frac{x}{2\sqrt{D_n \cdot (\tau_n^{эф} + \Delta\tau_n)}} \right)^3 - 0,57 \cdot \left(\frac{x}{2\sqrt{D_n \cdot (\tau_n^{эф} + \Delta\tau_n)}} \right)^2 + 1,32 \left(\frac{x}{2\sqrt{D_n \cdot (\tau_n^{эф} + \Delta\tau_n)}} \right) \right),$$

де C_n - концентрація i-го елемента на поверхні контакту основи і робочого шару;

C_o - вихідна концентрація i-го елемента в основі або робочому шарі;

C_x - концентрація i-го елемента на відстані x від поверхні контакту основи та робочого шару; t - час дифузії;

D_n - коефіцієнт дифузії i-го елемента;

$\tau_n^{эф}$ - ефективний час дифузії;

$\Delta\tau_n$ - час дифузії на n-ому етапі

.

Корисна модель відноситься до галузі машинобудування, а саме до ливарного виробництва, зокрема до способів моделювання процесів, що відбуваються при виготовленні біметалевих виливків і може бути використана для вивчення теплофізичних і масообмінних процесів з метою дослідження й оптимізації технології виготовлення біметалевих і багатошарових виливків.

Відома установка для моделювання процесів одержання біметалевих і багатошарових виливків, яка має дві незалежні ливникові системи з змінними проміжними реакційними камерами та прозору модель ливарної форми, яка має змінні нижній піддон і торцеві стінки, що моделюють охолоджувані бічні поверхні виливка (Патент UA №20296). Спостерігаючи за картиною, яка моделюється і реєструючи за допомогою кіно, фото або відео зйомки процеси і явища, що протікають у фізичній

моделі на всіх стадіях виготовлення біметалевого виливка з модельного матеріалу, можна змінюючи керовані параметри ливникової системи, характеру і властивостей добавок, температурно-часових параметрів надходження моделюючої рідини, часу витримки між заливками та іншим, домагатися оптимальних умов взаємодії добавок з моделюючою рідиною, заповнення форми розплавом та його твердіння, засвоєння речовини добавок і необхідного розподілу їх в об'ємі виливка.

Але за допомогою відомої установки (Патент UA №20296) неможливо отримати інформацію щодо температури та розподілу елементів в перехідній зоні між основою та робочим шаром біметалевих і багатошарових виливків.

Відомий спосіб вимірювання температури, який ґрунтується на тому що, у якості перетворювача напруги в частоту використовують спеціальні

(13) U

(11) 44589

(19) UA

зовану мікросхему перетворювача 531ГГ1, для посилення сигналів термопар використовують операційний підсилювач К140УД8, для отримання інформації по багатьом каналам - аналогові комутатори К590КН6, а для сполучення з шиною комп'ютера - мікросхему паралельного периферійного адаптера 580ВВ55 і мікросхеми об'ємлення серії 555 (Патент RU №2007 105 486, G01K 7/02).

Проте визначення величин температури і часу контакту робочого шару і основи не достатньо для моделювання і розрахунку розподілу легючих елементів в перехідній зоні між основою та робочим шаром біметалевих і багатошарових виливків.

Найбільш близьким по технічній сутності і результату, що досягається, є спосіб моделювання для металу, що містить залізо як основний компонент, в якому задають початкову температуру металу, яка зареєстрована вимірювальним органом до впливу на метал і початковий вміст фаз, в яких метал є, визначають вільні ентальпії Гіббса фаз металу, покроково вирішують рівняння теплопровідності і перетворення металу з першої фази в другу фазу, і визначають очікувані температуру металу, швидкість перетворення фаз і вміст фаз в яких метал присутній (Прототип - патент RU №2 317 577 C2, G05B 1/00).

Недоліком відомого способу (прототипу) є велика помилка при визначенні температури біметалевого виливка, оскільки відомим способом неможливо визначення температури металу при відсутності перетворень, наприклад, протягом витримки у випадках, коли робочий шар біметалевого виливка знаходиться у рідкому стані, а основа біметалевого виливка знаходиться у твердому стані, або коли основа та робочий шар біметалевого виливка знаходяться у твердому аустенітному або ферит - карбідному стані.

Визначення ентальпії Гіббса багатокомпонентних систем на основі заліза, наприклад сталей і чавунів, є складною практичною та теоретичною проблемою. Для експериментального визначення ентальпії Гіббса багато компонентних систем на основі заліза потрібне складне обладнання.

Теоретичний розрахунок ентальпії Гіббса багато компонентних систем, на основі заліза, пов'язаний з великою помилкою розрахунків. Це пов'язано з тим, що ентальпія Гіббса (ΔH_i) залежить від

температури (Т) та активності (γ_i) [Григорян В.А., Беянчиков Л.Н., Стомахин А.Я. Теоретические основы электросталеплавильных процессов. М.: Металлургия, 1987.-с.272]

$$\Delta H_i = RT \ln \gamma_i, \quad (1)$$

де R - універсальна газова постійна.

Активність (γ_i), в свою чергу, залежить від параметрів взаємодії елементів в багатокомпонентних системах, значення яких за різними джерелами відрізняються від 20-30% до 800-18000%, а також може бути вказано різний напрямок дії [Балковой О.В., Алеев Р.А., Баканов В.К. Параметры взаимодействия первого порядка в расплавах на основе железа. - М: Черметинформация, 1987.-с.42].

Крім того, відомим способом (прототипом) неможливо визначити перерозподіл елементів у основі та робочому шарі на протязі формування біметалевих виливків, тому що вміст фаз в сплавах на основі заліза (ферит, цементит, перліт, аустеніт, ледебурит) не відповідає вмісту в цих фазах елементів (C, Si, Mn, Cr, Ni, Mo та інші).

Метою корисної моделі є моделювання вмісту елементів та зменшення помилки визначення температури біметалевих виливків.

Вказана мета досягається тим, що у способі моделювання температури та вмісту елементів в біметалевому виливку, що включає завдання початкової температури основи та робочого шару, покроково вирішення рівняння теплопровідності і отримання розрахункових значень температур, згідно з корисною моделлю, після отримання у плавильній печі розплавів основи та робочого шару визначають їх хімічний склад та температури заливання у ливарну форму, які приймають як початкові температури основи та робочого шару, за заздалегідь складеними рівняннями визначають ефективну теплоємність, густину та теплопровідність ділянок виливка, з урахуванням яких вирішують рівняння теплопровідності, визначають розрахункові температури та дифузійну рухливість елементів, значення яких включають в заздалегідь складене рівняння масообміну та визначають вміст елементів в ділянках біметалевого виливка.

Рівняння по якому визначають вміст елементів в ділянках біметалевих виливків має вигляд

$$C_x = C_n - (C_n - C_0) \cdot 0,08 \left(\frac{x}{2\sqrt{D_n \cdot (\tau_n^{\text{эф}} + \Delta\tau_n)}} \right)^3 - 0,57 \cdot \left(\frac{x}{2\sqrt{D_n \cdot (\tau_n^{\text{эф}} + \Delta\tau_n)}} \right)^2 + 1,32 \cdot \left(\frac{x}{2\sqrt{D_n \cdot (\tau_n^{\text{эф}} + \Delta\tau_n)}} \right) \quad (2)$$

де C_n - концентрація і-го елемента на поверхні контакту основи і робочого шару;

C_0 - вихідна концентрація і-го елемента в основі або робочому шарі;

C_x - концентрація і-го елемента на відстані x від поверхні контакту основи та робочого шару;

τ - час дифузії; D_n - коефіцієнт дифузії i -го елементу; $\tau_{\text{эф}}$ - ефективний час дифузії; $\Delta\tau_n$ - час дифузії на n -ому етапі.

Для зменшення помилки визначення температури, рівняння теплопровідності яке введено в прототипі (патент RU №2 317 577 C2, G05B 1/00)

$$\frac{\partial H}{\partial t} - \text{div} \left[\frac{\lambda(H, p1, p2)}{\rho} \cdot \text{grad} T(H, p1, p2) \right] = q \quad (3)$$

записали у вигляді рівняння, яке, з умови рівності теплових потоків (фіг. 1) має наступний вигляд:

- для тривимірного випадку

$$\rho \cdot c_{\text{эф}} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (4)$$

- для двовимірного випадку

$$\rho \cdot c_{\text{эф}} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (5)$$

де $c_{\text{эф}}$ - ефективна теплоємність, що враховує

фазові перетворення $\left(c_{\text{эф}} = c + \frac{L}{T_{\text{л}} - T_{\text{с}}} \right)$; ρ - густина; λ - теплопровідність; T - температура, °C; τ - час; c - теплоємність; L - теплота кристалізації; $T_{\text{л}}$ - температура ліквідує, °C; $T_{\text{с}}$ - температура солідус, °C.

Для чисельного інтегрування рівняння 5, прийняли схему збереження теплових потоків для елементарного малого кінцевого елемента сформованого в околиці вузла Р (Фіг.2) і склали рівняння теплового балансу, яке має наступний вигляд

$$\frac{\rho \cdot c \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot (T_{\text{Р}} - T_{0\text{Р}})}{\Delta \tau} = \lambda_1 \frac{T_1 - T_{\text{Р}}}{\Delta x} + \lambda_2 \frac{T_2 - T_{\text{Р}}}{\Delta y} - \lambda_3 \frac{T_3 - T_{\text{Р}}}{\Delta x} - \lambda_4 \frac{T_4 - T_{\text{Р}}}{\Delta y} \quad (6)$$

де $T_{0\text{Р}}$ - початкова температура вузла, °C; $T_{\text{Р}}$ - кінцева температура вузла, °C.

Від сусідніх по відношенню до вузла Р елементів за рахунок теплопровідності надходять потоки теплоти. В результаті відбувається збільшення теплової енергії в даному елементі, що буде відображено у підвищенні його температури за час $\Delta\tau$.

$$T_{\text{пс}} = \frac{T_{\text{PC1}} + T_{\text{O1}}}{2} = \frac{1}{2} \left(\left(\lambda_{\text{O}} \frac{T_{\text{O2}}^0 - T_{\text{O1}}^0}{\Delta x} - \lambda_{\text{O}} \frac{T_{\text{O1}}^0 - T_{\text{PC}}^0}{\Delta x} \right) \frac{\Delta \tau}{\rho_{\text{O1}} c_{\text{O1}} \Delta x} + T_{\text{O1}}^0 \right) + \frac{1}{2} \left(\left(\lambda_{\text{PC}} \frac{T_{\text{O1}}^0 - T_{\text{PC1}}^0}{\Delta x} - \lambda_{\text{PC}} \frac{T_{\text{PC1}}^0 - T_{\text{PC2}}^0}{\Delta x} \right) \frac{\Delta \tau}{\rho_{\text{PC1}} c_{\text{PC1}} \Delta x} + T_{\text{PC1}}^0 \right) \quad (8)$$

Рівняння 6, 8 показують, що для розрахунку температур довільних локальних ділянок в об'ємі (рівняння 6) і на поверхні контакту основи і робочого шару (рівняння 8) біметалевих виливків необхідна інформація про теплопровідність, теплоємність і густину цих локальних ділянок, які суттєво залежать від їх хімічного складу і температури. Їх можна отримати, як в результаті експерименталь-

Слід зазначити, що температура $T_{\text{Р}}$ в центральному елементі і температури T_1, T_2, T_3 і T_4 в оточуючих вузлах - невідомі величини на наступному часовому кроці, тоді як $T_{0\text{Р}}$ - відома величина, яка взята з попереднього кроку за часом або з початкових умов. Тому рівняння 6 є рівнянням з п'ятьма невідомими. Всього таких рівнянь можна записати стільки, скільки є невідомих температур у вузлах сітки. Для знаходження температур необхідно вирішити систему рівнянь.

Якщо в рівнянні 6 різниці температур в другому, третьому, четвертому і п'ятому операторах теплопровідності записати для попереднього часового кроку і позначити «0», то має місце явна схема: в кожному рівнянні міститиметься одне єдине невідоме значення $T_{\text{Р}}$ в першому операторі, що описує зміну теплової енергії елемента в часі. Алгоритм обчислень в цьому випадку не представляє особливої складності, проте якщо часовий крок перевищить деяке критичне значення при розрахунку то виникнуть прогресуючі паразитні осциляції розрахованого температурного поля. Для їх запобігання необхідне задоволення умови збіжності

$$\Delta \tau \leq \frac{\rho \cdot c \cdot \Delta x \cdot \Delta y}{\lambda \cdot N} \quad (7)$$

де N - відношення початкової температури системи до її зміни за час $\Delta\tau$ (приймається ≥ 100).

Описана методика розрахунку є однією з реалізацій явної схеми методу кінцевих елементів і більш детально висловлена в роботі [Поттер Д. Вычислительные методы в физике. - М.: Наука, 1978. - 392с].

Формула 6 приведена для вказаного на Фіг.2 елемента, проте виведене співвідношення розповсюджується на будь-який елемент.

Аналогічним чином визначили рівняння зміни температури перехідного шару ($T_{\text{пш}}$) зони контакту матеріалу основи і робочого шару. Схема визначення температури показана на Фіг.3. Рівняння зміни температури перехідного шару, зони контакту матеріалу основи і робочого шару, має наступний вигляд

ного визначення, так і в результаті аналізу рівнянь регресії побудованих за відомими даними.

Дослідженнями встановлено, що для матеріалів основи та робочого шару закономірності впливу їх хімічного складу і температури на теплопровідність, теплоємність і густину мають наступний вигляд:

1. Теплопровідність в твердому і рідкому ста-
нах: 1.1. Вуглецеві і низьколеговані сталі

$$\lambda = 62,9 - 39,55 \cdot C - 6,021 \cdot \text{Mn} + 2,677 \cdot \text{Si} - 2,027 \cdot \text{Cr} + 1580 \cdot \text{S} - 1180 \cdot \text{P} - 49,82 \cdot \text{Cu} - 0,5754 \cdot \text{Ni} + 13,54 \cdot \text{Mo} - 60,20 \cdot \text{Ti} - 41,99 \cdot \text{V} - 0,02018 \cdot t; \text{Вт/(м} \cdot \text{°C)}, \quad (9)$$

$\delta = 8.20\%$; $R = 0.833$;

1.2. Сірі чавуни

$$\lambda = 29,9 + 25,12 \cdot C + 2,688 \cdot Si - 22,88 \cdot Mn - (10),$$

$$14,47 \cdot C_3 - 0,008449 \cdot t; \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)},$$

$\delta = 2.79\%$. $R = 0.919$.

1.3. Леговані чавуни

$$\lambda = 53,1 - 0,4397 \cdot Cr - 7,073 \cdot S + 219,9 \cdot P +$$

$$6,159 \cdot Mo - 2,027 \cdot Al - 5,227 \cdot C_3 - 0,01016 \cdot t; \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)},$$

$$\delta = 12.9\%. R = 0.739, \quad (11).$$

2. Теплоємність:

2.1. Сірі чавуни:

- в твердому стані

$$C = (-499 + 194,8 \cdot C_3 + 0,5596 \cdot t) \cdot (1 + (6 \cdot 10^{-06} \cdot t - 0,0041) \cdot Cr + (-7 \cdot 10^{-06} \cdot t + 0,004) \cdot Ni - 0,141 \cdot Mn - 0,123 \cdot Mo), \quad (15).$$

2.3. Вуглецеві і низьколеговані сталі:

- в твердому стані

$$C = 529 + 44,71 \cdot C_3 + 0,2598 \cdot t - 2811 \cdot S + (16).$$

28,59 · Mo - 520,7 · Ti,

- в рідкому стані

$$C = 646,3 + 54,62 \cdot C_3 + 0,3174 \cdot t - 3434 \cdot S +$$

$$34,93 \cdot Mo - 636,2 \cdot Ti, \quad (17).$$

3. Густина:

Сірі чавуни:

- в твердому стані

$$\rho = 7,63 - 0,08707 \cdot C_3 - 0,0003876 \cdot t; \text{ г/см}^3, \quad \delta = 1.43\%; R = 0.817, \quad (18).$$

- в рідкому стані

$$\rho = 8,14 + 0,01656 \cdot C_3 - 0,001059 \cdot t; \text{ г/см}^3, \quad \delta = 1.22\%; R = 0.819, \quad (19).$$

Леговані чавуни:

- в твердому стані

$$\rho = 7,95 + 0,06405 \cdot Mo + 0,08151 \cdot Ti - 0,1161 \cdot C_3 -$$

$$0,0005621 \cdot t; \text{ г/см}^3, \quad (20).$$

$\delta = 1.84\%$. $R = 0.878$.

- в рідкому стані

$$\rho = 8,69 - 0,09435 \cdot C + 0,02544 \cdot Mn + 0,2075 \cdot S +$$

$$0,08733 \cdot Mo + 0,02770 \cdot Ni + 0,05513 \cdot Ti - 0,04189 \cdot$$

$$C_3 - 0,001072 \cdot t; \text{ г/см}^3, \quad \delta = 1.42\%. R = 0.896, \quad (21).$$

Вуглецеві і низьколеговані сталі:

- в твердому стані

$$\rho = 7,95 - 0,3016 \cdot C + 0,05887 \cdot Si - 0,01565 \cdot Mn +$$

$$0,1183 \cdot Cr - 0,1872 \cdot M - 0,4218 \cdot Mo - 0,0002720 \cdot t;$$

$$\text{ г/см}^3,$$

$\delta = 1.25\%$; $R = 0.778, \quad (22).$

- в рідкому стані

$$\rho = 8,55 - 0,1167 \cdot C - 0,1108 \cdot Si + 0,1751 \cdot Mn -$$

$$0,06655 \cdot S + 0,07423 \cdot P + 0,01313 \cdot Cr + 0,03335 \cdot Ni + 0,33$$

$$33 \cdot Ti + 0,05334 \cdot Mo - 0,001032 \cdot t; \text{ г/см}^3, \quad (23)$$

$\delta = 1.20\%$. $R = 0.736$.

де C_3 - вуглецевий еквівалент чавуну;

C, Si, Mn, S, P, Cr, Ni, Ti, Mo - вміст елементів в матеріалі основи і робочого шару, мас. %;

t - температура, $^\circ\text{C}$.

δ - середня відносна помилка апроксимації, %;

R - множинний коефіцієнт кореляції.

$$C = 661 - 153,7 \cdot C_3 + 0,6573 \cdot t, \quad \delta = 0.39\%. \quad (1)$$

$$R = 0.993, \quad (2).$$

- в рідкому стані

$$C = -499 + 194,8 \cdot C_3 + 0,5596 \cdot t, \quad \delta = 0.32\%, \quad (13).$$

$$R = 0.996,$$

2.2. Леговані чавуни:

- в твердому стані

$$C = (661 - 153,7 \cdot C_3 + 0,6573 \cdot t) \cdot (1 + (610^{-06} \cdot t -$$

$$0,0041) \cdot Cr + (-7 \cdot 10^{-06} \cdot t + 0,004) \cdot Ni - (14).$$

$$0,141 \cdot Mn - 0,123 \cdot Mo),$$

- в рідкому стані

Використання при розрахунках вищенаведених закономірностей є більш переважним, ніж експериментальне визначення, оскільки дозволяє прискорити та зменшити вартість процесу визначення значень теплопровідності, теплоємності та густини будь яких сплавів основи та робочого шару.

Встановлені закономірності впливу хімічного складу і температури на теплопровідність, теплоємність і густину сплавів основи і робочого шару, в рідкому і твердому станах дають можливість прискорити і підвищити точність розрахунків температурних полів біметалевих виливків, зокрема зміну температури контактної поверхні основи і робочого шару.

Розрахунок температурних полів є необхідною, але недостатньою умовою для визначення вмісту елементів і аналізу їх розподілу в різних ділянках біметалевих виливків.

Відомо [Ван Флек Л. Теоретическое и прикладное материаловедение. Атомиздат. М.: 1975.- с. 472], що при неоднорідній концентрації i-го елемента його перерозподіл в напівнескінченній пластині відбувається по наступній залежності

$$\frac{C_n - C_x}{C_n - C_0} = \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot \tau}}\right), \quad (24)$$

де C_n - концентрація i-го елемента на поверхні пластини; C_0 - вихідна концентрація i-го елемента в пластині; C_x - концентрація i-го елемента на відстані x від поверхні; τ - час процесу; D - коефіцієнт дифузії i-го елемента в пластині; erf - функція помилок Гауса. Концентрація в точці x буде рівна

$$C_x = C_n - (C_n - C_0) \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot \tau}}\right), \quad (25).$$

Для розрахунку товщини перехідного (дифузійного) шару, при багатостадійному процесі дифузії, на кожній стадії якого змінюється температура, і як наслідок коефіцієнт дифузії, можливе використання наступного підходу.

Спочатку використовується лінійне наближення зміни концентрації елемента у перехідному шарі, для якого функція помилок також матиме лінійний вигляд в межах перехідного (дифузійного) шару. При цьому на межі дифузійного шару, що

рухається, концентрація елементу який дифундує приймається рівною C_0 і лінійно зростає до C_n на зовнішній межі дифузійного шару. Якщо прийняти, що межа дифузійного шару, що рухається, відповідає концентрації C_0 при функції помилок $\text{erf} = 0,999 \approx 1$ і значенні її аргументу $\approx 2,33$ то тангенс кута нахилу функції помилок при її лінійній інтерполяції (а) буде дорівнювати 0,42876. Рівняння (25) прийме вигляд

$$x = \frac{2\sqrt{D \cdot \Delta\tau}}{a} \approx 4,66 \cdot \sqrt{D \cdot \Delta\tau} \quad (26)$$

де D - коефіцієнт дифузії; $\Delta\tau$ - час дифузії; $a = 0,42876$.

Для знаходження товщини перехідного шару на першій стадії процесу дифузії справедлива формула (26). Для подальших стадій необхідно попередньо розраховувати ефективний час дифузії ($\tau_n^{\text{эф}}$)

$$\tau_n^{\text{эф}} = \frac{1}{D_n} \cdot \left(\frac{a \cdot x_{n-1}}{2} \right)^2 \quad (27)$$

де D_n - коефіцієнт дифузії на n -ній стадії процесу; x_{n-1} - розмір перехідного (дифузійного) шару на попередній стадії процесу.

$$C_x = C_n - (C_n - C_0) \cdot \text{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_n \cdot (\tau_n^{\text{эф}} + \Delta\tau_n)}} \right) = C_n - (C_n - C_0) \cdot \left(0,08 \left(\frac{x}{2\sqrt{D_n \cdot (\tau_n^{\text{эф}} + \Delta\tau_n)}} \right)^3 - 0,569 \cdot \left(\frac{x}{2\sqrt{D_n \cdot (\tau_n^{\text{эф}} + \Delta\tau_n)}} \right)^2 + 1,3198 \left(\frac{x}{2\sqrt{D_n \cdot (\tau_n^{\text{эф}} + \Delta\tau_n)}} \right) \right) \quad (31).$$

Рівняння 31 дає можливість визначати вміст елементів в довільних локальних об'ємах, тобто розподіл у виливку, залежно від температури, їх початкового вмісту і коефіцієнтів дифузії, які визначаються типом елементу, хімічним складом розлину і температурою.

Відомо [Ван Флек Л. Теоретическое и прикладное материаловедение. Атомиздат. М: 1975.- с. 472], що дифузія елементів визначається наступним рівнянням

$$\ln D = \ln D_0 - Q/(RT), \quad (32)$$

де D_0 - поперед експоненціальний множник, $\text{м}^2/\text{с}$;

Q - енергія активації процесу дифузії, Дж/моль;
 R - універсальна газова стала, Дж/(моль·К).

Дослідженнями встановлено, що для матеріалів, які використовують для основи та робочого шару біметалевих виливків, закономірності впливу хімічного складу і температури на дифузію елементів виражаються залежностями, приведеними в таблиці 1.

Запропонований спосіб реалізується таким чином. Після розплавлення у плавильній печі матеріалів сталюї основи та чавунного робочого шару визначають їх хімічний склад, а перед випуском розплавів з печі - температури їх заливання у ливарну форму, які приймають як початкові температури основи та робочого шару. Значення вмі-

стотина перехідного шару в кінці чергової стадії знаходиться по знайденому ефективному часу дифузії

$$x_n = \frac{2\sqrt{D_n \cdot (\tau_n^{\text{эф}} + \Delta\tau_n)}}{\text{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot \tau}} \right)}, \quad (28)$$

Величина $\text{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot \tau}} \right)$ є функцією помилок Гауса, табличні значення якої приведені в роботі [Ван Флек Л. Теоретическое и прикладное материаловедение. Атомиздат. М: 1975.- с. 472]. Кореляційний аналіз значень функції помилок показав, що з вірогідністю 99,9% її можна апроксимувати наступною формулою

$$\text{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot \tau}} \right) = 0,08 \left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot \tau}} \right)^3 - 0,569 \cdot \left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot \tau}} \right)^2 + 1,3198 \left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot \tau}} \right) \quad (29)$$

$$r_p^{10} = 0,9997 \geq r_{кр}^{10} = 0,8721$$

З урахуванням формули 29 рівняння 25 можна записати в наступному вигляді

$$\frac{C_n - C_x}{C_n - C_0} = 0,08 \left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot \tau}} \right)^3 - 0,569 \cdot \left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot \tau}} \right)^2 + 1,3198 \left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot \tau}} \right) \quad (30),$$

а розподіл концентрації елементу в наслідок дифузії, в кінці кожної стадії визначати по формулі

сту елементів та температури включають в рівняння 9 - 23 і визначають ефективну теплоємність, густину та теплопровідність, значення яких для всіх точок виливка включають в рівняння теплопровідності 6 та 8, які покроково вирішують і розраховують температури всіх ділянок біметалевого виливка та перехідного шару. Після цього за рівняннями, наведеними в таблиці 1, визначають дифузійні рухливості елементів, значення яких включають в рівняння 31 та визначають вміст елементів у зазначених ділянках біметалевого виливку.

Приклад реалізації способу.

В першій індукційній плавильній печі ICT-016 виготовляли сталь для отримання основи, а в другій плавильній печі ICT-016 виготовляли чавун для отримання робочого шару біметалевого молотка. Після отримання у плавильних печах розплавів сталі та чавуну з печей брали проби для визначення хімічного складу розплавів, відповідно до ГОСТ 7565 - 81, ГОСТ 12344 -78, ГОСТ 12365 - 84.

Хімічний склад основи та робочого шару біметалевого молотка приведено в таблиці 2.

Після визначення хімічного складу розплав сталі нагрівали до температури $t_{\text{зст}}=1580^\circ\text{C}$ і заливали у пісочну ливарну форму, для отримання основи біметалевого молотка, креслення якого наведено на Фіг.4. Після затвердіння сталі чавун

нагрівали до температури $t_{\text{зст}} = 1350^{\circ}\text{C}$ і заливали на сталеву основу.

В місці аналізу (Фіг.4) встановлювали термопару ТПП, яка виготовлена відповідно до ГОСТ 3044-84, для експериментального визначення температури при охолодженні біметалевого молотка після заливання розплавів. Температуру реєстрували за допомогою електронного модуля WAD-AIK-BUS, перетворювача WAD-LAN/COM-BUS і в текстовому форматі записували на комп'ютер. Після охолодження виливка з місця аналізу (Фіг.4) вирізали зразок та виготовляли мікрошліфи на яких, за допомогою електронного растрового аналізатора РЭММА-102, визначали вміст хрому на контактній поверхні, в основі та робочому шарі на різній відстані від контактної поверхні.

Відповідно до способу моделювання для металу (Прототип - патент RU №2 317 577 C2, G05B 1/00) та до запропонованого способу розраховували температуру у місці аналізу біметалевого молотка,

креслення якого наведено на Фіг.4, з початку заливання до кімнатної температури. За початкові температури основи та робочого шару приймали температури $t_{\text{зст}} = 1580^{\circ}\text{C}$ і $t_{\text{зчав}} = 1350^{\circ}\text{C}$, відповідно. Значення ефективної теплоємності, густини та теплопровідності ділянок виливка визначали за допомогою таблиці 2 та рівнянь 9-23, і включали в рівняння теплопровідності 6, 8 які покроково вирішували.

Результати розрахункових та експериментальних значень температур у перехідному шарі поблизу місця аналізу приведені на Фіг.5.

Порівняння середньої помилки апроксимації температур визначених відомим способом (прототип) та способом, який пропонується показує, що відхилення значень температури від експериментальних даних, визначених за способом запропонованим у прототипі складає 3,04%, а за способом, що заявляється - 1,01%, тобто у 3 рази менше.

Таблиця 1

Параметри об'ємної дифузії вуглецю кремнію, марганцю, хрому і молибдену ($\ln D_i$) в розплаві, аустеніті і фериті матеріалів, які використовують для виготовлення основи та робочого шару біметалевих виливків

Елемент	$\ln D_0$	Q/R	$R_{\text{кор}}$
Розплав*			
C	$-9,21 + \ln(1 + 0,1276 \cdot \text{Si} + 0,0073 \cdot \text{Mn} - 0,0137 \cdot \text{Cr} - 0,0242 \cdot \text{Mo})$	$14,9 - 0,299 \cdot \text{C} - 0,003 \cdot (T - 273)$	0,793
Si	$-9,21 + \ln(1 + 0,3 \cdot \text{C} + 0,06 \cdot \text{Cr})$	$19,6 - 0,051 \cdot \text{Si} - 0,006 \cdot (T - 273)$	0,988
Mn	$-13,43 + \ln(1 - 0,09 \cdot \text{C} + 0,001 \cdot \text{Si} + 0,015 \cdot \text{Mn} + 0,0328 \cdot \text{Cr})$	10572	0,784
Cr	$-15,136 + \ln(1 - 0,114 \cdot \text{C} + 0,5 \cdot \text{Si} - 0,02 \cdot \text{Mn} + 0,008 \cdot \text{Cr})$	8080	0,985
Mo	-18,334	15746	0,973
Аустеніт*			
C	$-10,6 - 0,107 \cdot \text{Si} + 6,435 \cdot \text{Mn}$	$17737 - 699,9 \cdot \text{C} + 9120,35 \cdot \text{Mn} + 951,2 \cdot \text{Cr}$	0,953
Si	$-122,1 - 3,348 \cdot \text{Mo} + 0,0372 \cdot T$	$-59571,5 - 4877,4 \cdot \text{Mo}$	0,974
Mn	$33,9 + 0,691 \cdot \text{Mn} + 0,00779 \cdot T$	$14619 + 670,4 \cdot \text{Si} + 1110,76 \cdot \text{Mn} + 462,8 \cdot \text{Cr}$	0,974
Cr	$1,203 \cdot \text{Cr} - 30,7$	$2255,2 \cdot \text{Mn} + 1506,9 \cdot \text{Cr} + 350,5 \cdot \text{Ni}$	0,903
Mo	$-11 + 2 \cdot \text{Mo}$	$27776 + 3813 \cdot \text{Mo}$	0,715
Ферит**			
C	$-9,14 - 26,62 \cdot \text{Mn}_{\text{ф}} + 5,17 \cdot \text{Cr}_{\text{ф}}$	$14103,8 - 20520 \cdot \text{Mn}_{\text{ф}} + 6049,98 \cdot \text{Cr}_{\text{ф}}$	0,992
Si	-10,0	24202	0,999
Mn	-6,4	37025	0,999
Cr	1,1	41345	0,999
Mo	$-10,2 - 0,563 \cdot \text{Si}_{\text{ф}} - 0,225 \cdot \text{Cr}_4$	29127	0,999

* Si, Mn, Cr, Mo - вміст елементів в чавуні або сталі (мас. част. %);

** $\text{Cr}_{\text{ф}}$, $\text{Mn}_{\text{ф}}$ - вміст елементів в фериті (мас. част. %)

Таблиця 2

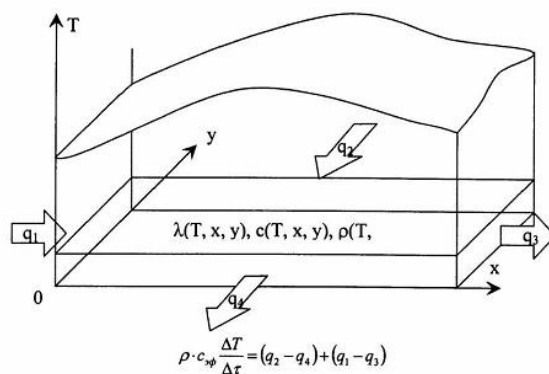
Хімічний склад основи та робочого шару біметалевого молотка

Біметалева пара		Вміст елементів, мас. %				
Основа	Сталь 25Л -	C	Si	Mn	Cr	Mo
Робочий шар	Чавун 300X21M2	0,24	0,31	0,62	-	-
		3,10	0,50	0,85	21,70	2,14

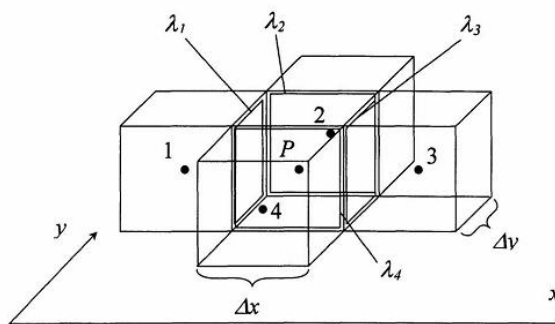
Після визначення температури за рівняннями наведеними в таблиці 1 визначали дифузійну рухливість хрому, значення якої включали в рівняння 31 та визначали його вміст в місці аналізу біметалевого молотка.

Результати розрахункових та експериментальних значень вмісту хрому в місці аналізу біметалевого молотка приведені на Фіг.6.

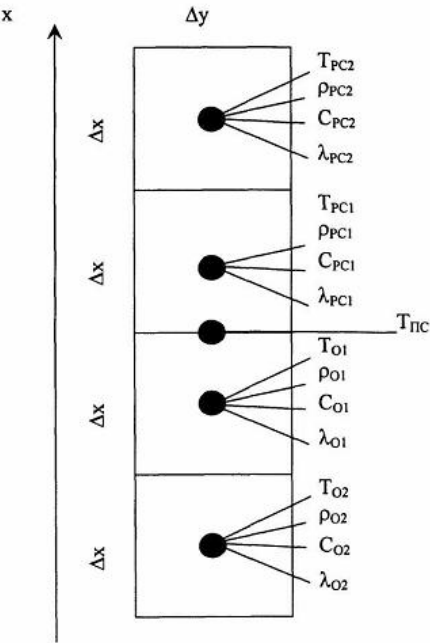
Статистичний аналіз порівняння розрахункових та експериментальних значень показує, що запропонований спосіб дає можливість з вірогідністю 95%, коефіцієнтом кореляції 0,99 та помилкою 4,8% моделювати вміст елементів у будь яких ділянках біметалевих виливків.



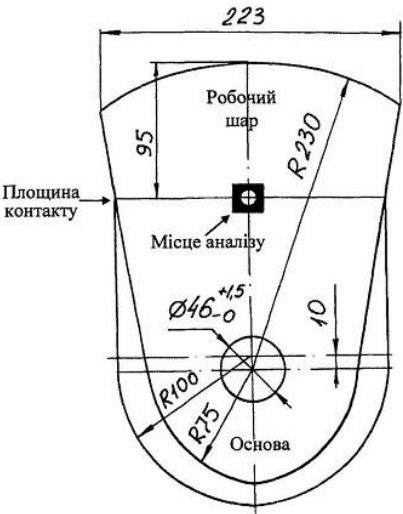
Фіг. 1



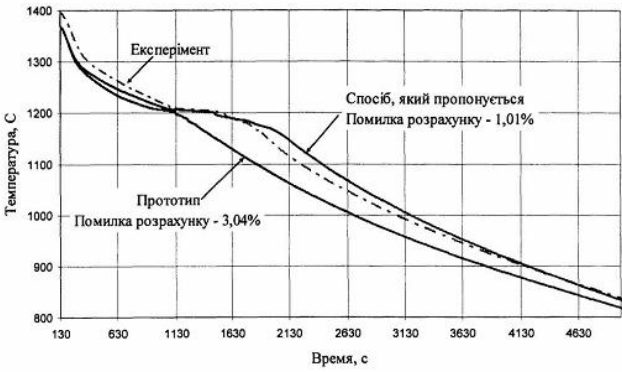
Фіг. 2



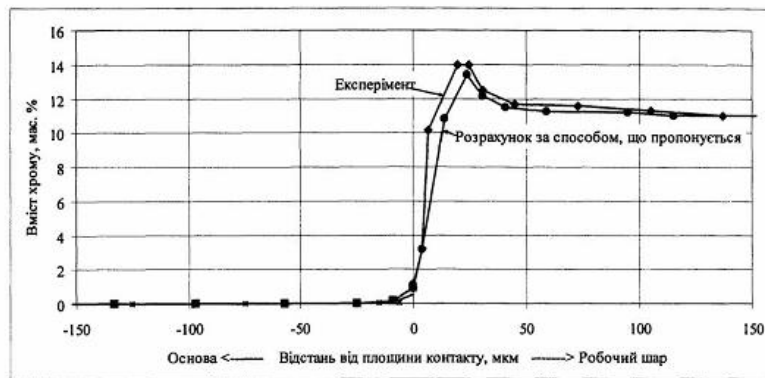
Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5



Фіг. 6