

В.І. Цоцко<sup>1</sup>, І.М. Спиридонова<sup>2</sup>, Б.Г. Пелешенко<sup>1</sup>

## Кінетика нагрівання та плавлення поверхні зразків низьковуглецевої сталі при місцевій термообробці

<sup>1</sup>Дніпропетровський державний аграрний університет, вул. Ворошилова, 25, м. Дніпропетровськ, 49600, Україна,

<sup>2</sup>Дніпропетровський національний університет, пров. Науковий, 13, м. Дніпропетровськ, 49050,  
Україна, E-mail: [dsaupelesh@mail.ru](mailto:dsaupelesh@mail.ru)

Для розширення можливостей керування фазовою та хімічною структурою оброблюваного поверхневого шару металу пропонується проводити розплавлення поверхневого шару на задану контрольовану глибину. Шляхом чисельного моделювання процесу на базі одновимірних зразків з низьковуглецевої сталі одержано час досягнення фронтом розплаву заданої глибини і розподіл температури в зразках. Результати дослідження можуть бути використані в умовах місцевої термічної обробки та супутньому дифузійному насиченні поверхневого шару деталей і заготовок.

**Ключові слова:** місцева термообробка, плавлення, рівняння теплопровідності, розподіл температури.

*Стаття поступила до редакції 22.01.2008; прийнята до друку 15.06.2008.*

### Вступ

В умовах місцевої термічної обробки заданих ділянок поверхні металу в багатьох випадках, з метою підвищення інтенсивності процесу, застосовують максимально високі температури теплової дії, часто на межі з температурою плавлення. Особливо це необхідно для збільшення ефективності дифузійного насичення поверхневого шару металу або при обмеженні в часі процесу обробки. Для вказаної мети можуть бути використані різні високо інтенсивні джерела енергії – пряма і непряма електрична дуга, полум'я газового пальника, струми високої частоти, лазерне випромінювання і т. і.

Для розширення можливостей керування фазовою та хімічною структурою оброблюваного поверхневого шару металу запропоновано здійснити нагрівання поверхні вище точки плавлення. Причому проплавлення поверхневого шару повинно бути на задану контрольовану величину порядку 0,1-0,5 мм. Тим самим, при збереженні початкових розмірів заготовки, можна на порядок збільшити ступінь дифузійного насичення оброблюваного шару і ефективність обробки. Так коефіцієнт дифузії вуглецю в низьковуглецевих сталях в рідкому стані при температурі 1560 °С дорівнює  $7 \cdot 10^{-5}$  см<sup>2</sup>/с [1, с. 55], а в твердому стані при передплавильних температурах не перевищує  $2 \cdot 10^{-5}$  см<sup>2</sup>/с [2, с. 41], що в 3,5 рази менше.

### I. Постановка задачі і об'єкт дослідження

Об'єкт моделювання – одновимірний металічний зразок з низьковуглецевої сталі заданої кінцевої довжини  $l$ , орієнтований вздовж осі "x" і обмежений двома безконечними площинами  $x = 0$  і  $x = l$ .

Поставимо задачу: визначити час нагрівання  $t^*$  поверхні зразка  $x = 0$ , при якому на задану відстань від поверхні нагрівання  $x^*$  переміститься фронт розплаву. В подальшому можна відпрацьовувати два варіанти термічних дій: 1) охолодження зразка до початкового стану і циклічне повторення операції обробки; 2) утримання фронту розплаву на заданій координаті  $x^*$  упродовж певного часу.

Задамо початкові та граничні умови задачі.

Температура на поверхні обробки  $T_s$  постійна і перевищує температуру плавлення металу  $T^*$ . Гранична температура на протилежній поверхні зразка  $T_l$  за попередньою умовою підтримується сталою і рівною температурі оточуючого середовища. Початкова температура зразка дорівнює  $T_l$ . Через деякий час  $t_0$  після початку нагрівання поверхня металу досягне температури плавлення  $T^*$  і тільки після цього почнеться процес плавлення.

### II. Рішення задачі та обговорення результатів дослідження

Застосовуючи одновимірне однорідне рівняння

теплопровідності, визначимо час  $t_0$  і розподіл температури в зразку  $T(x, t_0)$ , тобто розв'яжемо поставлену задачу

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = a_2^2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2}, \text{ при } 0 \leq x \leq l, \quad (1)$$

з додатковими (початковими та граничними) умовами

$$\left. \begin{aligned} T_2 = T_l \text{ при } t = 0; \\ T_2 = T_s \text{ при } x = 0, T_2 = T_l \text{ при } x = l \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

де  $T_2$  – температура і  $a_2^2$  – коефіцієнт температуропровідності досліджуваного металу.

Розв'язок попередньої і основної задач будемо шукати чисельним методом – методом скінчених різниць. В даному методі диференціальному рівнянню (1) відповідає, згідно неявної схеми обчислень (схеми з випередженням), стійкої при довільних часових та просторових кроках обчислень [3, с. 611], система алгебраїчних (різницевих) рівнянь

$$\frac{1}{a_2^2} \frac{T_{i,j+1} - T_{i,j}}{\tau} = \frac{T_{i-1,j+1} - 2T_{i,j+1} + T_{i+1,j+1}}{h^2}, \quad (3)$$

відносно дискретних значень температур  $T_{ij}$  у вузлових точках  $(x_i, t_j)$ , де  $i, j$  – номери вузлів відповідно просторової та часової змінних, а  $\tau$  та  $h$  – відповідно часовий та просторовий кроки обчислень. Різницевий оператор рівняння (3) визначається на чотирьохточковому шаблоні розрахункових точок:  $(x_{i-1}, t_{j+1}), (x_i, t_{j+1}), (x_{i+1}, t_{j+1}), (x_i, t_j)$  [3, с. 557].

Неявні схеми для рівняння теплопровідності призводять до системи алгебраїчних рівнянь для значень шуканої функції  $T_{ij+1}$  на новому часовому шарі  $t = t_{j+1}$ . Вказана система має вид [3, с. 590]

$$A_i T_{i-1} - C_i T_i + B_i T_{i+1} + D_i = 0, \quad 0 < i < N, \quad (4)$$

де  $N$  – число просторових кроків  $h$  в досліджуваній моделі (зразку).

Порівнюючи рівняння (3) і (4), одержимо вираз для різницевих коефіцієнтів системи (4)

$$A_i = a_2^2 \frac{\tau}{h^2}; \quad B_i = a_2^2 \frac{\tau}{h^2}; \quad C_i = 2a_2^2 \frac{\tau}{h^2} + 1; \quad D_i = T_{i,j}; \quad 0 < i < N. \quad (5)$$

Для знаходження розв'язку системи (4) крім звичайних методів лінійної алгебри застосовують найбільш економічний метод - метод прогонки або метод факторизації [3, с. 591], який враховує спеціальний вид матриці системи рівнянь (4). У вказаному методі розв'язок системи шукають у вигляді

$$T_i = \alpha_{i+1} T_{i+1} + \beta_{i+1}, \quad I = 0, 1, 2, \dots, N-1. \quad (6)$$

З (4) та (6) знаходять рекурентні формули для визначення коефіцієнтів  $\alpha_{i+1}$  та  $\beta_{i+1}$ :

$$\alpha_{i+1} = \frac{B_i}{C_i - A_i \alpha_i}, \quad \beta_{i+1} = \frac{A_i \beta_i + D_i}{C_i - A_i \alpha_i}, \quad I = 1, 2, \dots, N-1.$$

З першої граничної умови (2) визначаються значення  $\alpha_1 = 0$  та  $\beta_1 = T_s$ . За рекурентними формулами послідовно знаходяться всі інші коефіцієнти. Знаючи значення граничної температури  $T_N = T_l$  (обов'язкова умова), за формулою (4) справа наліво – від  $i+1$  до  $l$ ,

визначаються температури  $T_{N-1}, T_{N-2}, \dots, T_0$ .

При цих умовах був здійснений розрахунок за вказаною схемою. Для більшої деталізації процесу в поверхневому шарі зразка (0-0,5 мм) крок просторової координати  $h_1$  вибирався достатньо малим порівняно з довжиною зразка  $l = \{2 \dots 20\}$  мм -  $h_1 = 0,01$  мм. За вказаним шаром розрахунковий крок збільшувався до значення  $h_2 = 0,1$  мм. Тоді  $x_i = ih_1$  ( $i = 0, 1, 2, \dots, 50$ ) і  $x_i = ih_2$  ( $i = 51, 52, \dots, N$ ), де  $N = 65; 95; 145; 245$ , в залежності від довжини зразка -  $l_i = 2$  мм;  $l_2 = 5$  мм;  $l_3 = 10$  мм і  $l_4 = 20$  мм. Часовий крок  $\tau$  варіювався поблизу 0,01 с. Початково очікувався розрахунок попередньої задачі за один або декілька кроків.

Числові значення коефіцієнтів теплопровідності низьковуглецевої сталі  $k_2 = 27$  Вт/(м·К), питомої теплоємності  $c_2 = 750$  Дж/(кг·К), густини  $\rho_2 = 7,30 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, а також розрахункова величина  $a_2^2 = k_2 / (c_2 \rho_2) = 4,93 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с визначались за даними: [4, с. 244, 34, 44, 267, 269], [5, с. 171, 167], [6, с. 384], [7, с. 621, 623], [8, с. 358-359], [9, с. 6], [10, с. 121]. Температура нагрівання поверхні  $T_s$  була вибрана рівною 1600 °С і відповідала температурі полум'я газового пальника [5, с. 126]. Температура плавлення прирівнювалась температурі плавлення заліза  $T^* = 1539$  °С. Температура  $T_l$  становила 20 °С.

Температура плавлення в розрахунковій точці на поверхні  $x = 0$  для всіх зразків була одержана за один рівний часовий крок  $\tau = t_0 = 0,0128$  с. Точність обчислення  $\tau$  складала 0,012 мс. Розрахунковий розподіл температури в поверхневому шарі глибиною 1 мм всіх чотирьох зразків співпадає з точністю порядку 0,001 °С. Вказаний розподіл приведено на рис. 1. Отже, попередня задача розв'язана.

Як впливає з рис. 1, температура поблизу точки

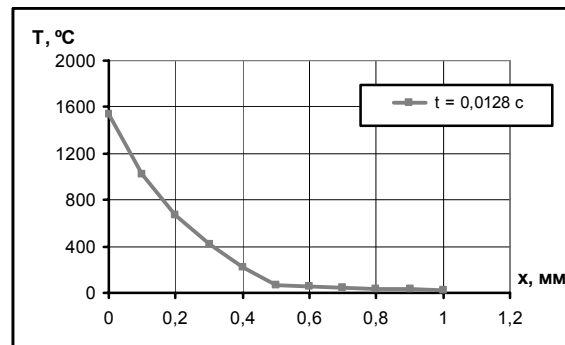


Рис. 1. Розподіл температури в поверхневому шарі зразків  $l_1, l_2, l_3, l_4$  в момент початку плавлення поверхні.

$x = l$  до початку плавлення поверхні мало змінюється, що дозволяє перехід до граничної умови 2-го типу [3, с. 88] – рівності градієнта температури в даній точці нулю.

Після досягнення на поверхні зразка температури плавлення  $T^*$ , внаслідок того, що на поверхні зразка постійно підтримується більш висока температура  $T_s > T^*$ , починається процес плавлення поверхневого шару. Границя плавлення  $x = \xi(t)$  буде переміщуватись в напрямку площини

$x = l$ . При перетворенні металу з твердої фази в рідку на поверхні фазового переходу весь час зберігається постійна температура  $T^*$ . А також в процесі переміщення фронту плавлення в область твердої фази відбувається постійне поглинання енергії на компенсацію прихованої теплоти кристалізації [3, с. 259].

Якщо  $\Delta\xi$  – елементарне переміщення фронту плавлення, а  $\Delta t$  – час цього переміщення, тоді задача про поширення температури при наявності фазового переходу і про швидкість руху границі розділу фаз в середині металу, що плавиться зводиться до розв'язку рівнянь

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial T_1}{\partial t} &= a_1^2 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} \quad \text{для } 0 < x < \xi, \\ \frac{\partial T_2}{\partial t} &= a_2^2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} \quad \text{для } \xi < x < l. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

з початковими та граничними умовами:

$$\left. \begin{aligned} T_2 &= \mu_2(x) \quad \text{при } t = 0; \\ T_1 &= T_s \quad \text{при } x = 0, \quad T_2 = T_l \quad \text{при } x = l \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

і умовами на границі плавлення

$$T_1 = T_2 = T^* \quad \text{при } x = \xi, \quad (9)$$

$$\left[ -k_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=\xi} + k_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=\xi+\Delta\xi} \right] \Delta t = \lambda \rho \Delta\xi, \quad (10)$$

де  $T_1, k_1, a_1^2$  і  $T_2, k_2, a_2^2$  – температура, коефіцієнти теплопровідності і температуропровідності рідкої та твердої фаз відповідно, а  $\mu_2(x)$  – початковий (для моменту часу  $t_0$ ) розподіл температури в твердій фазі (рис. 1);  $\rho$  – густина і  $\lambda$  – питома теплота плавлення металу.

При чисельному розв'язку методом скінчених різниць рівнянь (7) у відповідності з (3) і (4) вирази різницевоїх коефіцієнтів визначались за формулами (5), з врахуванням заміни коефіцієнта температуропровідності  $a_2^2$  на  $a_1^2$  для рідкої фази.

Для розрахункових точок, що визначають положення фронту розплаву, у відповідності до умови (10), різницеві коефіцієнти будуть дорівнювати:

$$A_1 = k_1, \quad B_1 = k_2, \quad C_1 = k_1 + k_2, \quad D_1 = -\lambda \rho \frac{h^2}{\tau}. \quad (11)$$

Розрахунок за вказаною схемою не дав бажаного результату. Утримання низької граничної температури  $T_l$  перешкоджає накопиченню енергії в поверхневому шарі достатньої для плавлення.

Тоді, у відповідності до рис. 1, була змінена гранична умова  $T_l = 20$  °С, яка зіграла свою роль для визначення часу  $t_0$  і розподілу  $T_2(x, t_0)$ , на умову

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=l} = 0, \quad (12)$$

що має просту змістову і технічну інтерпретацію - теплоізоляцію задньої площини зразка. Тим самим досягається економія тепла в процесі обробки і простота технологічної реалізації моделі.

Був виконаний новий розрахунок, у якому температура  $T_l$  змінювалась відповідно до умови (12). У даному розрахунку була використана схема зворотної прогонки [3, с. 592], в якій розв'язок

системи (4) шукається у вигляді

$$T_{i+1} = \alpha_{i+1} T_i + \beta_{i+1}, \quad i = 0, 1, 2, \dots, N-1, \quad (13)$$

де

$$\alpha_i = \frac{A_i}{C_i - B_i \alpha_{i+1}}, \quad \beta_{i+1} = \frac{B_i \beta_{i+1} + D_i}{C_i - B_i \alpha_{i+1}}, \quad i = 1, 2, \dots, N-1.$$

При цьому опорною температурою є температура  $T_0$  – вона визначає розрахунок всіх інших температур у вузлах. Із умови (12) визначались  $\alpha_N = 1$  і  $\beta_N = 0$ , а потім послідовно знаходились всі інші коефіцієнти  $\alpha$  і  $\beta$  системи (13). За умовою (7) гранична температура  $T_0 = T_s$  визначена, і за її значенням зліва направо – від  $i$  до  $i+1$ , визначаються  $T_1, T_2, \dots, T_N$ .

Розрахунок дав наступний результат, при якому для зразка  $l_1$  температура плавлення в першому розрахунковому вузлі була досягнута через 0,628 с. Варіюючи часовим кроком  $\tau$  так, щоб розрахункова температура в кожному наступному вузлі досягала температури плавлення  $T^*=1539$  °С і зсовуючи від вузла до вузла різницеві коефіцієнти (11), вслід за фронтом плавлення, відслідковувалось переміщення фронту розплаву в зразку.

Числові значення коефіцієнтів теплопровідності  $k_1 = 9$  Вт/(м·К), питомої теплоємності  $c_1 = 814$  Дж/(кг·К), густини  $\rho_1 = 7,23 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, а також розрахункова величина  $a_1^2 = k_1 / (c_1 \cdot \rho_1) = 1,53 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с визначались за даними [2]-[9]. Значення питомої теплоти плавлення  $\lambda = 270 \cdot 10^3$  Дж/кг бралось за даними [4, с. 42], [5, с. 156], [9, с. 6].

На рис. 2 приведені переміщення фронту плавлення в зразку  $l_i = 2$  мм з часом, відрахованим від початку плавлення поверхневого шару при граничній температурі поверхні нагрівання

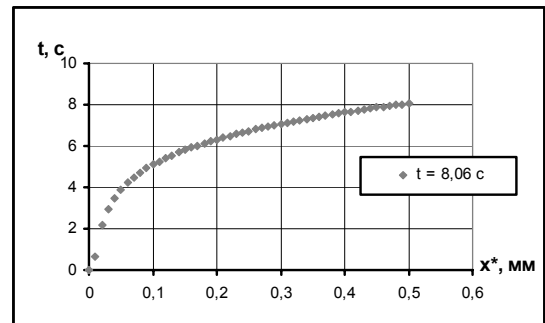


Рис. 2. Переміщення фронту плавлення в зразку  $l_i = 2$  мм при температурі поверхні 1600 °С.

$T_s = 1600$  °С.

Порівняльне переміщення фронтів плавлення в зразках  $l_1 = 2$  мм,  $l_2 = 5$  мм,  $l_3 = 10$  мм,  $l_4 = 20$  мм показане на рис. 3. На всіх кривих спостерігається перегин поблизу перших розрахункових точок, який відображує перехідні процеси в початковій фазі проплавлення поверхні.

Розподіл температури в поверхневому шарі всіх зразків в момент досягнення фронтом розплаву контрольної точки, наприклад  $x^* = 0,5$  мм, практично співпадає. На рис. 4 показаний розподіл температури в поверхневому шарі зразка  $l_4$ . В зоні розплаву розподіл наближається до рівноважного – градієнт

Таблиця 1

Час проплавлення  $t^*$  на задану глибину  $x^*$  дискретної  $l_1, l_2, l_3, l_4$  та напівнескінченної  $l_\infty$  моделей

$x^*$ , мм	$l_\infty$	$l_1$		$l_2$		$l_3$		$l_4$	
	$t_{\infty}^*$ , с	$t_1^*$ , с	$t_1^*/t_{\infty}^*$	$t_2^*$ , с	$t_2^*/t_{\infty}^*$	$t_3^*$ , с	$t_3^*/t_{\infty}^*$	$t_4^*$ , с	$t_4^*/t_{\infty}^*$
0,1	3,74	5,10	1,36	17,3	4,63	40,7	10,9	94,1	25,2
0,5	93,5	8,06	0,0862	27,4	0,293	67,7	0,724	175	1,87

температури в розплаві мало змінюється. А в зоні твердого металу градієнт температури на два порядки нижчий, ніж в розплаві і плавно спадає до нуля від максимального його значення в точці дотику з розплавом.

Важливо підкреслити, що температура граничної площини  $x = l$  в процесі плавлення поверхневого шару зразків дуже висока, при досягненні фронтом розплаву контрольної відмітки  $x^* = 0,5$  мм вона складає 1537,34 °С; 1530,64 °С; 1518,76 °С; 1493,99 °С відповідно для зразків  $l_1, l_2, l_3, l_4$ . Вже для точок  $x^* = 0,1$  мм і навіть  $x^* = 0,01$  мм, температура  $T_l$  зразка  $l_1$  досягала 1445 °С і 417 °С відповідно.

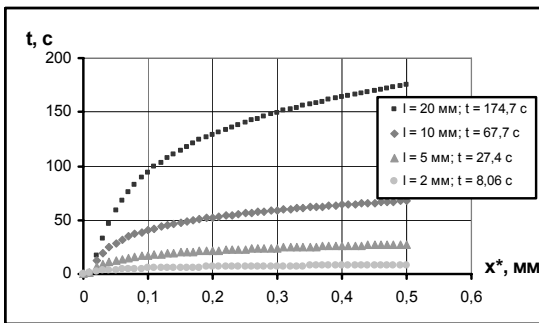


Рис. 3. Переміщення фронту плавлення в зразках  $l_1 = 2$  мм,  $l_2 = 5$  мм,  $l_3 = 10$  мм,  $l_4 = 20$  мм

Природно припустити, що із зростанням довжини кінцевої моделі швидкість плавлення поверхневого шару повинна наближатись до швидкості плавлення напівнескінченної моделі,

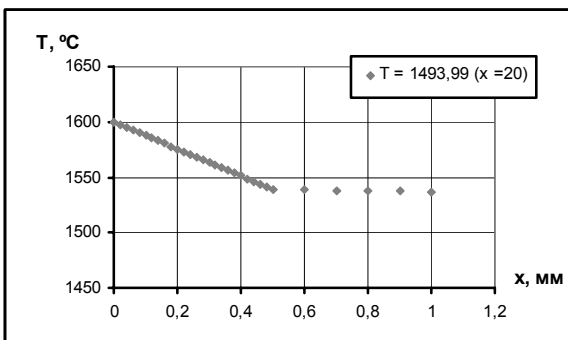


Рис. 4. Розподіл температури в зразку  $l_4 = 20$  мм в момент часу  $t = 174,9$  с.

розрахованої аналітично [3, с. 261].

Порівняння часу проплавлення  $t^*$  на задану глибину  $x^* = 0,1$  мм або  $x^* = 0,5$  мм даної кінцевої дискретної моделі  $l_1, l_2, l_3, l_4$  з аналогічним часом  $t_{\infty}^*$  для напівнескінченної моделі  $l_\infty$  при однаковій температурі поверхні нагрівання  $T_s = 1600$  °С

приведене в таблиці 1.

Розбіжність швидкостей руху фронту розплаву в кінцевих та напівнескінченній моделях пояснюється не тільки відмінністю в їх довжині, але й відмінністю в граничних умовах задач. Так, підігрів напівнескінченної моделі з 20 до 400 °С збільшує швидкість плавлення в 1,75 рази. У випадку кінцевих моделей підігрів граничної точки  $x = l$  закладений у самій граничній умові – рівності градієнта температури нулю. Якщо для напівнескінченної моделі розв'язок задачі Стефана методом подібності дає залежність між величинами  $x^*$  та  $t^*$  у вигляді  $x^* \approx \sqrt{t^*}$  [1, с. 261], то розрахункова дискретна модель дає залежність між  $x^*$  і  $t^*$  типу  $x^* \approx (t^*)^n$ , де  $n > 1$ , і метод подібності до неї не підходить.

Порівнюючи залежності  $x^*$  від  $t^*$  для довільної дискретної і напівнескінченної моделей завжди можна визначити області їх перетину, які вкажуть на якій глибині проплавлення час обох процесів буде співпадати. Так для зразка  $l_1$  співпадіння часу проплавлення з напівнескінченною моделлю відбувається на глибині  $x^* = 0,12$  мм ( $t^* = 5,4$  с). А для зразка  $l_2$  – на глибині  $x^* = 0,25$  мм ( $t^* = 30$  с). В розрахунку використаний параметр швидкості плавлення  $\alpha$  ( $\alpha = x^*/\sqrt{t^*}$ ), одержаний для напівнескінченної моделі -  $\alpha = 0,0517$  мм/с<sup>1/2</sup>. Таким чином, аналітичне моделювання вказаного процесу проплавлення поверхні на базі напівнескінченної моделі доцільно вести для відповідного типорозміру заготовок чи деталей.

На рис. 5 приведені інтерполяційні криві залежності часу проплавлення поверхневого шару

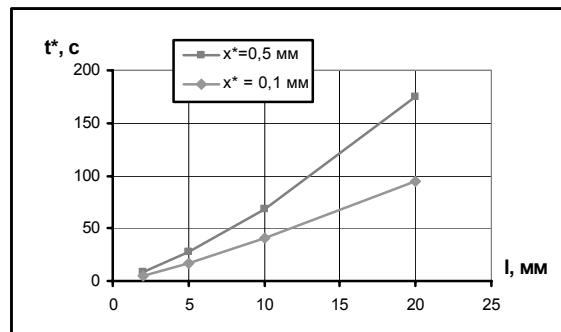


Рис. 5. Залежність часу проплавлення  $t^*$  поверхні зразка на задану глибину  $x^*$  від довжини зразка  $l$ .

зразків на задану глибину  $x^* = 0,1$  мм та  $x^* = 0,5$  мм від їх довжини. Відповідно до вказаних графіків можна визначати час досягнення фронтом розплаву

даних контрольних глибин для зразків довільної кінцевої довжини при збереженні аналогічних умов обробки.

Конечна модель є більш адекватною, варіабельною схемою оцінок параметрів плавлення поверхневого шару під час хіміко-термічної обробки реальних деталей та заготовок. Розрахунок часу проплавлення досліджених зразків на стандартну характерну глибину дозволить якісно провести дифузійне насичення поверхневого шару і може бути використане в процесі чисто термічної обробки.

## Висновки

Одержані параметри швидкості плавлення поверхневого шару моделей дозволяють оцінити час

перебування поверхневого шару оброблюваних деталей або заготовок в рідкому стані і, як наслідок, передбачити ефективність і розрахувати глибину насичення поверхневого шару легуючими елементами в процесі поверхневого легування, зокрема при цементації.

**Цоцко В.І.** – старший викладач кафедри фізики та матеріалознавства.

**Спиридонова І.М.** – доктор технічних наук, професор, завідувач відділом динамічної металофізики.

**Пелешенко Б.Г.** – кандидат фізико-математичних наук, професор кафедри вищої математики.

- [1] Б.М. Лепинских, А.В. Кайбичев, Ю.А. Савельев. Ю.А. *Диффузия элементов в жидких металлах группы железа*. Наука, М. 192 с.(1974).
- [2] Б.С. Бокштейн. *Диффузия в металлах*. Металлургия, М. 248 с. (1978).
- [3] А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. *Уравнения математической физики*. Наука, М. 736 с. (1972).
- [4] Б.Г. Лившиц. *Физические свойства металлов и сплавов*. Машгиз, М. 352 с. (1956).
- [5] А.С. Енохович. *Справочник по физике*. Просвещение, М. 415 с.(1978).
- [6] *Материалы в машиностроении*. Справочник в пяти томах. / Под общ. ред. И.В. Кудрявцева Т.3. *Специальные стали и сплавы*. Под ред. Ф. Ф. Химушина. Машиностроение, М. 448 с. (1968).
- [7] *Марочник сталей и сплавов*. / В.Г. Сорокин, А.В. Волосникова. С.А. Вяткин и др.; Под общ. ред. В.Г. Сорокина. Машиностроение, М. 640 с. (1989).
- [8] Структура и свойства металлов и сплавов. Справочник. / Л.Н. Лариков, Ю.Ф. Юрченко. Тепловые свойства металлов и сплавов. Наукова думка, К. 438 с. (1985).
- [9] Разливка черных металлов. Справочн. изд. / Н.Н. Власов, В.В. Король, В.С. Радя. Металлургия, М. 272 с. (1987).
- [10] В.И. Коротич, С.Г. Братчиков. Металлургия черных металлов. Металлургия, М. 240 с. (1987).

V.I. Tsotsko<sup>1</sup>, I.M. Spiridonova<sup>2</sup>, B.I. Peleshenko<sup>1</sup>

## The Analytical Investigation of Low-Carbon Steel Surface Heating and Melting Kinetic at Local Thermal Treatment

<sup>1</sup>Dnepropetrovsk State Agrarian University, Voroshylova Str., Dnepropetrovsk, 49600, Ukraine

<sup>2</sup>Dnepropetrovsk National University, Naukovy Side Str., 13, Dnepropetrovsk, 49050, Ukraine

E-mail: [dsaupelesh@mail.ru](mailto:dsaupelesh@mail.ru)

For the purpose of expanding of the possibilities of control of phase and chemical structure of the metal surface layer during its processing, it is suggested that melting of the surface layer should be done at the set controlled depth. By numerical simulation of the process on the basis of one-dimensional samples of low-carbon steel there has been obtained time of melting at the set depth and distribution of temperature in the samples. The results of the analysis may be used in conditions of local thermal processing and concurrent diffusion saturation of the surface layer of parts and billets.