

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

## Стабілізація проплавлення поверхневого шару низьковуглецевих сталей

<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

Для розширення можливостей керування фазовою та хімічною структурою поверхневого шару металу проводиться розплавлення поверхневого шару на задану контрольовану глибину. Шляхом чисельного моделювання процесу на базі одновимірних зразків з низьковуглецевої сталі одержані швидкості охолодження поверхні, необхідні для стабілізації фронту розплаву на заданій глибині в зразках. Результати дослідження можуть бути використані в умовах місцевої термічної обробки та супутньому дифузійному насиченні поверхневого шару деталей і заготовок.

**Ключові слова:** локальна теплова дія, плавлення, рівняння теплопровідності, розподіл температури, швидкість охолодження.

Стаття постуила до редакції 07.12.2008; прийнята до друку 15.06.2009.

При локальній термічній дії на поверхню металу в багатьох випадках, з метою підвищення інтенсивності процесу, застосовують максимально високі температури теплової дії, які впритул наближаються до температури плавлення. Особливо це необхідно для збільшення ефективності дифузійного насичення поверхневого шару металу, яке проводять з метою формування в поверхневому шарі металу нових потрібних властивостей. В якості нагрівника для вказаної мети можуть бути використані різні високоінтенсивні джерела енергії – пряма і непряма електрична дуга, полум'я газового пальника, лазерне випромінювання, вибухова хвиля і т. і. [1,2].

Для розширення можливостей керування фазовою та хімічною структурою поверхневого шару металу, що обробляється, в деяких способах обробки реалізується нагрів поверхні вище точки плавлення [3]. Але проплавлення поверхні проводиться на випадкову непередбачувану глибину, причому час проплавлення поверхневого шару незначний. В роботі [4] шляхом моделювання досліджено час проплавлення зразків з низьковуглецевої сталі на задану контрольовану глибину 0,1-0,5 мм в типових умовах локального нагріву. Тим самим, при збереженні початкових розмірів заготовки, на порядок збільшується ступінь дифузійного насичення оброблюваного шару і ефективність обробки. Так коефіцієнт дифузії вуглецю в низьковуглецевих сталях в рідкому стані при температурі 1560°C

дорівнює  $7 \cdot 10^{-5}$  см<sup>2</sup>/с [5], а в твердому стані при передплавильних температурах не перевищує  $2 \cdot 10^{-5}$  см<sup>2</sup>/с [6], що значно менше. Залишається нев'ясненим, при яких умовах потрібно підтримувати систему, щоб вона залишалася в стабільному стані, зручному для подальшої обробки.

Поставимо задачу: на базі одновимірної моделі з низьковуглецевої сталі заданої кінцевої довжини  $l$ , орієнтований вздовж осі "x" і обмежений двома безкінечними площинами  $x = 0$  і  $x = l$ , визначити умови теплової дії на поверхню, при яких фронт розплаву буде утримуватись на заданій координаті  $x^*$  упродовж визначеного часу. Розподіл температури в моделі в момент досягнення фронтом розплаву координати  $x^* = 0,5$  мм визначений в роботі [4].

Задача зводиться до розв'язку одновимірної рівняння теплопровідності для двофазної системи розплав-кристал

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial T_1}{\partial t} &= a_1^2 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} \quad \text{для } 0 \leq x < x^*, \\ \frac{\partial T_2}{\partial t} &= a_2^2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} \quad \text{для } x^* < x \leq l, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

з початковими та граничними умовами

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= \mu_1(x) \text{ і } T_2 = \mu_2(x) \quad \text{при } t = 0; \\ T_1 &= T_1(0, t) \text{ при } x = 0, \quad \frac{\partial T_2}{\partial x} = 0 \text{ при } x = l, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

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,  $\mu_1(x)$  і  $\mu_2(x)$  – початковий розподіл температури в рідкій та твердій фазах [4]. Умови на границі плавлення будуть відповідати рівності температур та теплових потоків на поверхні фазового переходу  $x = x^*$ :

$$T_1 = T_2 = T^* \quad \text{при} \quad x = x^*, \quad (3)$$

$$k_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=x^*} = k_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=x^*} \quad (4)$$

Розв’язок задачі будемо шукати чисельним методом – методом скінчених різниць. Диференціальним рівнянням (1) відповідає, згідно неявної схеми обчислень [7], система алгебраїчних (різницевих) рівнянь

$$\frac{1}{a^2} \frac{T_{i,j+1} - T_{i,j}}{\tau} = \frac{T_{i-1,j+1} - 2T_{i,j+1} + T_{i+1,j+1}}{h^2} \quad (5)$$

відносно дискретних значень температур  $T_{ij}$  у вузлових точках  $(x_i, t_j)$ , де  $i, j$  – номери вузлів просторової та часової змінних, а  $\tau$  та  $h$  – відповідно часовий та просторовий кроки обчислень,  $a^2$  – коефіцієнт теплопровідності даної фази.

Неявні схеми для рівняння теплопровідності призводять до системи алгебраїчних рівнянь для значень шуканої функції  $T_{i,j+1}$  на новому часовому шарі  $t = t_{j+1}$ . Вказана система має вид [7]

$$A_i T_{i-1} - C_i T_i + B_i T_{i+1} + D_i = 0, \quad 0 < i < N, \quad (6)$$

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

З рівнянь (5) і (6), одержимо вираз для різницевих коефіцієнтів системи (1)

$$A_i = a^2 \frac{\tau}{h^2}; \quad B_i = a^2 \frac{\tau}{h^2}; \quad C_i = 2a^2 \frac{\tau}{h^2} + 1; \quad D_i = T_{i,j}; \quad 0 < i < N. \quad (7)$$

Для координати  $x^*$ , що визначає положення фронту розплаву, у відповідності до умови (4), різницеві коефіцієнти будуть дорівнювати

$$A_1 = k_1, \quad B_1 = k_2, \quad C_1 = k_1 + k_2, \quad D_1 = 0. \quad (8)$$

Обчислення температур у вузлах просторово-часової сітки проводилось за схемою зворотної прогонки [7,4] з опорною температурою  $T(0, t_j)$  на поверхні  $x = 0$  моделі. За умовою поставленої задачі температура  $T(0, t_j)$  весь час змінюється від початкового значення  $T(0, 0) = 1600^\circ\text{C}$  – потрібно визначити характер вказаної зміни. Для цього задавалась послідовність моментів часу  $t_1, t_2, t_3, \dots$  (як правило, рівновіддалених один від одного), в яких проводився розрахунок нового температурного поля в кожному із зразків. Відповідно до вказаних моментів часу обчислювався розрахунковий часовий крок –  $\tau$ , з врахуванням якого підбиралась температура на поверхні кожного зразка  $T(0, t_j)$  таким чином, щоб температура на межі рідкої та твердої фаз залишалась рівною температурі фазового перетворення  $T^*$ .

За вказаною схемою була досліджена дискретна модель з довжиною зразків  $l_1 = 2$  мм,  $l_2 = 5$  мм,  $l_3 = 10$  мм,  $l_4 = 20$  мм. Числові значення коефіцієнтів теплопровідності низьковуглецевої сталі в рідкому  $k_1 = 9$  Вт/(м·К) та кристалічному стані  $k_2 = 27$  Вт/(м·К), відповідних питомих теплоємностей

$c_1 = 814$  Дж/(кг·К) та  $c_2 = 750$  Дж/(кг·К), густин  $\rho_1 = 7,23 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> та  $\rho_2 = 7,30 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, а також розрахункові величини  $a_1^2 = k_1 / (c_1 \cdot \rho_1) = 1,53 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с та  $a_2^2 = k_2 / (c_2 \cdot \rho_2) = 4,93 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с визначались за даними: [8,9,10,11,12,13,14]. Температура плавлення зразків прирівнювалась температурі плавлення заліза  $T^* = 1539^\circ\text{C}$ .

Зміни швидкостей охолодження поверхні зразків  $l_1, l_2, l_3, l_4$  з часом, при фіксованій координаті фронту розплаву  $x^* = 0,5$  мм, наведені на рис. 1-2. Початкова температура поверхні зразків  $1600^\circ\text{C}$ . Часовий крок в обчисленнях –  $\tau = 1$  с.

Як бачимо, для підтримки стабільного положення фронту розплаву в точці  $x^*$  швидкість

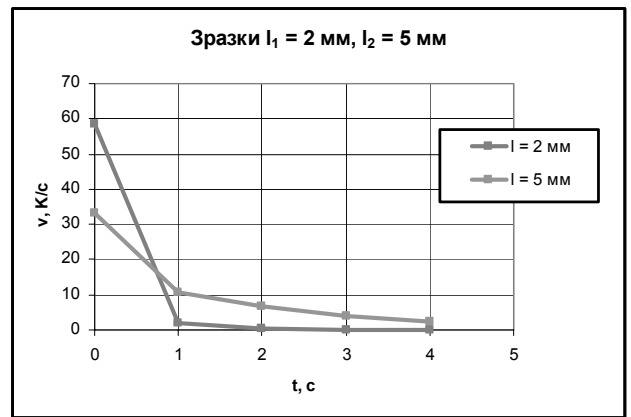


Рис. 1. Швидкість охолодження  $v$  поверхні зразків  $l_1$  і  $l_2$

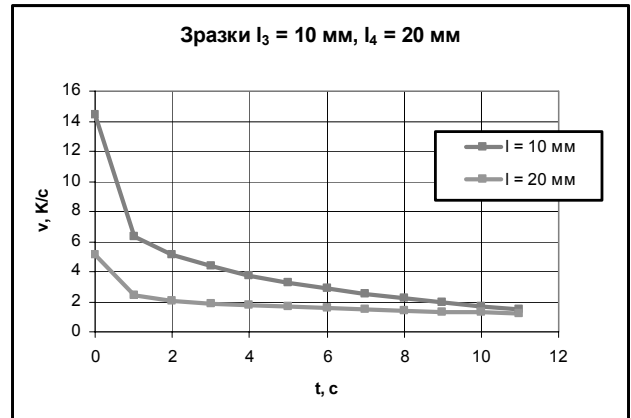


Рис. 2. Швидкість охолодження  $v$  поверхні зразків  $l_3$  і  $l_4$

охолодження поверхні зразків різко зменшується протягом першої секунди та поступово спадає в наступний час. Якщо в початковий період охолодження в тонких зразках швидкість охолодження поверхні значно перевищує швидкість охолодження більш протяжних зразків, то в наступний період величини вказаних швидкостей міняються місцями. Це пояснюється тим, що система прямує до вирівнювання температури до значення  $T = T^*$  уздовж всього зразка, і в першій фазі охолодження поверхні продовжується переважаюче накопичення внутрішньої енергії в кристалічну область більш протяжних зразків, температура в якій нижча, ніж у тонких зразків.

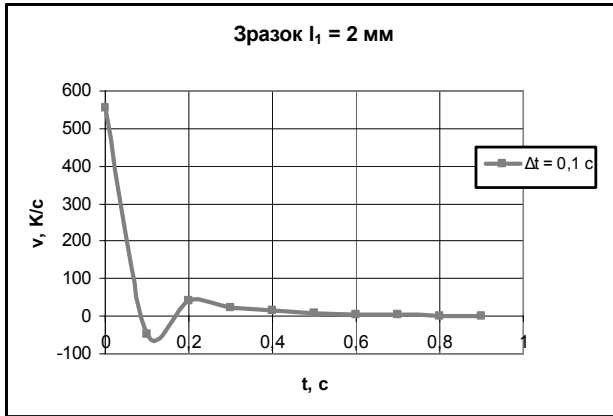


Рис. 3. Швидкість охолодження  $v$  поверхні зразка  $l_1$  з часовим кроком  $0,1$  с

Швидкість охолодження в зразках  $l_1$  і  $l_2$  спадає практично до нуля за 4-8 с, а в зразках  $l_3$  і  $l_4$  – за 50-200 с.

Характерно, що при більш тонкому обчисленні швидкостей охолодження (часовий крок  $\tau = 0,1$  с) у перших кроках охолодження для всіх зразків спостерігається пульсація швидкості, коли монотонному зменшенню її протистоїть короткочасне зростання. При цьому швидкість охолодження може змінювати знак (рис. 3). Ефект пояснюється перехідними процесами при зміні теплової дії на поверхню, а саме інерційністю системи з початковим часом релаксації  $\approx 0,1$  с. За цей час від початку охолодження в зоні розплаву від поверхні до фронту розплаву формується максимум в полі температур, і він призводить до “відкоту” теплової дії на поверхню.

Гранична (максимальна) швидкість охолодження  $v$  поверхні зразків  $l_1, l_2, l_3, l_4$  (рис. 4) була відмічена у першому розрахунковому кроці. Інтерполяційна крива на рис. 4 узагальнює результати дослідження швидкості охолодження для довільної довжини зразків дискретної моделі. Результати відповідають опосередкованому аналізу швидкості охолодження за час  $\tau = 1$  с, при деталізації процесу ( $\tau = 0,1$  с) гранична швидкість охолодження в цілому

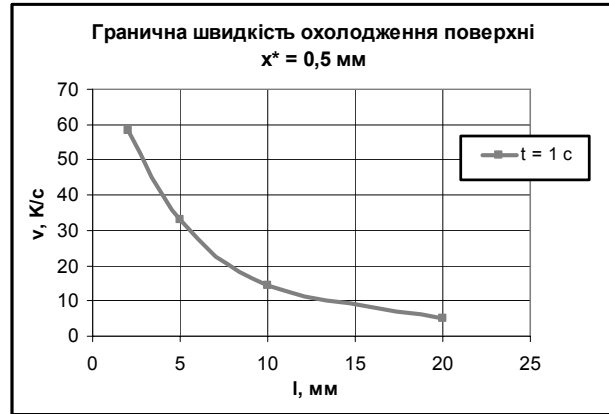


Рис. 4. Гранична швидкість охолодження  $v$  поверхні зразків  $l_1, l_2, l_3, l_4$

підвищується і спадає від 555 до 27 К/с, з зростанням довжини моделі.

Розрахунок швидкостей охолодження поверхні зразків дискретної моделі в широкому діапазоні їх довжин, визначення максимальних значень швидкостей і характер їх зміни з часом для забезпечення стабілізації положення фронту розплаву на заданій глибині  $x^*$  від поверхні дозволить контролювати час перебування поверхневого шару оброблюваних деталей або заготовок в рідкому стані, а значить ефективно проводити дифузійне насичення поверхневого шару металу (низьковуглецевої сталі) легуючими елементами і формувати задані фізико-хімічні властивості шару.

**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] В.В. Стацура, А.Е. Михеев, А.В. Гирн, С.С. Ивасев. Упрочнение стальных поверхностей электрической дугой // *Физика и химия обработки материалов*, (2), с. 88 (2003).
- [2] Г.Н. Эпштейн. *Строение металлов, деформированных взрывом*. Металлургия, М. 256 с. (1980).
- [3] Н.В. Попова, В.Ф. Башев, Е.Г. Попов. Фазовые превращения в сталях при импульсном воздействии плазмы высокого давления // *Физика и химия обработки материалов*, (4), с. 98 (1986).
- [4] В.І. Цоцко, І.М. Спиридонова, Б.Г. Пелешенко. Аналітичне дослідження кінетики нагрівання та плавлення поверхні зразків низьковуглецевої сталі при місцевій термообробці // *Фізика і хімія твердого тіла*, 9(2), с. 167 (2008).
- [5] Б.М. Лепинских, А.В. Кайбичев, Ю.А. Савельев. Ю.А. *Диффузия элементов в жидких металлах группы железа*. Наука, М. 192 с.(1974).
- [6] Б.С. Бокштейн. *Диффузия в металлах*. Металлургия, М. 248 с. (1978).
- [7] А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. *Уравнения математической физики*. Наука, М. 736 с. (1972).
- [8] Б.Г. Лившиц. *Физические свойства металлов и сплавов*. Машгиз, М. 352 с. (1956).
- [9] А.С. Енохович. *Справочник по физике*. Просвещение, М. 415 с.(1978).

- [10] *Материалы в машиностроении. Справочник в пяти томах.* / Под общ. ред. И.В. Кудрявцева. **3**, Специальные стали и сплавы. Под ред. Ф.Ф. Химушина. Машиностроение, М. 448 с. (1968).
- [11] *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).
- [12] *Структура и свойства металлов и сплавов. Справочник.* / Л.Н. Лариков, Ю.Ф. Юрченко. Тепловые свойства металлов и сплавов. Наукова думка, К. 438 с. (1985).
- [13] *Разливка черных металлов. Справочн. изд.* / Н.Н. Власов, В.В. Король, В.С. Радя. –Металлургия, М. 272 с. (1987).
- [14] В.И. Коротич, С.Г. Братчиков. *Металлургия черных металлов.* Metallurgia, М. 240 с. (1987).

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

### **Stabilization of Melting of the Surface Layer of Low-Carbon Steels**

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

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

*E-mail: dsapelesh@mail.ru*

For the purpose of expanding of the possibilities of the phase and chemical structure control of the metal surface layer, melting of the surface layer at the set controlled depth is performed. By numerical simulation of the process on the basis of one-dimensional samples of low-carbon steel there have been obtained speeds of surface cooling necessary for stabilization of the melt front at the set depth 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.