

В.І. Цоцко¹, І.М. Спиридонова², Б.Г. Пелешенко¹, О.І. Денисенко³

Розподіл температури одновимірного зразка в умовах місцевої термообробки

¹Дніпропетровський державний аграрний університет, вул. Ворошилова, 25,
м. Дніпропетровськ, 49600, Україна, E-mail: dsaupelesh@mail.ru

²Дніпропетровський національний університет, пров. Науковий, 13, м. Дніпропетровськ, 49050, Україна

³Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, м. Дніпропетровськ, 49600, Україна

В умовах лінійного зростання і наступного лінійного зменшення температури поверхні одновимірної моделі досліджено температурне поле в глибині металічних зразків. Результати розрахунку застосовані до низьковуглецевих сталей. Аналітично отримані розподіли температур в зразках при нагріванні і охолодженні оброблюваної поверхні в заданому інтервалі температур. В широкому діапазоні проаналізовано вплив швидкості охолодження поверхні на температурне поле в зразках. Вивчена динаміка температур поверхневих шарів зразків. Отримані результати можуть бути використані в процесах місцевої термообробки деталей, при дифузійному насиченні поверхневого шару, а також для розрахунку параметрів термоциклічної обробки.

Ключові слова: місцева термообробка, швидкість охолодження, рівняння теплопровідності, температурне поле.

Стаття постуила до редакції 07.02.2007; прийнята до друку 15.12.2007

Вступ

При використанні місцевої термообробки характер розподілу температур залежить від габаритів оброблюваних деталей, властивостей металу, а також від типу й потужності енергоносія: газового полум'я, електричної дуги, лазерного променя, ударної хвилі, струму ВЧ. Дифузійні процеси, викликані нагріванням, обмежені температурним полем [1, с.56], яке у кожному конкретному випадку має власну конфігурацію, недостатньо вивчену особливо для високоінтенсивної швидкісної термообробки [2, с. 89]. У даній роботі вивчалися закономірності розподілу температури, що виникають при дії на матеріали інтенсивними локальними джерелами енергії, із широким діапазоном швидкостей нагрівання й охолодження.

Для контролю процесів теплопередачі в умовах місцевого нагрівання, оброблюваний об'єм матеріалу помістимо у жорсткі температурні умови: будемо підтримувати температуру на одній поверхні одновимірного зразка незмінною й змінювати її по заданому, максимально простому закону на протилежній – робочій поверхні. У роботі проведені розрахунки температурного поля зазначеної моделі після лінійного нагрівання поверхні зі швидкістю b з наступним її охолодженням з постійною швидкістю c і застосуванням результатів для низьковуглецевих сталей.

Розглянемо однорідний одновимірний зразок довжиною l . Передня (робоча) і задня граничні площини зразка підтримуються при температурах T_0 і T_l . При лінійному нагріванні робочої поверхні зі швидкістю b до температури $T_{0 \max}$ раніше [3] був отриманий розподіл температури в зразку:

$$T(x, 0) = T_{0 \max} + (T_l - T_{0 \max}) \frac{x}{l} + \frac{2bl^2}{\pi^3 a^2} \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^3} \{ \exp[-(\frac{\pi n}{l})^2 a^2 t_0] - 1 \} \sin(\frac{\pi n}{l} x), \quad (1)$$

де x – відстань від робочої поверхні зразка в напрямку до його іншої граничної площини, що підтримується при постійній температурі T_l , a^2 – коефіцієнт температуропровідності зразка, $t_0 = (T_{0 \max} - T_0)/b$ – час нагрівання робочої поверхні.

При охолодженні робочої поверхні з сталою швидкістю c , температура поверхні $T(0, t)$ зменшується з часом t за лінійним законом: $T(0, t) = T_{0 \max} - c \cdot t$, $0 < t \leq (T_{0 \max} - T_0)/c$.

Знайдемо розподіл температури $T(x, t)$ по глибині (довжині) зразка x у довільний момент часу t при зазначених додаткових умовах охолодження.

Поставлене завдання зводиться до розв'язання однорідного рівняння теплопровідності

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (2)$$

для $0 < t \leq (T_{0 \max} - T_0)/c$ і $0 < x < l$, що задовольняє початковій умові (1) і граничним умовам першого типу [4, с. 188]:

$$T(0,t) = T_{0 \max} - c \cdot t = \mu_1(t), \quad (3)$$

$$T(l,t) = T_l = \mu_2(t) \quad (4)$$

Коефіцієнт теплопровідності a^2 зразка в розглянутому діапазоні температур приймається сталим.

Використовуючи метод розділу змінних (метод Фур'є) [4, сс. 200-219], був отриманий розв'язок рівняння (2):

$$T(x,t) = u(x,t) + w(x,t) + z(x,t); \quad (5)$$

де

$$u(x,t) = (T_{0 \max} - ct) + [T_l - (T_{0 \max} - ct)] \frac{x}{l};$$

$$w(x,t) = \frac{2bl^2}{\pi^3 a^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^3} \exp[-(\frac{\pi n}{l})^2 a^2 t] \times \\ \times \{ \exp[-(\frac{\pi n}{l})^2 a^2 t_0] - 1 \} \sin(\frac{\pi n}{l} x);$$

$$z(x,t) = \frac{2cl^2}{\pi^3 a^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^3} \{ 1 - \exp[-(\frac{\pi n}{l})^2 a^2 t] \} \times \\ \times \sin(\frac{\pi n}{l} x)$$

Розв'язок (5) є сумою трьох складових: $u(x,t)$ - рівноважного (граничного) компонента, $w(x,t)$ - компонента внутрішньої післядії, що залежить від початкового розподілу температури в процесі нагрівання, і $z(x,t)$ - компонента зовнішнього впливу, що залежить від температури середовища.

Якщо процес охолодження робочої поверхні закінчується на температурі T_0 , то в процесі наступної релаксації зазначені компоненти набувають виду:

$$u(x,t) = T_0 + (T_l - T_0) \frac{x}{l};$$

$$w(x,t) = \frac{2bl^2}{\pi^3 a^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^3} \exp[-(\frac{\pi n}{l})^2 a^2 t] \times \\ \times \{ \exp[-(\frac{\pi n}{l})^2 a^2 t_0] - 1 \} \sin(\frac{\pi n}{l} x);$$

$$z(x,t) = \frac{2cl^2}{\pi^3 a^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^3} \exp[-(\frac{\pi n}{l})^2 a^2 t] \times \\ \times \{ \exp[-(\frac{\pi n}{l})^2 a^2 t^*] - 1 \} \sin(\frac{\pi n}{l} x)$$

де $t^* = (T_{0 \max} - T_0)/c$ - повний інтервал часу охолодження робочої поверхні.

Конкретизуємо параметри отриманих рівнянь. Основний матеріал досліджень - низьковуглецеві сталі. Раніше [3] був обґрунтований вибір температур - $T_l = 20$ °С, $T_0 = 550$ °С, $T_{0 \max} = 930$ °С. Для зазначеного інтервалу температур коефіцієнт теплопровідності низьковуглецевих сталей дорівнює $a^2 = 6,9 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Товщина зразків l варіювалась в межах 0,002-0,02 м ($l_1 = 0,002$ м; $l_2 =$

0,005 м; $l_3 = 0,01$ м; $l_4 = 0,02$ м) і відповідала розмірам найбільш поширених деталей, що потребують зміцнюючої обробки, наприклад робочим органам культиватора-плоскоріза [5, с. 30].

Досліджувався вплив швидкості охолодження c на розподіл температури в зразку. Крім звичайних швидкостей, оцінювався вплив швидкісних ($>10^3$ К/с) і надшвидкісних ($\sim 10^6$ К/с) режимів охолодження, наприклад при лазерній обробці [6] або обробці вибухом [7, с. 143].

Для тонких зразків при помірних швидкостях охолодження й нагрівання (1-100 К/с) величина відхилення температури від її рівноважного значення в момент закінчення процесу охолодження (нагрівання) незначна (для зразка l_1 менш 4 °С, для зразка l_2 - 24 °С) і доцільно користуватися рівноважною кривою розподілу. При високих значеннях параметрів c і b відхилення температури для зазначених зразків може досягати декількох сотень градусів, але протягом нетривалої релаксаційної витримки (1-2 с), що відповідає звичайній похибці технології процесу, воно зменшується до часток відсотка. Таким чином, для тонких зразків є всі підстави використовувати рівноважний розподіл температури.

Для протяжних зразків (l_3 і l_4) уже на швидкостях термообробки порядку 10 К/с відхилення температури ΔT від рівноважного значення перевищує кілька відсотків і, щоб застосовувати стаціонарний розподіл температури, необхідно зробити релаксаційну витримку (6-30 с) відповідно до розрахункових формул для тимчасової залежності відхилень при нагріванні й охолодженні:

$$\Delta T_{\text{нагр}} = \frac{2bl^2}{\pi^3 a^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^3} \exp[-(\frac{\pi n}{l})^2 a^2 t] \\ \{ \exp[-(\frac{\pi n}{l})^2 a^2 t_0] - 1 \} \sin(\frac{\pi n}{l} x) \quad (6)$$

$$\Delta T_{\text{охл}} = \frac{2cl^2}{\pi^3 a^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^3} \exp[-(\frac{\pi n}{l})^2 a^2 t] \times \\ \times \{ 1 - \exp[-(\frac{\pi n}{l})^2 a^2 t^*] \} \sin(\frac{\pi n}{l} x) \quad (7)$$

де час t відлічується після закінчення відповідного етапу нагрівання або охолодження, а $t^* = (T_{0 \max} - T_0)/c$ - повний інтервал часу охолодження робочої поверхні. Без проведення такої витримки аналіз наступного етапу охолодження повинен проводитися починаючи з початкового розподілу температури (1), (5), отриманого раніше.

Розглянемо процес охолодження зразків після закінчення етапу нагрівання й проведення релаксаційної витримки. Початковий розподіл (1) при цьому скоротиться до виразу $T(x,0) = T_{0 \max} + (T_l - T_{0 \max}) \frac{x}{l}$. Тоді розв'язок рівняння (2) у момент закінчення охолодження робочої поверхні ($t = t^*$) прийме вид:

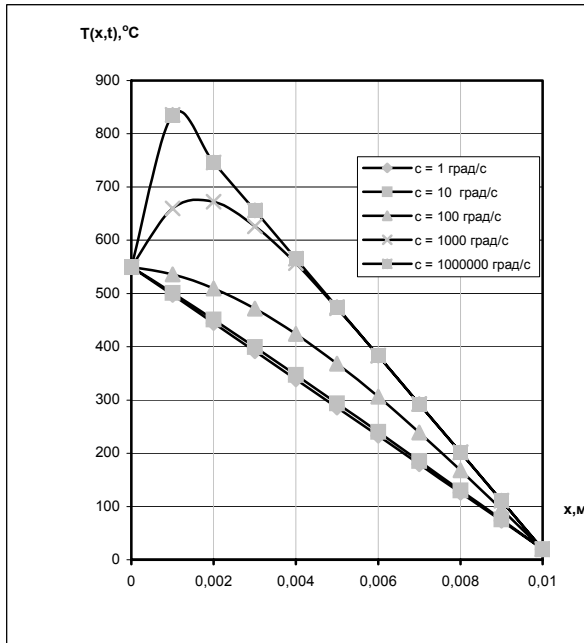


Рис. 1. Розподіл температури в зразку $l_3 = 0,01$ м в залежності від швидкості охолодження поверхні c

$$T(x,t^*) = T_0 + (T_l - T_0) \frac{x}{l} + \frac{2cl^2}{\pi^3 a^2} \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^3} \{1 - \exp[-(\frac{\pi n}{l})^2 a^2 t^*]\} \sin(\frac{\pi n}{l} x) \quad (8)$$

У порівнянні з (5) маємо зникнення релаксаційного компонента внутрішньої післядії після нагрівання $w(x,t)$.

На рис. 1 приводяться розподіли температури в зразку $l_3 = 0,01$ м, в кінці процесу охолодження робочої поверхні з рівноважного стану після нагрівання при різних швидкостях охолодження c . Число членів ряду у відхиленні розподілу (8) бралось рівним 100.

Якщо для невисоких швидкостей охолодження можна лише говорити про існування й визначати положення максимального відхилення температури $\Delta T(x,t)$ у зразках від її рівноважного значення, то для значних темпів охолодження, особливо в протяжних зразках, формується максимум у самому розподілі температури $T(x,t)$ (для зразка $l_4 = 0,02$ м навіть при швидкості охолодження 100 К/с), який впливає на глибину дифузії в поверхневому шарі. Положення максимуму в розподілі температури вздовж зразка у момент закінчення охолодження поверхні можна визначити зі співвідношень (5), прирівнюючи нулю градієнт температури $\partial T/\partial x$.

При збільшенні швидкості охолодження відбувається зсув максимального відхилення температури від рівноважного (граничного) компонента до охолоджуваної поверхні, або навпаки - зі збільшенням часу охолодження, максимум відхилення рухається в напрямку середини зразка. Цей процес можна інтерпретувати, як виникнення

температурної хвилі, швидкість якої можна визначити зі співвідношення

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \{1 - \exp[-(\frac{\pi n}{l})^2 a^2 t]\} \cos(\frac{\pi n}{l} x) = 0, \quad (9)$$

виражаючи x як функцію t і беручи похідну dx/dt . Оцінка даної швидкості по релаксаційним кривим (рис. 2) дає величину порядку кількох мм/с. Покроковий розрахунок відхилення показує зростання швидкості хвилі з наближенням її до поверхні охолодження до 2 см/с (l_4) та 20 см/с (l_1).

На рис. 2 показаний характер переходу розподілу температури в найбільш інерційному зразку (l_4) після закінчення охолодження робочої поверхні з високою швидкістю ($c=10^3$ К/с) до рівноважного стану. Відслідковуючи процеси релаксації, можна відмітити зсув зазначених максимумів від нагрітої поверхні до середини зразка - температурні хвилі. У глибині зразків релаксація протікає повільніше, ніж поблизу поверхні, а на однаковій глибині - відхилення завжди менше, чим менше швидкість охолодження.

При комбінуванні швидкостей охолодження c і нагрівання b , у випадку, коли релаксаційна витримка після нагрівання поверхні відсутня, відбувається взаємна компенсація відхилень температури (6) та (7)

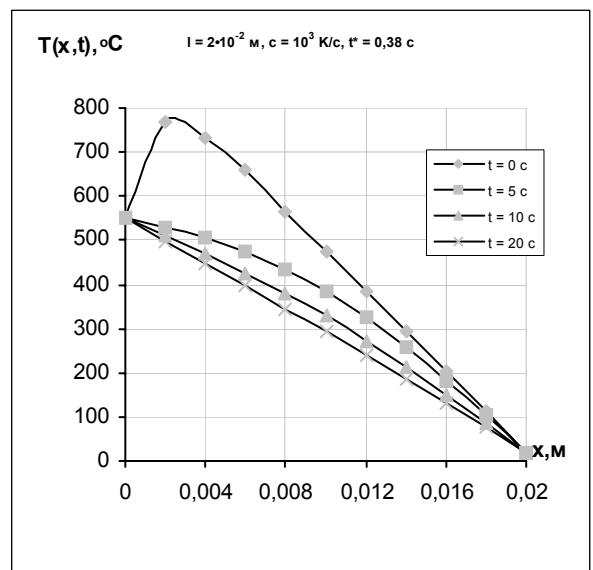


Рис. 2. Релаксація температури в зразку $l_4 = 0,02$ м після закінчення охолодження поверхні з швидкістю $c = 10^3$ К/с

в залежності від величин c і b , і, таким чином, можна варіювати глибиною температурного впливу місцевої термообробки, наприклад на процеси дифузії. Тенденція гасіння відхилення температури при охолодженні підсилюється з ростом швидкості нагрівання, особливо при високих швидкостях охолодження й збільшенні довжини зразків, що обумовлено скороченням часу для релаксацій і зростанням інерції об'єкта. Релаксація температури після закінчення циклу місцевої термообробки значно прискорюється.

Висновки

Проведено розрахунок температурного поля в однорідних металічних зразках в умовах місцевого нагрівання й охолодження для одновимірної моделі. Результати розрахунку застосовані для низьковуглецевих сталей.

Аналітично отриманий розподіл температури в зразках при охолодженні оброблюваної поверхні від 930 °С до 550 °С за лінійним законом при фіксованій температурі задньої поверхні зразків. У розрахунку розглянуті два варіанти охолодження - з врахуванням попереднього місцевого нагрівання та з рівноважного стану.

Для швидкостей охолодження поверхні зразків нижче 50-100 К/с у всіх зразках установлюється в процесі охолодження розподіл температури близький до рівноважного. Нерівноважність розподілу проявляється при швидкостях охолодження понад 100 К/с.

Для високих швидкостей охолодження, характерних для лазерної обробки та впливу вибухом, у розподілі температури формується максимум, положення якого залежить від швидкості охолодження й довжини зразків. Для протяжних зразків максимум утворюється й при більш низьких швидкостях охолодження (~ 1000 К/с). Зсув температурного максимуму в процесі обробки й релаксації - температурна хвиля - відбувається зі швидкістю, що досягає 1-10 см/с. Комбінуючи швидкостями нагрівання й охолодження робочої поверхні зразків, можна керувати глибиною дифузії в поверхневому шарі.

У результаті аналізу релаксаційних процесів у зразках, отримані значення часових інтервалів переходу до рівноважного розподілу температур, що може бути використано для розрахунку параметрів термодифузійної обробки.

- [1] Б.С. Бокштейн. *Диффузия в металлах*. Металлургия, М. 248 с. (1978).
- [2] Н.Н. Рыкалин, А.А. Углов, И.В. Зуев, А.Н. Кокора. *Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов*. Машиностроение, М. 496 с. (1985).
- [3] В.И. Цоцко, А.И. Денисенко. Температурные характеристики поверхностного слоя низкоуглеродистых сталей в условиях линейного нагрева поверхности // *Вісник Дніпропетровського національного університету*, 2/2(12), сс. 72-77 (2004).
- [4] А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. *Уравнения математической физики*. Наука, М. 736 с. (1972).
- [5] О.В. Верняев. *Активные рабочие органы культиваторов*. Машиностроение, М. 80 с. (1983).
- [6] В.П. Вейко. *Лазерная обработка пленочных элементов*. Машиностроение, Ленингр. отд-ние. 248 с. (1986).
- [7] Г.Н. Эпштейн. *Строение металлов, деформированных взрывом*. Metallurgia, М. 256 с. (1980).

V.I. Tsotsko¹, I.M. Spiridonova², B.I. Peleshenko¹, A.I. Denisenko³

Distribution of One-dimensional Sample Temperature in Conditions of Local Thermal Treatment

¹Dnepropetrovsk State Agrarian University, Voroshylova Str., Dnepropetrovsk, 49600, Ukraine, E-mail: dsaupelesh@mail.ru

²Dnepropetrovsk National University, Naukovy Side Str., 13, Dnepropetrovsk, 49050, Ukraine

³National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarina Ave., 4, Dnepropetrovsk, 49600, Ukraine

A temperature field in the depth of metal samples has been examined in conditions of linear increasing and subsequent decreasing of the surface temperature of a one-dimensional model. The results of estimation have been applied for low-carbon steels. Distributions of temperatures in the samples on heating and cooling of the processed surface in a set temperature interval have been received analytically. There has been analyzed influence of speed of the surface cooling on the temperature field in the samples in a wide range. The dynamics of temperatures of the sample surface layers has been studied. The received results may be used in the processes of local treatment of parts in conditions of diffuser saturation of the surface layer as well as for estimation of thermocyclic treatment parameters.