

УДК 539.3

Асташкін В. І.¹, к. ф.-м. н., с. н. с.,
Гачкевич О. Р.^{1,2}, д. ф.-м. н., проф.,
Козакевич Т. В.¹, к. ф.-м. н.,
Равська-Скотнічни А.², д. т. н., доц.

Оптимізація залишкового напруженого стану сталевих пластин при дії рухомих джерел тепла за врахування структурних перетворень

Розроблено методику параметричної оптимізації характеристик рухомих джерел тепла (з одним та декількома центрами локалізації) відносно відсоткового вмісту мартенситу (за критерієм мінімуму максимального вмісту мартенситу). Методику використано з метою збільшення пластичних властивостей зони термічного впливу за зменшення рівня залишкових напружень.

Ключові слова: параметрична оптимізація, рухомі розподілені джерела тепла, фазовий склад, залишкові напруження, мартенсит.

¹ Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України 79060, м. Львів, вул. Наукова, 3-б
e-mail: tv.kozakevych@gmail.com

² Політехніка Опольська, Польща, 45-061, м. Ополе, вул. Катовицька, 48
e-mail: dept13@iapmm.lviv.net

У працях [1, 2] отримано інтерполяційні аналітичні співвідношення, що визначають механічні характеристики маловуглецевих низьколегованих сталевих взірців (твердості, границі міцності, видовження, в'язкості та ін.) від часу τ^0 охолодження в інтервалі температур евтектоїдних перетворень ($850 \div 500^{\circ}\text{C}$), в залежності від їх хімічного складу, а також відсоткового вмісту фазових складових (мартенситу, бейніту і ферито-перліту), що утворюються внаслідок розпаду аустеніту. При цьому залежність механічних характеристик металу від властивостей і суті фазових складових отримано в адитивній формі – інтерполяційні залежності адитивні за фазовими складовими.

На основі згаданих вище результатів досліджень отримано, що найбільшу твердість і міцність має метал з переважно мартенситною структурою, а найменші – з ферито-перлітною. При цьому зменшення відсоткового вмісту мартенси-

V. I. Astashkin¹, PhD (Phys.-Math.), sen. res.,
A. R. Hachkevych^{1,2}, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.,
T. V. Kozakevych¹, PhD (Phys.-Math.),
A. Rawska-Skotniczny², Dr. Sci. (Tech.), Ass. Prof.

Optimization of residual stress state for steel plates under moving heat sources subject to structural transformation

Developed a method of parametric optimization of moving heat sources (with single and multiple centers of localization) characteristics relative to percentage of martensite (by the criterion of minimum of martensite content maximum). Methodology used in order to increase the plastic properties of heat affected zone subject to reduction of residual stresses.

Key Words: parametric optimization, movable distributed heat source, phase composition, residual stresses, martensite.

¹ Pidstryhach Institut for Applied Problems of Mechanics and Mathematics of NASU 79060, L'viv, Naukova str. 3-b
e-mail: tv.kozakevych@gmail.com

² Opole University of Technology, 45-061, Opole, Katowicka str., 48
e-mail: dept13@iapmm.lviv.net

ту збільшує пластичні властивості металу. Тому з метою збільшення пластичних властивостей зони термічного впливу (ЗТВ), яке здійснюється за різних видів цільової термообробки елементів конструкцій і машин за їх виготовлення, за зменшення рівня залишкових напружень, розроблено відповідну методику параметричної оптимізації характеристик рухомих розподілених джерел тепла (з одним та декількома центрами локалізації) відносно відсоткового вмісту мартенситу (за критерієм мінімуму максимального вмісту мартенситу).

Математична постановка задачі оптимізації

Розглядається віднесена до декартової системи координат (x_1, x_2, x_3) тонка ізотропна сталеві пластина товщиною $2h$. Відомий розподіл початкової температури в кожній точці пластини. Вона локально нагрівається симетричними відносно

серединної поверхні рухомими нормально розподіленими джерелами тепла \bar{Q} (що рухаються прямолінійно зі сталою швидкістю v в напрямку осі Ox_1) до температур вищих від A_{c3} (температури повної аустенізації сталі) в окремих її підобластях ($|x_2| < \delta$, $|x_3| < h$, де δ – півширина ЗТВ по осі Ox_2 , в якій температура пластини $T > A_{c3}$). Пластина перебуває в умовах конвективного теплообміну зі зовнішнім середовищем за одного коефіцієнта тепловіддачі з поверхонь пластини.

Пластина зазнає теплового впливу, зумовленого дією системи нормально розподілених рухомих джерел тепла \bar{Q} , з декількома центрами локалізації: \bar{Q}_1 – головне джерело; \bar{Q}_2 , \bar{Q}_3 – додаткові джерела ($Q_2^* = Q_3^*$) (L_1 – відстань між двома додатковими джерелами тепла, при $L_1 = 0$ – додаткове джерело одне, його центр розташований на відстані L від центру локалізації головного джерела \bar{Q}_1). Джерела рухаються вздовж осі Ox_1 (по центру пластини) зі швидкістю v . При $L = 0$ додаткових джерел тепла немає.

Температурне поле в тонкій пластині визначаємо рівнянням теплопровідності за наявних початкової та крайових умов в області Ω [3]. Вміст фазових складових: мартенситу, бейніту і феритоперліту окреслюємо з використанням відомої математичної моделі опису фазового складу і залишкового напруженого стану низьколегованого маловуглецевого сталювого тіла, зумовлених високотемпературним нагрівом за наявності зони повної аустенізації, після завершення процесу монотонного охолодження. У цій моделі вміст фазових складових пов'язаний з часом перебування точок тіла в діапазоні температур поліморфних перетворень і хімічним складом сталі та визначається наявними у літературі інтерполяційними залежностями, отриманими на основі результатів статистичної обробки термодинамічних діаграм розпаду аустеніту у відповідних сталевих взірцях. А залишковий напружений стан, що зумовлений вмістом і розподілом фазових складових, визначається змінами питомого об'єму при-

сутніх складових за охолодження на основі підходу умовних залишкових деформацій.

За математичної постановки задачі оптимізації характеристик рухомих розподілених джерел тепла приймаємо:

– за оптимізаційну умову – мінімум функціоналу максимального вмісту мартенситу M_{\max} (за наявних умов теплового впливу), тобто

$$M_{\max}(\bar{Q}) \rightarrow \min; \quad (1)$$

– за функції управління:

✓ $H(\bar{Q}_2(L, Q_2^*))$ за наявності одного додаткового джерела \bar{Q}_2 , яке розташоване на віддалі L по осі Ox_1 від першого (головного) джерела \bar{Q}_1 ;

✓ $H(\bar{Q}_3(L, L_1, Q_2^*, Q_3^*))$ за наявності двох додаткових однакових за потужністю джерел \bar{Q}_2 , \bar{Q}_3 з центрами симетрично розміщеними відносно осі Ox_2 на віддалі L від головного джерела \bar{Q}_1 та на віддалі L_1 один від другого;

– за обмеження на змінні керування (вибрані з технологічних міркувань для забезпечення режиму монотонного охолодження) – умови:

$$\delta \leq L \leq 3\delta; \quad 0 \leq L_1 \leq 2\delta; \quad (2)$$

$$0 \leq Q_2^* \leq Q_1^*/4, \quad 0 \leq Q_3^* \leq Q_1^*/4. \quad (3)$$

Параметрична оптимізація здійснювалася послідовним перебором по кожній змінній керування (починаючи з встановлення координат розміщення центрів локалізації з наступним знаходженням потужностей джерел тепла за врахування умов). Багатомірна оптимізація проводилась за 2-3 етапи в залежності від кількості змінних керування в конкретній задачі [4].

Числові дослідження

За розглянутих схем нагріву (за наявності одного (основного) джерела, його та одного чи двох додаткових) математичний опис джерел тепла має вигляд

$$\begin{aligned} \bar{Q} &\equiv \bar{Q}_1 = (Q_1^*/(2\pi\bar{\sigma})) \exp(-(x_2^2 + (x_1 - x_1^0)^2)/(2\bar{\sigma})), \\ \bar{Q} &\equiv \bar{Q}_1 + \bar{Q}_2 = \bar{Q}_1 + (Q_2^*/(2\pi\bar{\sigma})) \exp(-(x_2^2 + (x_1 - x_1^*)^2)/(2\bar{\sigma})), \\ \bar{Q} &\equiv \bar{Q}_1 + \bar{Q}_2 + \bar{Q}_3 = \bar{Q}_1 + (Q_2^*/(2\pi\bar{\sigma})) \exp(-((x_2 - x_2^*)^2 + (x_1 - x_1^*)^2)/(2\bar{\sigma})) + \\ &+ (Q_3^*/(2\pi\bar{\sigma})) \exp(-((x_2 - x_2^{**})^2 + (x_1 - x_1^*)^2)/(2\bar{\sigma})), \end{aligned} \quad (4)$$

де $x_1^0 = \nu\tau$, $x_1^* = \nu\tau - L$, $x_2^* = x_2 + L_1/2$, $x_2^{**} = x_2 - L_1/2$,
м; $\bar{\sigma}$ – параметр розсіювання, м²; x_1 і x_2 –
координати точок серединної площини пластини;
 τ – час; $\bar{Q}(x_1, x_2, \tau)$ – приведена (віднесена до
одиниці товщини) потужність джерела тепла; Q_1^*
– потужність головного джерела і Q_2^* , Q_3^*
($Q_2^* = Q_3^*$) – потужності додаткових джерел тепла
на одиницю довжини кВт/м.

Дослідження проведено для пластини з мало-
вуглецевої низьколегованої сталі 17Г1С з хіміч-
ним складом: Mn = 1,35%, C = 0,175%, Si = 0,5%,
 $\bar{\sigma} = 30 \cdot 10^{-6}$ м² при температурі навколишнього се-
редовища $t_c = 20$ °C; $Q_1^* = 800$ кВт/м, $\nu = 2 \cdot 10^{-3}$ м/с,

$\lambda = 4,42$ кВт/(м·°C); $a/(2h) = 2,34 \cdot 10^2$ Вт/(м³·°C);
 $c\rho = 5,52$ кДж/(м³·°C).

На рис. 1 приведено для одного з варіантів до-
сліджень результати розподілів температур (а),
фазових складових (б) та компонент залишкових
напружень відносно координати x_2 (в) при дже-
релі тепла з одним центром локалізації (стрілка
над рисунком вказує напрям руху основного дже-
рела, о – місце розташування центра локалізації
головного джерела; лінії відповідають: 1 –
500 °C; 2 – 723 °C; 3 – 850 °C; 4 – мартенсит, 5 –
бейніт, 6 – ферито-перліт, %; 7 – σ_{11} , 8 – σ_{22} , 9 –
інтенсивність напружень $\sigma_{\text{інт}}$, МПа).

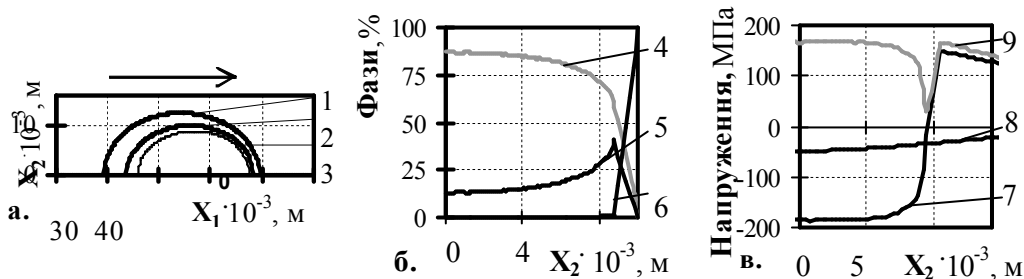


Рис. 1. Температурне поле, фазовий склад та напружений стан для сталеві тонкостінної пластини за локального високотемпературного нагріву одним (основним) джерелом

Отримано, що при додатковому джерелі тепла \bar{Q}_2 , вибором параметра його розміщення ($L = 20 \div 30 \cdot 10^{-3}$ м) і потужності ($Q_2^* = 40 \div 200$ кВт/м) можна регулювати рівні залишкових фазового та напруженого станів, зокрема за $L = 25 \cdot 10^{-3}$ м при параметрі потужності у п'ять разів меншому, ніж в основного джерела ($Q_2^* = 160$ кВт/м) максимальний вміст мартенситу зменшується в 1,8 раз і на 35% понижується значення максимальної інтенсивності напружень.

За нагріву трьома джерелами тепла (при геометричних параметрах $L = 20 \div 30 \cdot 10^{-3}$ м, $L_1 = 10 \div 20 \cdot 10^{-3}$ м та значеннях потужності додаткових джерел тепла $Q_2^* = Q_3^* = 40 \div 200$ кВт/м) отримана раціональна схема розміщення додаткових джерел тепла та їх потужності ($L = 25 \cdot 10^{-3}$ м, $L_1 = 14 \cdot 10^{-3}$ м, $Q_2^* = Q_3^* = 160$ кВт/м), за яких зменшується максимальний вміст мартенситу у 2,4 рази і значно згладжується нерівномірність його розподілу, що зумовлює пониження значення максимальної інтенсивності напружень у два рази.

Висновки

Запропоновано методику параметричної оптимізації характеристик рухомих розподілених джерел тепла (з одним та декількома центрами локалізації) при локальному технологічному високотемпературному нагріві, відносно відсоткового вмісту мартенситу (за критерієм мінімуму максимального вмісту мартенситу) при зменшенні значень залишкових напружень (для підвищення пластичних властивостей зони термічного впливу).

Сформульовано на основі запропонованої розрахункової схеми задач механіки за врахуванням структурних перетворень відповідні задачі для пластин за такого нагріву рухомими розподіленими джерелами тепла з одним, двома і трьома центрами локалізації.

Виявлено на основі аналізу отриманих розв'язків ряд нових закономірностей у розподілах залишкових напружень та фазових складових у пластині за різних термічних параметрів режимів нагріву. За наявності одного додаткового рухомого розподіленого джерела тепла (за оптимальних центру локалізації і параметра потужності при її

нормальному розподілі) максимальний вміст мартенситу може зменшуватись в 1,8 рази, а максимальні значення інтенсивності залишкових напружень на 35% у порівнянні з їхніми значеннями при одному (основному) рухомому розподіленому джерелі, а за наявності двох додаткових рухомих розподілених джерел тепла рівних за потужністю і симетрично розміщених відносно основного джерела (зі встановленими оптимальними центрами локалізації і параметром потужності цих джерел) ці значення зменшуються відповідно у 2,4 та 2,0 рази. Значення параметрів залишко-

вих фазового складу та компонент напружень істотно залежать від відсоткового вмісту конкретних легуючих хімічних елементів [5-6].

Отримані результати можна використати при розробці режимів технологічного високотемпературного нагріву рухомими джерелами тепла, що підвищують пластичні властивості ЗТВ за мінімізації залишкових напружень (шляхом зменшення вмісту гартувальних складових у структурі матеріалу).

Список використаних джерел

1. *Seeffarth P., Kassatkin O. G.* Calculation models to estimate the mechanical properties of the metal HAZ during welding of low-alloy steels // *Microstructure and Properties*. – 2002. – № 2. – P. 103-106. (in Russian).
2. *Makhnenko O. V., Seeffarth P.* Calculated forecasting of overall deformations of welded beams in laser welding // *Automatic welding*. – 2008. – № 3. – P. 14-20 (in Russian).
3. *Pidstryhach Ya. S., Lomakin V. A.* Thermoelasticity of bodies with heterogeneous structure – M. : Nauka, 1984. – 368 p. (in Russian).
4. Modeling and optimization in thermomechanics of electroconductive heterogeneous solids / Editors-in-Chief *Burak Ya. Yo., R. M. Kushnir* / V. 5 : Optimization and identification in thermomechanics of heterogeneous solids / *R. M. Kushnir, V. C. Popovych, A. V. Yasins'kyi*. – L'viv : SPOLOM, 2011. – 256 p. (in Ukrainian).
5. *O. Hachkevych, V. Astashkin, T. Kozakevych et al.* Calculation of the phase content of a steel plate at local heating // *Metallic Materials (Kovové Materiály)*. – 2007. – V. 45, № 6. – P. 319-325.
6. *V. Astashkin, O. Hachkevych, R. Kushnir, T. Kozakevych et al.* Uniform phase content optimal local heating of thin steel plates // *Optimization of production processes*; edit. M. Gajek. – Opole, Printing house of Opole University of Technology: Studies and monographs, 2008. – Z. 238, Ch. 1. – S. 11-21.

Надійшла до редколегії 31.03.13