

УДК 539.374:621.78

ВПЛИВ ПІДНАПЛАВНИХ ТРІЩИНОК НА ЗНИЖЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ДЕТАЛЕЙ ПІСЛЯ ЛАЗЕРНОГО НАПЛАВЛЕННЯ

І. Добрянський

Доцент, докт. техн. наук,
Львівський національний
аграрний університет,
м. Львів

Запропоновано розрахункову модель тертя і зношування двох мобільних контактуючих деталей, які притискаються зовнішньою силою і на поверхні однієї з яких зроблене лазерне наплавлення, під яким утворилася періодична система тріщинок. Сформульовано задачу визначення ресурсу деталі з лазерним наплавленням (часу, коли зітреться верхній шар лазерного наплавлення до контакту з тріщинками). Наведені числові дані свідчать, що піднаплавні тріщини значно знижують довговічність робочої деталі навіть після лазерного наплавлення.

термопроцес, зношування, тріщина, лазерне випромінювання, наплавлення

Вступ. Здебільшого лазерне опромінення матеріалів застосовують для їх поверхневого зміцнення, зварювання і різання. Це полягає у дії лазерного опромінення на локальну ділянку поверхні, поглинання лазерного випромінювання в приповерхневих ділянках матеріалу, внаслідок чого відбувається швидке розігрівання цієї ділянки до високих температур. Після закінчення дії лазерного випромінювання нагріта ділянка дуже швидко охолоджується в основному внаслідок теплопровідності у внутрішньому об'ємі металу, а також за рахунок тепловіддачі з поверхні. Це приводить до утворення мартенситних структур і зміцнення матеріалу у приповерхневих ділянках. Необхідні властивості поверхні за лазерного термозміцнення отримують створенням відповідного термічного циклу з заданими оптимальними параметрами, що визначаються максимальною температурою нагріву, швидкістю охолодження, часом перебування металу вище характерної температури.

Одними з поширених технологій лазерної обробки поверхні металу є лазерне поверхнєве гартування і лазерне наплавлення. За цих технологій утворюється

поверхневий шар з покращеними властивостями, особливо з високою твердістю і зносостійкістю.

Для розрахунку ресурсу (залишкового ресурсу) елементів конструкцій за відсутності дефектів застосовують критерії класичних теорій [1; 2], а за наявності дефектів – критерії механіки руйнування [3; 4]. У цих критеріях присутні характеристики довговічності матеріалів, які визначаються на основі прийнятих методик національних стандартів [5] і які можуть бути реалізовані у звичайних умовах заводської лабораторії на стандартному устаткуванні. Разом з тим, матеріали елементів конструкцій часто піддані дії різних опромінь, які спричинюють зміну їх міцності і довговічності, що не може бути знайдене в умовах заводської лабораторії. У таких випадках застосовують інші критерії міцності і довговічності матеріалів і зміну їх характеристик знаходять на основі нестандартних методик, реалізація яких вимагає спеціального устаткування та умов їх реалізації.

Постановка задачі. Поставимо за мету розробити критерії довговічності матеріалів (залишкової довговічності) у випадках їх лазерного опромінення. Ці критерії

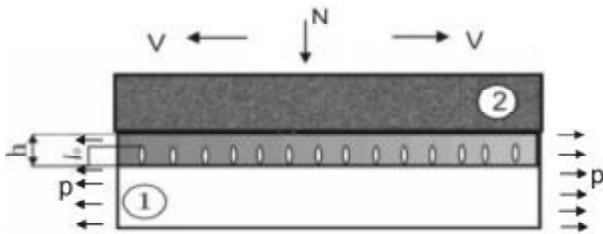


Рис. 1. Схема контактної взаємодії (тертя) поверхні деталі 1 після лазерного наплавлення з підповерхневими тріщинами з поверхнею іншої деталі 2

в подальшому застосовні для розв'язання інженерних задач із визначення довговічності й залишкової міцності матеріалів та елементів конструкцій після їх опромінення.

Результати дослідження. У певних випадках після лазерного наплавлення виникають поперечні внутрішні тріщини, що не виходять на поверхню наплавлених валиків. Уздовж валиків тріщини розміщуються на віддалі одна від одної від 1 мм і більше. Враховуючи це, розглянемо наступну розрахункову модель тертя і зношування двох мобільних контактуючих деталей 1 і 2, які притискаються силою N і на поверхні однієї з яких (деталь 1) зроблене лазерне наплавлення товщиною h , під яким утворилася періодична система тріщинок довжиною l_0 ($h > l_0$) (рис. 1).

Вважається, що деталь 1 розтягується циклічно рівномірно розподіленими зусиллями з амплітудою p . Задача полягає у визначенні ресурсу t_T деталі з лазерним наплавленням (часу, коли зітреться верхній шар лазерного наплавлення до контакту з тріщинками).

Для розв'язку цієї задачі будемо вважати, не зменшуючи загальності підходу, що $h \approx 2l_0$. Це дасть змогу отримати кількісну оцінку впливу піднаплавних тріщинок на зниження зносостійкості деталей після лазерного наплавлення. Задачу про стирання тіла 1 контртілом 2 будемо розглядати в рамках модельних представлень у роботі [6]. Водночас вважатимемо, що зносостійкість контртіла 2 набагато більша, ніж тіла 1, і при контактній взаємодії в основному буде стиратися тільки тіло 1. Контртіло рухається зворотно-поступально зі швидкістю v і циклічно навантажує поверхневий об'єм деталі 1.

На основі результатів [6] для визначення часу t_T стирання лазерного наплавлення, коли контртіло зітре частину наплавлення і буде контактувати з піднаплавними тріщинками, отримає математичну модель

$$\frac{dx}{dt} \frac{A}{v(\tau - \tau_0)^m} = 1, \quad (1)$$

за початкових і кінцевих умов

$$t = 0, \quad x(0) = 0; \quad t = t_T, \quad x(t_T) = x_*, \quad (2)$$

де A, m – характеристики зношування матеріалу тіла 1 в парі з тілом 2, які знаходять з експерименту [6]; v – швидкість руху контртіла 2 відносно деталі 1; x – лінійне зношування матеріалу тіла 1; τ – значення дотичних напружень при переміщенні контртіла 2 по деталі 1; τ_0 – максимальне значення τ , за якого не буде стирання тіла

1; x_* – значення лінійного стирання x , коли поверхня контртіла зустрінеться з піднаплавними тріщинами деталі 1. Величина x_* наперед не відома, і це пов'язано з такими міркуваннями. У той час, коли контртіло стирає частину лазерного наплавлення деталі 1, піднаплавні тріщини будуть втотно розвиватися в напрямі поверхні стирання за відповідного її циклічного навантаження.

Встановлення кінетики втотного поширення піднаплавних тріщин будемо здійснювати за допомогою відомого [7] енергетичного підходу, а також вважаючи, що матеріал наплавлених валиків є висококрихкий і під час дослідження його втотного руйнування можна користуватися лінійною механікою руйнування навіть для малих тріщин. У результаті цього невідомі величини t_T і x_* визначаємо на основі такої математичної моделі:

$$\frac{dl}{dN} = \frac{w_c}{\gamma_c - \gamma_t}; \quad \frac{d}{d\theta} \left[\frac{w_c}{\gamma_c - \gamma_t} \right]_{\theta=\theta_*} = 0 \quad (3)$$

за початкових і кінцевих умов

$$N = 0, \quad l(0) = 0; \quad N = N_*, \quad l(N_*) = l_*, \quad (4)$$

де N – кількість циклів навантаження поверхні деталі 1; l_* – довжина відростка втотної тріщини до зустрічі з поверхнею тертя; θ_* – кут поширення втотної тріщини (рис. 2);

$$W_C(l) = \int_0^{l_p} \sigma \delta_t(x) dx - \gamma_{th} = \int_0^{l_p} (\delta_{I\theta}(x) \sigma_t + \delta_{II\theta}(x) \tau_t) dx - \gamma_{th},$$

$$\delta_{I\theta} = \frac{K_{I\theta}^2}{2E \sigma_{i0t}^{(e)}}, \quad \delta_{II\theta} = \frac{K_{II\theta}^2}{2E \tau_t}, \quad \gamma_C = \delta_{fc} \sigma_t = \frac{K_{fc}^2}{E},$$

$$\gamma_t(l) = \delta_t \sigma = \delta_{It} \sigma_t + \delta_{IIt} \tau_t, \quad l_p = \frac{K_{I\theta}^2}{4\sigma_t^2}, \quad l_p = \frac{K_{II\theta}^2}{4\tau_t^2}; \quad (5)$$

l_p – довжина пластичної зони біля вершини тріщини; E – модуль Юнга; K_I, K_{II} – коефіцієнти інтенсивності напружень (КІН) біля вершини тріщини вздовж лінії її розміщення; $K_{I\theta}, K_{II\theta}$ – аналогічні значення вздовж напрямку під кутом θ до лінії розміщення тріщини; K_{fc} – критичне значення K_I за циклічного навантаження; σ – усереднені напруження в зоні передруйнування біля вершини тріщини; σ_t, τ_t – відповідні їх проекції; γ_C –

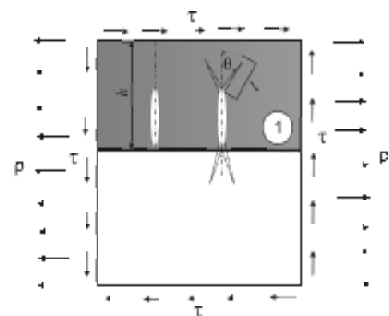


Рис. 2. Схема навантаження об'єму з лазерним наплавленням і поширення в ньому піднаплавних тріщин

густина енергії руйнування матеріалу біля вершини тріщини; γ_t – густина дисипації енергії пластичних деформацій у зоні передруйнування біля вершин тріщини за максимуму навантаження; $t_T = N_* \cdot T$; T – період зворотно-поступального руху контртіла.

На основі результатів робіт [3; 4] коефіцієнти інтенсивності напружень K_I , K_{II} для схеми навантаження тіла з періодичною системою тріщин (див. рис. 2) будуть визначатися наближено такими формулами:

$$K_{II} \approx \tau \sqrt{\pi l / \varepsilon} [\sqrt{3 / \pi} (1 - 0,2135\varepsilon + 0,0182\varepsilon^2 + 0,044\varepsilon^3 + 0,051\varepsilon^4 + 0,051\varepsilon^5) - 0,303\varepsilon^6 + 2,041\varepsilon^7 - 2,631\varepsilon^8 + 0,963\varepsilon^9],$$

$$K_I = p \sqrt{l / \lambda th \pi \lambda}, \quad \varepsilon = h / (l + h), \quad \lambda = l / h. \quad (6)$$

Використовуючи співвідношення (6), результати робіт [3; 4] і вважаючи, що $p \gg \tau$, розв'язок другого рівняння (3) можемо наближено записати так:

$$\theta_* \approx 0^0. \quad (7)$$

Тоді перше з рівнянь (3) матиме наступний вигляд при малих відростках l :

$$\frac{dl}{dN} = \frac{\alpha(1-R)^4 [K_{I\theta_{\max}}^4(\theta_*) - K_{th}^4]}{4\sigma_t E [K_{fC}^2 - K_{I\theta_{\max}}^2(\theta_*)]}, \quad (8)$$

за початкових і кінцевих умов

$$N = 0, l(0) = 0; \quad N = N_*, \quad l(N_*) = l_*. \quad (9)$$

Таким чином, на основі отриманих співвідношень (1) – (8) величина x_* лінійного стирання лазерного наплавлення і час цього стирання t_T до катастрофічного руйнування буде визначатися з наступної комплексної математичної моделі:

$$\frac{dx}{dt} \frac{A}{v(\tau - \tau_0)^m} = 1, \quad \frac{dl}{dN} = \frac{\alpha(1-R)^4 [K_{I\theta_{\max}}^4(\theta_*) - K_{th}^4]}{4\sigma_t E [K_{fC}^2 - K_{I\theta_{\max}}^2(\theta_*)]}, \quad (10)$$

за початкових і кінцевих умов:

$$t = 0, \quad x(0) = 0; \quad t = t_T, \quad x(t_T) = x_*; \quad (11)$$

$$N = 0, l(0) = 0; \quad N = t_T T^{-1},$$

$$l(t_T T^{-1}) = (h - x_* - l_0) \cos^{-1} \theta_*. \quad (12)$$

Інтегруючи систему рівнянь (10) за початкових і кінцевих умов (11), (12), отримаємо

$$t_T = x_* \frac{A}{v(\tau - \tau_0)^m}, \quad t_T = T(h - x_* - l_0) \cos^{-1} \theta_* \Psi,$$

$$\Psi = \frac{4\sigma_t E [K_{fC}^2 - K_{I\theta_{\max}}^2(\theta_*)]}{\alpha(1-R)^4 [K_{I\theta_{\max}}^4(\theta_*) - K_{th}^4]}. \quad (13)$$

З рівнянь (13), знайдемо

$$x_* = T\Psi(h - l_0) \cos^{-1} \theta_* A_T,$$

$$A_T = \left[\frac{A}{v(\tau - \tau_0)^m} + T\Psi \cos^{-1} \theta_* \right]^{-1},$$

$$t_T = T\Psi(h - l_0) \cos^{-1} \theta_* \frac{A}{v(\tau - \tau_0)^m} A_T. \quad (14)$$

У співвідношення (13), (14) входить величина КІН $K_{I\theta_{\max}}$, яку будемо визначати на основі [3; 4] таким чином:

$$K_{I\theta_{\max}} \approx K_I. \quad (15)$$

Для кількісної оцінки величини (15) задамо матеріал деталі 1 сталь марки СтУ8 ($T_{\text{гарт}} = 1063 \text{ К}$, $T_{\text{вінп}} = 460 \text{ К}$) з наступними характеристиками зносостійкості [6]: $v = 0,27 \text{ м/с}$; $A = 3,5 \cdot 10^7 \text{ (МПа)}^{-1,1}$; $m = 1,1$; $\tau_0 = 0,03 \text{ МПа}$ і втомі матеріалу досліджуваної деталі [8]: $R = 0,01$; $E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$; $E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$; $\sigma_t = 690 \text{ МПа}$; $K_{fC} = 43 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$; $K_{th} = 4,2 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$; $\alpha \approx 1$; $T = 1 \text{ с}$, а також її геометричними розмірами $h = 1,1 \text{ мм}$; $l_0 = 0,5 \text{ мм}$ і силовими параметрами навантаження $p = 400 \text{ МПа}$; $\tau = 2 \text{ МПа}$. Підставляючи ці величини в (14), знайдемо, що за наявності тріщинок $t_T = 37 \cdot 10^3 \text{ с}$, а в разі відсутності піднаплавних тріщинок $t_T = 68 \cdot 10^3 \text{ с}$. З наведених числових даних випливає, що піднаплавні тріщини значно знижують довговічність деталі 1 навіть після лазерного наплавлення.

Висновки. З проведених досліджень довготривалої міцності і довговічності елементів конструкцій після лазерної обробки випливає, що виникаючі в даному випадку залишкові напруження і дефекти можуть значно знизити їх експлуатаційні властивості. Відомі в літературі дослідження (див. [8]) показують, що на виникнення великих розтяжних залишкових напружень після лазерної обробки впливають потужність випромінювання, швидкість лазерної обробки, хімічний склад сплаву, його термообробка тощо.

У [9] показано, що уникнути утворення піднаплавних тріщин при лазерному наплавленні можна завдяки підбору швидкості наплавлення за певної густини потужності, введенню відповідних порошоків для утворення γ -фази у випадку сплавів на нікелевій і залізній основі, використанню попереднього підігріву і підбору пар наплавлення і підкладки з близькими коефіцієнтами термічного розширення. Усе викладене підтверджує той факт, що для якісної лазерної обробки металевих деталей, яка дасть змогу уникнути вищезгаданих факторів зниження їх функціональних властивостей, необхідно проводити оптимізацію її основних технологічних параметрів.

Література

1. Мухелишвили Н. И. Некоторые основные задачи математической теории упругости / Н. И. Мухелишвили. – М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1949. – 635 с.

2. *Справочник по сопротивлению материалов / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев ; отв. ред. Г. С. Писаренко. – 2-е изд., перераб. и дополн. – К. : Наук. думка, 1988. – 736 с.*

3. *Панасюк В. В. Основы механики разрушения / В. В. Панасюк, О. С. Андрейкив, В. З. Партон.– К. : Наук. думка, 1988. – 488 с.*

4. *Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения / Г. П. Черепанов. – М. : Наука, 1974. – 640 с.*

5. *Панасюк В. В. Методы оценки трещиностойкости конструкционных материалов / В. В. Панасюк, О. С. Андрейкив, С. Е. Ковчик. – К. : Наук. думка, 1977. – 278 с.*

6. *Андрейкив А. Е. Оценка контактного взаимодействия трущихся деталей машин / А. Е. Андрейкив, М. В. Чернец. – К. : Наук. думка, 1991. – 160 с.*

7. *Андрейкив О. С. Визначення залишкової довговічності тонкостінних елементів конструкцій при двоосьовому навантаженні / О. С. Андрейкив, М. Б. Кіт // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2006. – № 1. – С. 11–16.*

8. *Григорьянц А. Г. Основы лазерного термоупрочнения сплавов / А. Г. Григорьянц, А. Н. Сафронов. – М. : Высш. шк., 1988. – 159 с.*

9. *Григорьянц А. Г. Методы поверхностной лазерной обработки / А. Г. Григорьянц, А. Н. Сафронов. – М. : Высш. шк., 1987. – 191 с.*

Отримана 12.02.13

I. Dobryanskyi

Influence of the surfacing cracks on the lowering of the wear out parts after laser fusing

*Lviv National Agricultural University,
Lviv*

Is proposed the calculation model friction and wear two mobile contractions parts, which pressing of external force and the surface one which is made laser fusing under some periodic system cracks is formed. The problem determination resource part with laser fusing (time when erase upper layer laser fusing to contacting with cracks). Given numerical data evidence that surfacing cracks much lower long-lived working part even after laser fusing.

Інформація

The IUTAM 2013 Symposium on **MULTISCALE MODELING AND UNCERTAINTY QUANTIFICATION OF MATERIALS AND STRUCTURES**

The purpose of the Symposium is to promote achievements in uncertainty quantification combined with multiscale modeling and to encourage research and development in this growing field with the aim of improving the safety and reliability of engineered materials and structures.

Objectives

Over the last few years, the development of multiscale modeling in a stochastic setting for uncertainty quantification and reliability analysis of materials and structures, as well as the integration of stochastic methods into a multiscale framework is becoming an emerging research frontier.

The purpose of this Symposium is to promote achievements in uncertainty quantification combined with multiscale modeling and to encourage research and development in this growing field with the purpose of improving the safety and reliability of engineered materials and structures. The Symposium is expected to act as a forum for researchers in the field where recent advances will be discussed and future research directions will be identified.

Symposium Topics

The Symposium topics include (the list is indicative):

Random field modeling of multiscale systems

Multiscale methods involving uncertainties

Microstructure/morphology characterization

Concept of Representative Volume Element in elasticity, plasticity, and fracture/damage

Strength upscaling of statistical defects at micro- and nano-scale

Homogenization of random heterogeneous materials

Stochastic fracture and damage

Wave propagation in random media involving multiple length and time scales

Validation of stochastic multiscale modeling techniques

Secretariat

Institute of Structural Analysis and Antiseismic Research

National Technical University of Athens

Zografou Campus, Athens 15780, Greece

Tel.: +30 210 7723450; Fax: +30 210 7721693

E-mail: info@iutam2013-ntua.org; URL: www.iutam2013-ntua.org