

ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТРІЩИНОК В НАПЛАВЛЕНИХ ВАЛИКАХ НА ПОНИЖЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ДЕТАЛЕЙ ЗА ВИСОКИХ ТЕМПЕРАТУР

Добрянський І.М., Добрянська Л.О., Боднар Ю.І., Іваник Є.Г.

Львівський національний аграрний університет
м. Львів, Україна

АНОТАЦІЯ: На основі енергетичного підходу розроблена розрахункова модель для визначення залишкового ресурсу елемента конструкції з лазерним наплавленням, в якому з'явилася технологічна тріщина. Проведені при цьому обчислення показали, що ресурс балки з тріщиною може бути на порядок менший, ніж без тріщини.

АННОТАЦИЯ: На основе энергетического подхода разработана расчетная схема для определения остаточного ресурса элемента конструкции с лазерным наплавлением, в котором образовалась технологическая трещина. Проведенные при этом исследования показали, что ресурс балки с трещиной может быть на порядок меньше, чем без трещины.

ABSTRACT: On the energetic approach the calculating model for determination of the residual resource of the element construction with laser influx where appear technologic crack is made. Calculating shown that resource of the beam with crack is to order lesser than without crack.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: Наплавлений валик, тріщина, лазерне наплавлення.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

У більшості випадків 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 проходить швидкий розігрів цієї ділянки до високих температур. Після закінчення дії лазерного випромінювання нагріта ділянка дуже швидко охолоджується в основному внаслідок теплопровідності по внутрішніх об'ємах 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.

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Найпоширенішою з технологій лазерної обробітки поверхні металу є лазерне поверхнєве гартування і лазерне наплавлення [1-3]. За цих технологій утворюється поверхневий шар з покращеними властивостями, особливо з високою твердістю і зносостійкістю.

У результаті лазерної обробітки в наплавлених валиках можуть утворюватися тріщинки поперек валика на його повну товщину. Якщо деталь з таким лазерним обробітком працює під напруженням за високих температур, то її довготривала міцність може бути вичерпана раніше, ніж це було прогнозовано без врахування наявності вище згаданої поверхневої тріщинки. Проте підвищення вимог до міцності та стійкості зварних конструкцій, а також необхідність економії металу і енергії не зменшує актуальності проблеми визначення параметрів технології локальної термообробки.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Продемонструємо це на прикладі: нехай прямокутна балка шириною H пройшла по одній поверхні лазерне наплавлення на товщину h , в якому, як було відзначено у праці [1], з'явилася поверхнева тріщина глибиною $l_0 = h$ (рис. 1). Вважається, що така балка піддана дії довготривалого статичного розтягу рівномірно розподіленими зусиллями інтенсивності p в умовах високотемпературного поля, яке забезпечує в пластичній зоні біля контуру тріщини високотемпературну повзучість. Задача полягає у визначенні такого часу навантаження $t = t_*$, по досягненню якого тріщина високотемпературної повзучості буде поширюватися, досягне критичного розміру $l = l_*$ і балка зруйнується.

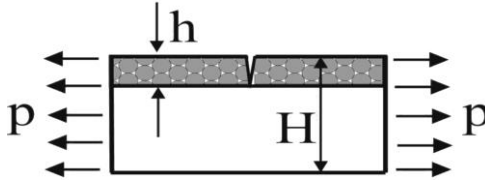


Рис. 1. Схема навантаження балки з поверхневою тріщиною в лазерному наплавленні

РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ

Реалізацію такої задачі будемо здійснювати на основі відомого [2, 3] енергетичного підходу. Згідно цього підходу визначення залишкового ресурсу $t = t_*$ балки із малою тріщиною будемо визначати із такого диференціального рівняння

$$dl/dt = A_m [\delta_t(l) \delta_c^{-1}]^m [1 - \delta_c^{-1} \delta_t(l)] \quad (1)$$

де A_m, m – характеристики високотемпературної повзучості [2, 3];

$\delta_t(l)$ – біжуче розкриття тріщини в її вершині;

δ_c – критичне значення $\delta_t(l)$.

Для повноти математичної моделі до рівняння (1) додамо початкову

$$t = 0, \quad l(0) = l_0, \quad (2)$$

і кінцеву умови

$$t = t_*, \quad l(t_*) = l_*, \quad (3)$$

де критичну довжину $l = l_*$ визначають із критерію критичного розкриття тріщини

$$\delta_t(l_*) = \delta_c. \quad (4)$$

Проінтегрувавши рівняння (1) за початкових (2) і кінцевих (3) умов для визначення періоду $t = t_*$ докритичного росту тріщини високо температурної повзучості (довготривалої міцності балки і її ресурсу), отримаємо таку формулу

$$t_* = \int_{l_0}^{l_*} \frac{[1 - \delta_c^{-1} \delta_t(l)]}{A_m [\delta_t(l) \delta_c^{-1}]^m} dl. \quad (5)$$

Формулу (5) можна записати в безрозмірному вигляді

$$t_* = HA_m^{-1} \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_*} \frac{[1 - \delta_c^{-1} \delta_t(\varepsilon)]}{[\delta_t(\varepsilon) \delta_c^{-1}]^m} d\varepsilon, \quad \varepsilon_0 = hH^{-1}, \quad \varepsilon_* = l_* H^{-1}. \quad (6)$$

У рівняння (6) входить величина $\delta_t(\varepsilon)$, що визначає розкриття тріщини в її вершині. Для наближеного визначення цієї величини застосовуємо відомий [4] метод еквівалентних станів. На основі цього, а також результатів роботи [5] для наближеного визначення величини $\delta_t(\varepsilon)$ отримуємо таку формулу

$$\delta_t(\varepsilon) = -\frac{\sigma_t H}{\pi E} \ln\left(\cos \frac{\pi p}{2\sigma_t}\right) f(\varepsilon),$$

$$f(\varepsilon) = \varepsilon[1,121 - 0,231\varepsilon + 10,55\varepsilon^2 - 21,72\varepsilon^3 + 30,39\varepsilon^4]^2. \quad (7)$$

Підставляючи співвідношення (7) у (6), для визначення ресурсу $t = t_*$ балки з тріщиною отримаємо таку формулу

$$t_* = -HA_m^{-1} \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_*} \frac{\left[1 + \delta_c^{-1} \frac{\sigma_t H}{\pi E} \ln\left(\cos \frac{\pi p}{2\sigma_t}\right) f(\varepsilon)\right]}{\left[\frac{\sigma_t H}{\pi E \sigma_c} \ln\left(\cos \frac{\pi p}{2\sigma_t}\right) f(\varepsilon)\right]^m} d\varepsilon. \quad (8)$$

У формулу (8) входить величина невідома величина ε_* , яку визначаємо на основі співвідношень (4), (6) і (7). В результаті цього для визначення величини ε_* отримаємо таке рівняння

$$\varepsilon_* [1,121 - 0,231\varepsilon_* + 10,55\varepsilon_*^2 - 21,72\varepsilon_*^3 + 30,39\varepsilon_*^4]^2 = -\frac{\pi E \delta_c}{\sigma_t H} \ln^{-1}\left(\cos \frac{\pi p}{2\sigma_t}\right). \quad (9)$$

Таким чином, коли відомі характеристики матеріалу $\delta_c, A_m, m, \sigma_t, E$, геометричні параметри балки h, H і її навантаження p , то період $t = t_*$ докритичного росту тріщин високотемпературної повзучості (залишковий ресурс балки) визначають із співвідношень (8), (10).

Розглянемо приклад розрахунку залишкової довговічності $t = t_*$ балки шириною $H = 0,1$ м із сталі 15X1M1Ф після лазерного обробітку однієї із її поверхонь (лазерне наплавлення), яка розтягується рівномірно розподіленими зусиллями p за температури 560 °С і в лазерному напавленні якої є тріщинка на всю товщину лазерного наплавлення $h \approx 1$ мм. На основі результатів роботи [6] знайдемо, що для згаданої сталі і умов випробування будуть наступні характеристики $E = 2 \cdot 10^5$ МПа; $\delta_c = 0,53$ мм; $m = 2,3$; $A_m = 0,014$ м/год.

Підставляючи ці дані у формулу (8), після виконання необхідних перетворень, отримуємо

$$t_* = -7,143 \int_{0,01}^{\varepsilon_*} \frac{[1 + 0,162 \ln(\cos 0,003 p) f(\varepsilon)]}{[0,162 \ln(\cos 0,003 p) f(\varepsilon)]^{2,3}} d\varepsilon. \quad (10)$$

Для кожного значення p величина ε_* , яка входить в співвідношення (10), визначається із рівняння (9).

РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЛОВОГО АНАЛІЗУ

За формулою (10) на рис. 2 побудована графічна залежність залишкового ресурсу балки $t = t_*$ від величини зовнішнього навантаження p (крива 1).

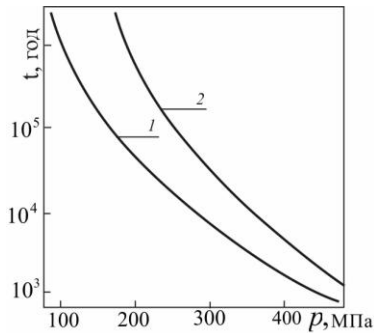


Рис. 2. Залежність залишкового ресурсу балки від величини зовнішнього навантаження: 1 – з тріщиною; 2 – без тріщини

Разом з тим, на основі методики, викладеної в роботі [7], були побудовані для сталі 15X1M1Ф діаграми високотемпературної повзучості за температури 560 °С і знайдені часи до руйнування гладких зразків без тріщин за напруженнями $\sigma = 200; 300; 400$ МПа. На основі цих даних знайдені коефіцієнти у формулі, поданої у праці [7]

$$t_* = B\sigma^{-\alpha}. \quad (11)$$

Формула (11) визначає час до руйнування гладких зразків за високотемпературної повзучості через напруження σ . Тут B, α визначаються експериментально [7] на гладких зразках, про що згадувалося вище. В результаті цього для сталі 15X1M1Ф дана формула прийме наступний вигляд

$$t_* = 9 \cdot 10^{20} \sigma^{-6,6}. \quad (12)$$

На основі формули (12) виконано числовий розрахунок, результати якого показано на рис. 2, де відображено графічну залежність (крива 2) довговічності t_* зразків без тріщин із згаданої сталі від зовнішніх довготривалих навантажень $p = \sigma$. Як видно з рис. 2 наявність тріщини на поверхні зразка після лазерного обробітку значно знижує його довговічність за високотемпературної повзучості.

ВИСНОВКИ

На основі енергетичного підходу розроблена розрахункова модель для визначення залишкового ресурсу елемента конструкції з лазерним наплавленням, в якому з'явилася технологічна тріщина. Дана модель була застосована для визначення залишкового ресурсу балки з наплавленням і тріщиною за довготривалого розтягу при високій температурі. Проведені при цьому обчислення показали, що ресурс балки з тріщиною може бути на порядок менший, ніж без тріщини.

ЛІТЕРАТУРА

1. Григорьянц А.Г. Методы поверхностной лазерной обработки / А.Г. Григорьянц, А.Н. Сафронов. – М. : Высш. шк., 1987. – 191 с.
2. Андрейків О.Є. Математична модель для визначення періоду докритичного поширення тріщин високотемпературної повзучості в твердих тілах / О.Є. Андрейків, Н.Б. Сас // Доп. НАН України. – 2006. – №5. – С. 47–52.
3. Андрейків О.Є. Механіка руйнування металічних пластин при високо температурній повзучості / О.Є. Андрейків, Н.Б. Сас // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2006. – № 2. – С. 62–68.
4. Андрейкив А.Е. Усталостное разрушение и долговечность конструкций / А.Е. Андрейкив, А.И. Дарчук. – К. : Наук. думка, 1992. – 184 с.
5. Панасюк В.В. Методы оценки трещиностойкости конструкционных материалов / В.В. Панасюк, О.Є. Андрейкив, С.Е. Ковчик. – К. : Наук. думка, 1977. – 278 с.
6. Хромченко Ф.А. Ресурс сварных соединений паропроводов / Ф.А. Хромченко. – М. : Машиностроение, 2002. – 352 с.
7. Тайра С. Теория високотемпературной прочности материалов / С. Тайра, Р. Отани. – М. : Металлургия, 1986. – 280 с.

Стаття надійшла до редакції 02.04.2013 р.