

УДК 539.3

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ ПОВЕРХНІ
СТАЛЬНОЇ БАЛКИ НА ПОНИЖЕННЯ ЇЇ ДОВГОВІЧНОСТІ
В УМОВАХ ЛАЗЕРНОЇ ОБРОБКИ**

І. Добрянський, д.т.н.

Львівський національний аграрний університет

Постановка проблеми. Виготовлення, експлуатація й технологічне вдосконалення сучасних інженерних споруд, конструкцій та деталей машин і механізмів пов'язані з наявністю та використанням чинників зосередженого впливу, якими є концентровані джерела нагрівання, локалізовані силові навантаження, дефекти внутрішньої будови матеріалів. Останнім часом усе більшого поширення набувають засоби локалізованого впливу на елементи інженерних конструкцій, за допомогою яких формують і підвищують експлуатаційні параметри, які визначають працездатність та довговічність технічної системи. У багатьох випадках набутих властивостей не можна досягти відомими засобами технологічного впливу. При цьому треба взяти до уваги, що за дії і використання джерел зосередженого термомеханічного навантаження виникає низка проблем, які мають бути вирішені через створення, удосконалення та розвиток відповідних технологій. Однією з таких актуальних проблем є проблема кількісної оцінки напруженого стану інженерних конструкцій за дії зосереджених термомеханічних чинників впливу з подальшим поширенням на вивчення факторів зносостійкості, довговічності та докритичного поширення тріщин.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для розрахунку ресурсу (залишкового ресурсу) елементів конструкцій за відсутності дефектів застосовують критерії класичних теорій [1], а за наявності – критерії механіки руйнування [2; 3]. У цих критеріях присутні характеристики довговічності матеріалів, які визначаються на основі прийнятих методик національних стандартів [4] і які можуть бути реалізовані у звичайних умовах заводської лабораторії на стандартному устаткуванні. Водночас 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 такому разі застосовують інші критерії міцності і довговічності матеріалів, а зміна їх характеристик встановлюється на основі нестандартних методик, реалізація яких вимагає спеціального устаткування та умов.

Постановка завдання. Розглянемо задачу про довговічність прямокутної балки, яка піддана циклічному згину моментом M (рис. 1).

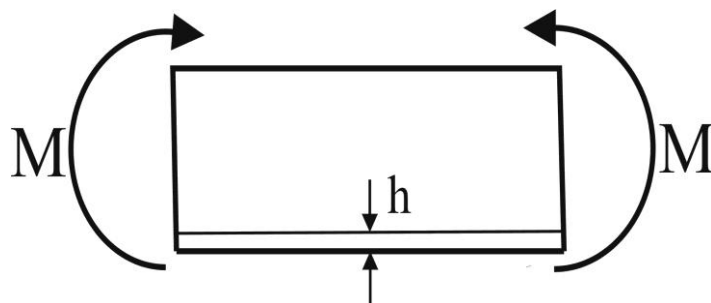


Рис. 1. Схема згину балки моментами M з лазерним гартуванням поверхні на глибину h .

Виклад основного матеріалу. Максимальні розтягувальні напруження у поперечному перерізі такої балки за її згину можна обчислити на основі відомої [1] формули:

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{W_x} + \sigma_z, \quad (1)$$

де M – згинальний момент; W_x – момент опору поперечного перерізу за згину. Вважається, що поверхня балки, яка розтягується за згину, була піддана лазерній обробці, що створила залишкові розтягувальні напруження з максимальним значенням σ_z . Задача полягає у визначенні довговічності балки, тобто виконанні критерію $N = N_p$.

Відповідно до сучасної теорії втоми (механіки сповільненого руйнування елементів конструкцій за змінних навантажень [1–3]) ресурс елемента конструкції N_p за змінних навантажень визначають так

$$N_p = N_3 + N_d. \quad (2)$$

У залежності (2) N_3 – період зародження втомної тріщини; N_d – період її докритичного росту. Це означає, що втомне руйнування елемента конструкції має дві стадії: зародження втомної тріщини та її докритичний ріст. Тобто розв’язок задачі подаємо у вигляді суми періодів зародження втомної тріщини N_3 та її докритичного росту N_d . Значення N_3 знаходимо на основі класичної теорії втоми, використовуючи рівняння ділянки

обмеженої довговічності діаграми Велера [5]. У результаті отримуємо

$$N_3 = N_0 10^{(MW_x^{-1} + \sigma_z)\sigma_0^{-1}}. \quad (3)$$

Тут у залежності (3) σ_0, N_0 – характеристики втомного руйнування матеріалів у межах області обмеженої довговічності ($10^4 \leq N \leq 10^7$), які визначають на основі експериментальних досліджень [5].

Знайдемо тепер період докритичного росту втомної тріщини довжини l , яка зародилася. Період докритичного росту тріщини N_D , що зародилася в таких елементах, визначаємо за допомогою відомої розрахункової моделі, викладеної в працях [2–4]. Відповідно до цієї моделі N_D визначаємо з таких співвідношень:

$$dl / dN = \alpha_0 (1 - R)^4 [K_{I \max}^4 - K_{I \min}^4] / 4\sigma_t E (K_{fc}^2 - K_{I \max}^2) \quad (4)$$

за початкових і кінцевих умов

$$N = 0, l(0) = l_0; \quad N = N_*, l(N_*) = l_*. \quad (5)$$

Тут $R = K_{I \min} / K_{I \max}$; α_0 – константа, яка визначається з експерименту [2–4]; $K_{I \max}, K_{I \min}$ – максимальне і мінімальне значення коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) K_I за цикл навантаження; K_{th} – значення K_I , за якого втомна тріщина не поширюватиметься; K_{fc} – критичне значення $K_{I \max}$; E – модуль пружності; l_0 – довжина тріщини, що зародилася; l_* – її критичне значення.

Проінтегрувавши диференціальне рівняння (4) за початкових і кінцевих умов (5), для визначення періоду докритичного росту втомної тріщини N_D отримаємо формулу

$$N_D = \frac{4\sigma_t E}{\alpha_0 (1 - R)^4} \int_{l_0}^{l_*} \frac{K_{fc}^2 - K_{I \max}^2}{K_{I \max}^4 - K_{th}^4} dl. \quad (6)$$

Отже, задача звелася до визначення коефіцієнта інтенсивності напружень K_I для силової схеми навантаження згину балки з тріщиною. Цю нову задачу з визначення K_I розв'язуємо за допомогою методу граничної інтерполяції [2]. Вважаємо, що значення K_I для нашого випадку буде приблизно таким, як і у разі згину моментом M смуги з поверхневою тріщиною довжини l такої самої ширини H і моментом опору поперечного перерізу W_x . У результаті цього і [2; 3] знайдемо формулу для наближеного визначення величини K_I :

$$K_I = \sqrt{H M W_x^{-1}} \sqrt{\pi \varepsilon} [1,12 + F(\varepsilon)], \quad F(\varepsilon) = 0,52 \sqrt{\varepsilon} (1 + 6,42 \varepsilon^2 - 6,53 \varepsilon^3 + 5,86 \varepsilon^4),$$

$$\varepsilon = \frac{l}{H}. \quad (7)$$

Підставляючи (7) у (6), для визначення періоду докритичного росту тріщини N_D отримаємо таку формулу

$$N_D = \frac{4\sigma_t EK_{fc}^2 H}{\alpha_0 K_{th}^4 (1-R)^4} \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_*} \frac{1-f_1(\varepsilon)}{f_2(\varepsilon)-1} d\varepsilon, \quad \varepsilon_* = \frac{l_*}{H}, \quad \varepsilon_0 = \frac{l_0}{H}, \quad (8)$$

причому $f_1(\varepsilon) = \frac{\pi(MW_x^{-1})^2 \varepsilon H}{K_{fc}^2} [1,12 + F(\varepsilon)]^2,$

$$f_2(\varepsilon) = \frac{\pi^2 \varepsilon^2 H^2 (MW_x^{-1})^4}{K_{th}^4} [1,12 + F(\varepsilon)]^4.$$

Отримані таким чином співвідношення (1), (2), (3) і (6) дають змогу подати ресурс N_p досліджуваної балки в такому вигляді:

$$N_p = N_0 10^{(MW_x^{-1} + \sigma_z) \sigma_0^{-1}} + \frac{4\sigma_t EK_{fc}^2 H}{\alpha_0 K_{th}^4 (1-R)^4} \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_*} \frac{1-f_1(\varepsilon)}{f_2(\varepsilon)-1} d\varepsilon. \quad (9)$$

Для того щоб скористатися формулою (9), необхідно знайти експериментально характеристики матеріалу N_0, σ_0 для зміцненого об'єму балки після лазерного гартування і втомні характеристики її вихідного матеріалу $E, K_{th}, K_{fc}, \sigma_t, \alpha_0$. Водночас необхідно задати геометричні параметри балки, залишкові напруження σ_z та її навантаження. Окрім того, у формулу (9) входить величина ε_0 , або, що те саме, l_0 . Ця величина є досить мала – порядку розміру структурного параметра матеріалу [5]. Але для практичного розрахунку, щоб зароджену тріщину вважати макроскопічною і правомірно користуватися формулою (9), можна вибирати величину $l_0 = h$, тобто глибині лазерного гартування, що згідно з [6] приблизно дорівнює 1 мм.

Розглянемо приклад розрахунку довговічності $N = N_p$ прямокутної балки зі сталі 09Г2С, яка згинається циклічно моментом M , а залишкові напруження від лазерного гартування вибираємо згідно з даними [6] – $\sigma_z = 300$ МПа. У цьому разі розрахунок проводитимемо згідно з формулою (9). Механічні й втомні характеристики сталі 09Г2С, які входять у формулу (9), визначатимемо згідно з даними [6]. У результаті для характеристик матимемо такі значення: $\sigma_0 = -333$ МПа; $\lg N_0 = 6,5$; $E = 2 \cdot 10^5$ Мпа;

$R = 0,1$; $\sigma_t = 400$ МПа; $K_{th} = 6,4$; $K_{fc} = 23a\sqrt{m}$ МПа; $\alpha_0 \approx 2$. На основі цих даних і формули (9) на рис. 2 побудована графічна залежність довговічності $N = N_p$ балки від середнього за шириною значення амплітуди σ напружень в її перерізі з врахуванням залишкових напружень σ_z в об'ємі лазерного гартування і без цього врахування.

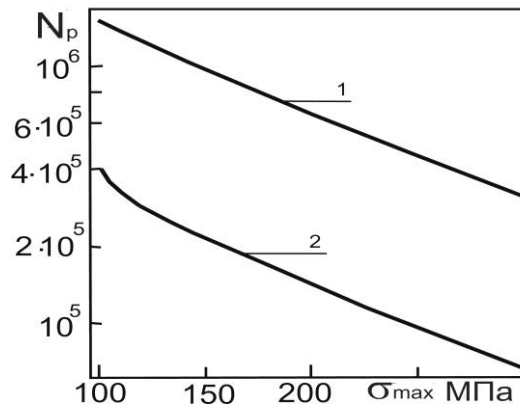


Рис. 2. Графічна залежність довговічності $N = N_p$ балки після лазерної обробки від амплітуди середніх напружень σ :

1 – без урахування залишкових напружень σ_z в поверхневому об'ємі лазерного гартування; 2 – з урахуванням σ_z .

Результати числового аналізу. Як видно з графіків, наведених на рис. 2, залишкові напруження σ_z в об'ємі поверхневого лазерного гартування значно знижують довговічність балки, а тому їх треба технологічно знімати або враховувати під час оцінки ресурсу елементів конструкцій. За допомогою формули (9) можна вибирати величину $l_0 = h$, тобто глибину лазерного гартування, що приблизно складає 1 мм [7].

Висновки. Розроблена розрахункова модель для визначення ресурсу елемента конструкції після лазерного гартування його поверхні з урахуванням залишкових поверхневих напружень, які при цьому виникають. На конкретному прикладі циклічного згину балки показано, що згадані залишкові напруження можуть знизити ресурс елемента конструкції у вісім разів.

Бібліографічний список

1. Сопротивление материалов деформированию и разрушению : справочник / под ред. Г. С. Писаренко. – К. : Наук. думка, 1993. – 286 с.
2. Панасюк В. В. Методы оценки трещиностойкости конструкционных материалов / В. В. Панасюк, О. Є. Андрейкив, С. Е. Ковчик. – К. : Наук. думка, 1977. – 278 с.
3. Хромченко Ф. А. Ресурс сварных соединений паропроводов / Ф. А. Хромченко. – М. : Машиностроение, 2002. – 352 с.
4. Осадчук В. А. Напряженно-деформированное состояние оболочек с разрезами / В. А. Осадчук. – К. : Наук. думка, 1985. – 224 с.
5. Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов / [О. Н. Романив, С. Я. Ярема, Г. Н. Никифорчин и др.]. – К. :

Наук. думка, 1990. – 660 с.

6. Сакара А. О. Визначення залишкової довговічності елементів металоконструкцій вантажопіднімальних машин / А. О. Сакара // Вісник Одеського національного морського університету : зб. наук. пр. – 2010. – № 27. – С. 147–156.

7. Григорьянц А. Г. Основы лазерного термоупрочнения сплавов / А. Г. Григорьянц, А. Н. Сафонов. – М. : Высш. шк., 1988. – 159 с.

Добрянський І. Дослідження впливу залишкових напружень поверхні сталльної балки на пониження її довговічності в умовах лазерної обробки

На моделі прямокутної балки, яка піддана дії циклічно змінного згинного моменту і поверхня якої оброблена лазерним опроміненням, поставлено задачу визначення її довговічності. Встановлено період докритичного росту тріщини і досліджено довговічність балки після лазерної обробки залежно від амплітуди середніх залишкових напружень.

Ключові слова: високоінтенсивний локальний нагрів лазерним опроміненням, залишковий ресурс, лазерне гартування, втомні тріщини, балка, довговічність.

Dobryanskyi I. Consideration of the residual stresses on the surface of the steel beam on the lowered their longlife at the laser processing

It is considered the problem about longlife of a rectangular beam which is located in a cyclic bend by constant moment in conditions of a laser irradiation of their surface. It is found a period of before critical growth of crack. It is also investigated a longlife tired residual stresses.

Key words: highintensive local heating by laser irradiation, residual resources, laser hardening, fatigue cracks, beam.

Добрянский И. Влияние радиационного облучения на напряженно-деформированное состояние железобетонной балочной конструкции

На модели прямоугольной балки, пребывающей в условиях воздействия циклически изменяющегося изгибающего момента, поверхность которой обработана лазерным облучением, поставлена и решена задача определения ее долговечности. Установлен период докритического роста трещины.

Ключевые слова: высокоинтенсивный локальный нагрев лазерным облучением, остаточный ресурс, лазерная закалка, усталостные трещины, балка, долговечность.