

Аналіз впливу термообробки на граничні напруження і циклічну довговічність зварних з'єднань

Іваник Є. Г.*, Сікора О.В.**

email: sikora60@mail.ru

* Львівська академія сухопутних військ

** Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка, кафедра інформатики та обчислювальної математики

Запропоновано метод розрахункової оцінки впливу залишкових зварних напружень та їх перерозподіл під дією локальної термообробки на величину граничних напружень і циклічну довговічність зварних з'єднань конструкцій, що дає можливість встановити закономірності зміни опору втомі зварних елементів залежно від параметрів локальної термообробки, типу з'єднань, параметрів зовнішнього навантаження.

Ключові слова: нестационарна температура, квазістатичні температурні напруження, фрикційне теплоутворення, контактуюча поверхня, шар скінченної товщини.

ВСТУП

Однією з основних задач сучасної техніки і практики застосувань зварювальних технологій є підвищення надійності і довговічності несучих металоконструкцій машин і споруд. Значна частина промислових зварних металоконструкцій, які знаходять застосування в інженерній практиці, експлуатуються в умовах змінного (зокрема, циклічно-змінного) навантаження. Несуча здатність більшості металоконструкцій (крани, екскаватори, будівельні і дорожні машини, вироби спеціального призначення) визначається головним чином опором втомі елементів зварних з'єднань.

Підвищення циклічної довговічності зварних металоконструкцій об'єктів машинобудування, автомобілебудування, які знаходять застосування в інженерній практиці, досягаються шляхом додаткової обробки, одним з основних способів такого зміцнення є термообробка. Цей шлях підвищення надійності і довговічності елементів зварних з'єднань, які експлуатуються в умовах циклічного навантаження, є перспективним та економічно доцільним.

Постановка проблеми про підвищення надійності і довговічності елементів зварних конструкцій. Міцність конструкційних матеріалів, особливо металів та їх сплавів, суттєво залежить від температури, тривалості та особливості навантаження [1–6]. У процесі циклічного навантаження відбувається зміна початкових значень залишкових напружень і тому оцінку опору втомі зварних елементів необхідно виконувати з урахуванням цього чинника [7; 8]. Однак закономірності зміни залишкових напружень при змінному навантаженні залежно від конструктивно-технологічних та експлуатаційних факторів мало вивчені, що стримує розвиток методів оцінки опору втомі на циклічну довговічність зварних елементів.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Подамо методику розрахункової оцінки ефективності заходів підвищення опору втомі зварних з'єднань, заснованих на перерозподілі залишкових напружень. При цьому беремо до уваги аналіз напруженого стану в зонах концентраторів зварних елементів з урахуванням залишкових напружень та їх зміни під дією локальної термообробки і циклічного навантаження [1–9].

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ДОСЛІДЖЕНЬ

Аналіз результатів втомних випробувань зварних з'єднань у вихідному стані та після термообробки [1; 2] вказує на те, що в умовах багатоциклового навантаження (циклів) похила ділянка кривих втоми досить добре описується залежністю

$$\sigma = A + B \lg N, \quad (1)$$

графік якої в півлогарифмічній шкалі системи координат $(\sigma, \lg N)$ має вигляд прямої лінії.

Рівняння похилої ділянки кривої втоми зварного з'єднання у вихідному стані (за наявності високих розтягуючих залишкових напружень) можна подати у вигляді

$$\lg(N_s / N_1) = \frac{\sigma - \sigma_R^s}{\sigma_2 - \sigma_R^s} \lg(N_2 / N_1), \quad (2)$$

де в залежностях (1), (2) позначено: N_s – довговічність зварного з'єднання у вихідному стані; σ – рівень максимальних напружень циклу зовнішнього навантаження; σ_R^s – межа витривалості зварного з'єднання у вихідному стані на базі $N_1 = 2 \cdot 10^6$ циклів; σ_2 – обмежена межа витривалості зварного з'єднання у вихідному стані на базі $N_2 = 2 \cdot 10^5$ циклів.

Параметри рівняння похилої ділянки кривої втоми зварного з'єднання у вихідному стані визначаються на основі результатів втомних випробувань крупно масштабних зварних зразків, або невеликих зварних зразків та розрахункових залежностей (1), (2).

Якщо рівень залишкових напружень після локальної термообробки σ_s задовольняє умові $\sigma_s \geq \sigma_T - \alpha_\sigma \sigma$, то такий перерозподіл залишкових напружень не приведе до підвищення циклічної довговічності зварного з'єднання на заданному рівні навантаження σ . Це обумовлено тим, що в зонах концентраторів зварного з'єднання як і у випадку необробленого виробу реалізується граничний цикл зміни напружень.

Якщо термообробка обумовлює більш суттєвий перерозподіл залишкових напружень, то це приводить до підвищення циклічної довговічності зварного з'єднання. У цьому

випадку в зонах концентраторів обробленого з'єднання реалізується цикл зміни більш сприятливий за асиметрією, ніж це має місце в необробленому зварному з'єднанні.

На основі параметрів кривої втоми зварного з'єднання у вихідному стані визначається циклічна довговічність обробленого з'єднання. Перша точка (т. С на рис. 1) з координатами (N_1, σ_R^p) характеризує значення межі витривалості термообробленого зварного з'єднання σ_R^p на базі $N_1 = 2 \cdot 10^6$ циклів.

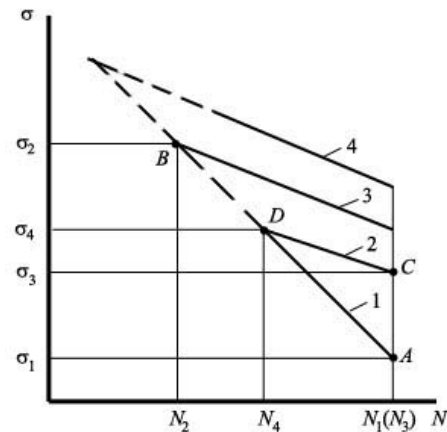


Рисунок 1. Похила ділянка кривої втоми зварних з'єднань: крива 1 – в стані після завершення зварювання; 2, 3, 4 – після термообробки за умови $\sigma_s > 0$, $\sigma_s = 0$ і $\sigma_s < 0$

Величина σ_R визначається за відомим значенням межі витривалості зварного з'єднання у вихідному стані на базі залишкових напружень σ_R з використанням залежностей [1; 9, 10]

$$\sigma_R^p = \frac{\sigma_b - \sigma_s / \alpha_\sigma}{(\sigma_b - \sigma_T / \alpha_\sigma) \sigma_R^s + 1}$$

або

$$\sigma_R^p = \sigma_R \left(1 - \frac{\sigma_s}{\alpha_\sigma \sigma_b} \right). \quad (3)$$

де σ_T і σ_b – границі текучості і міцності матеріалу відповідно; α_σ – пружний коефіцієнт концентрації напружень зварювального з'єднання.

Координати другої точки N_4 і σ_4 (т. D на рис. 1) визначаються з міркувань, що зі зростанням рівня зовнішнього навантаження різниця значень довговічності зварних з'єднань у вихідному стані та після термообробки знижується. Це обумовлено тим, що різниця асиметрії циклу в зонах концентраторів зварних з'єднань у вихідному стані та після

виконання зміцнюючої термообробки зі збільшенням зовнішнього навантаження буде зменшуватись (рис. 1). Починаючи з деякого рівня навантаження напружений стан в зонах концентраторів зварних з'єднань буде ідентичним.

Величину зовнішнього навантаження за якого рівень залишкових напружень в зонах концентраторів зварних з'єднань у вихідному стані досягне значення таких напружень в сполученні, які визначаються з співвідношення

$$\sigma_s + \alpha_\sigma \sigma_4 = \sigma_T$$

або

$$\sigma_4 = (\sigma_T - \sigma_s) / \alpha_\sigma. \quad (4)$$

Оскільки довговічність оброблених і необроблених зварних з'єднань за таких напружень, які визначаються з умови (4), будуть рівні між собою, то відповідні цьому рівню напруження значення циклічної довговічності N_4 визначаються підстановкою залежності (4) у співвідношення (1), звідки

$$N_4 = \frac{\sigma_T - \sigma_s + \alpha_\sigma a}{\alpha_\sigma b}. \quad (5)$$

За відомими координатами двох точок C і D визначаються параметри похилої ділянки кривої втоми обробленого зварного з'єднання

$$b' = \frac{(\sigma_T - \sigma_s) / \alpha_\sigma - \sigma_R^p}{\lg(N_4 / N_1)},$$

$$a' = \sigma_R^p - \frac{(\sigma_T - \sigma_s) / \alpha_\sigma - \sigma_R^p}{\lg(N_4 / N_1)} \lg N_1. \quad (6)$$

Підставляючи вирази (6) в співвідношення (1) дістанемо розрахункову формулу для визначення циклічної довговічності N_p обробленого зварного з'єднання

$$\lg(N_p / N_1) = \frac{\sigma - \sigma_R^p}{(\sigma_T - \sigma_s) / \alpha_\sigma - \sigma_R^p} \lg(N_4 / N_1). \quad (7)$$

Беручи до уваги залежності (3) і (5) у вираз (7) та виконавши необхідні перетворення дістанемо рівняння для визначення циклічної довговічності термообробленого зварного з'єднання на основі параметрів кривої втоми в стані після зварювання

$$\lg(N_p / N_1) =$$

$$= \frac{\left\{ \sigma \left[(\sigma_b - \sigma_T / \alpha_\sigma) / \sigma_R^s \right] - \sigma_b + \sigma_s / \alpha_\sigma \right\}}{b \left\{ [(\sigma_T - \sigma_s) / \alpha_\sigma] \right\}} \times \quad (8)$$

$$\times \frac{[(\sigma_T - \sigma_s) / \alpha_\sigma - a - b \lg N_1]}{\left[(\sigma_b - \sigma_T / \alpha_\sigma) / \sigma_R^s + 1 \right] - \sigma_b + \sigma_s / \alpha_\sigma}$$

Введемо позначення

$$Q = \frac{N_p}{N_s}. \quad (9)$$

де Q – коефіцієнт, який показує в скільки раз збільшується циклічна довговічність зварного виробу під дією зміцнюючої термообробки при заданому рівні навантаження.

Перепишучи залежність (2) у вигляді

$$\lg(N_s / N_1) = \frac{\sigma - \sigma_R^s}{(\sigma_T - \sigma_s) / \alpha_\sigma - \sigma_R^s} \lg(N_4 / N_1) \quad (10)$$

та підставляючи співвідношення (7) і (10) у вираз (9) та позначивши $(\sigma_T - \sigma_s) / \alpha_\sigma = \sigma_p$, приходимо до залежності

$$\lg Q = \frac{(\sigma_R^p - \sigma_R^s)(\sigma_p - \sigma)}{(\sigma_p - \sigma_R^p)(\sigma_p - \sigma_R^s)} \lg(N_1 / N_4). \quad (11)$$

В області обмеженої довговічності зварних з'єднань у вихідному стані та після термообробки величина Q буде максимальною за умови $\sigma = \sigma_R^p$, внаслідок чого вираз (11) набуде вигляду

$$\lg Q_{\max} = \frac{\sigma_R^p - \sigma_R^s}{\sigma_p - \sigma_R^s} \lg(N_1 / N_4).$$

На основі отриманих залежностей (1)–(11) виконано розрахунок оцінки ефективності застосування термічної обробки з метою підвищення циклічної довговічності зварних з'єднань конструкцій, що відображено на рис. 2, рис. 3. В основу розрахунку приймається залежність циклічної довговічності зварних з'єднань з високими залишковими напруженнями розтягу від рівня зовнішнього навантаження. Результати розрахунків згідно залежності (8) показують, що повне усунення залишкових напружень в стиковому з'єднанні з низьколегованій сталі приводить до підвищення циклічної довговічності в 2-3 рази порівняно з довговічністю з'єднання в стані після зварювання, що ілюструється графіками на рис. 2. Часткове усунення залишкових зварних напружень виявляє дещо менший ефект, а саме спостерігається збільшення довговічності в 1,2-2 рази залежно від рівня прикладених напружень. Наведення в зонах зварних швів локальною термообробкою стискуючих залишкових напружень може привести до більш суттєвого підвищення циклічної довговічності зварних з'єднань конструкцій (рис. 3).

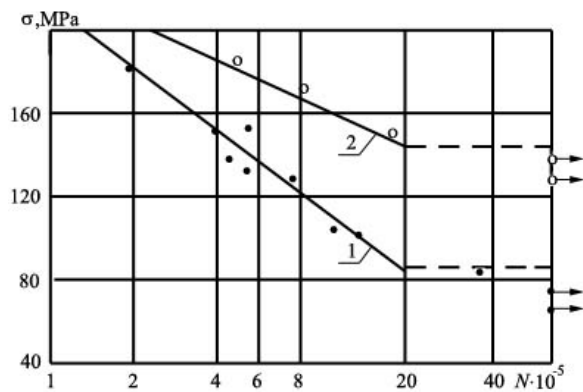


Рисунок 2. Залежність циклічної довговічності зварного стикового з'єднання від рівня прикладених напружень: 1 – стан після зварювання; 2 – після термообробки за умови $\sigma_s = 0$ (суцільні криві відповідають даним, отриманим на основі розрахункових залежностей, темні • і світлі о кружечки – експериментальні значення)

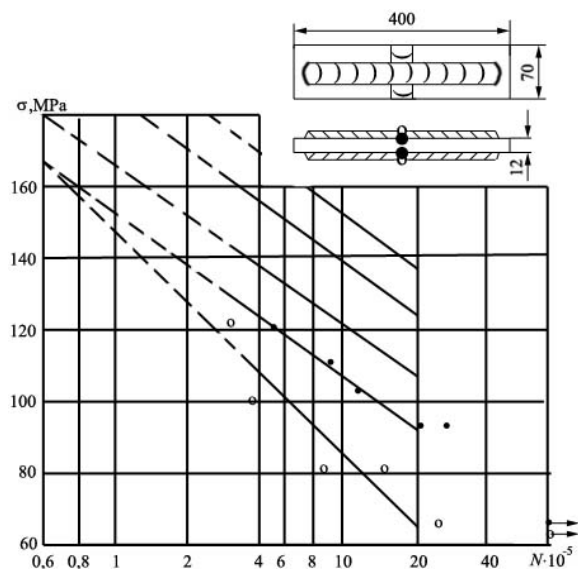


Рисунок 3. Залежність циклічної довговічності зварного стикового з'єднання зі сталі 14Г2 від рівня прикладених напружень: 1 – стан після зварювання; 2, 3, 4, 5 – після термообробки за умови $\sigma_s = 0$ МПа, $\sigma_s = 85$ МПа, $\sigma_s = 170$ МПа і $\sigma_s = 185$ МПа відповідно (суцільні криві відповідають даним, отриманим на основі розрахункових залежностей, темні • і світлі о кружечки – експериментальні значення)

Співставлення результатів розрахункової оцінки впливу перерозподілу залишкових зварних напружень термообробкою на циклічну довговічність зварних з'єднань в області багатого циклового навантаження ($N > 2 \cdot 10^5$ циклів) і результатів втомних випробувань габаритних зварних зразків показало добру

їх відповідність, що ілюструється графіками на рис. 2 і рис. 3.

ВИСНОВКИ

Аналіз отриманих співвідношень та експериментальних даних вказує, що локальна термообробка приводить до суттєвого підвищення граничних напружень і циклічної довговічності зварних з'єднань. Ефективність застосування такого виду зміцнення елементів зварних конструкцій залежить від механічних характеристик матеріалів, параметрів зовнішнього навантаження, типу з'єднань тощо. Найбільший вплив локальна термообробка має на опір втомі зварних з'єднань конструкцій в умовах знакозмінного циклу навантаження. Усунення залишкових зварних напружень термообробкою в умовах асиметричного циклу навантаження приводить до підвищення меж витривалості зварних з'єднань з низько вуглецевої сталі на 30-40%, низьколегованої – на 50-60%, а високоміцної – на 70-100%. При цьому циклічна довговічність оброблених зварних з'єднань при рівні зовнішнього навантаження, близьких до значення меж витривалості, збільшується в 2-4 рази порівняно з довговічністю з'єднань, які мають високі розтягуючі залишкові напруження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Андрейків О. Є. Розрахунок залишкового ресурсу відповідальних елементів мостів / О. Є. Андрійків, Й. Й. Лучко, І. М. Панько // Зб. наук. праць. Діагностика, довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій. – 2001. – Вип. 3. – С. 19-22.
- [2] Труфяков В. И. Усталость сварных соединений / В. И. Труфяков. – К. : Наук. думка, 1973. – 216 с.
- [3] Кудрявцев Ю.Ф. Некоторые закономерности изменения остаточных напряжений при циклическом нагружении в зависимости от их начального уровня и концентрации напряжений / Ю. Ф. Кудрявцев, О. И. Гуца // Проблемы прочности. – 1986. – № 1. – С. 32-38.
- [4] Кудрявцев Ю. Ф. Изменение предельных циклических напряжений сварных соединений под действием остаточных напряжений / Ю. Ф. Кудрявцев, П. П. Михеев // Конструк-

ционная прочность и механика разрушения сварных соединений. – Л., 1986. – С. 68–72.

[5] Труфяков В. И. Влияние остроты концентратора на сварочные остаточные напряжения при многоцикловом нагружении / В. И. Труфяков, О. И. Гуца, Ю. Ф. Кудрявцев // Автоматическая сварка. – 1981. – № 7. – С. 13–16.

[6] Труфяков В. И. Влияние степени концентрации напряжений на формирование остаточных напряжений при многоцикловом нагружении / В. И. Труфяков, О. И. Гуца, Ю. Ф. Кудрявцев // Автоматическая сварка. – 1981. – № 3. – С. 22–25.

[7] Окерблом Н. О. Расчет выносливости сварных конструкций с учетом напряжений, возникающих при сварке / Н. О. Окерблом // Сварочное производство. Тр. ЛПИ. – М. ; Л. : 1958. – № 93. – С. 26–47.

[8] Винокуров В. А. Сварочные деформации и напряжения / В. А. Винокуров. – М. : Машиностроение, 1968. – 236 с.

[9] Добрянський І. М. Ефективність термообробки зварних пластин рухомими зонами нагріву / І. М. Добрянський, Л. В. Хомляк, Є. Г. Іваник // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів і конструкцій / за заг. ред. Й. Й. Лучка. – Львів : Каменяр, 2007. – Вип. 7. – С. 431–436.

[10] Добрянський І. М. Розрахунок залишкових напружень і деформацій у безмежній пластині за дії рухомих нормально-кругових джерел нагріву / І. М. Добрянський, Л. В. Хомляк, Є. Г. Іваник // Машинознавство. – 2008. – № 1. – С. 7–10.