

УДК 539.374:621.78

DOI: 10.32626/2308-5916.2018-18.74-90

О. В. Сікора*, канд. техн. наук,

М. В. Дорошенко*, канд. фіз.-мат. наук,

В. М. Семерак**, канд. техн. наук,

Є. Г. Іваник***, канд. фіз.-мат. наук

*Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка, м. Дрогобич,

**Львівський національний аграрний університет, м. Дубляни,

***Національна академія сухопутних військ

імені гетьмана Петра Сагайдачного, м. Львів

ПРОГНОЗНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ПІДВИЩЕННЯ ВТОМНОГО ОПОРУ ЕЛЕМЕНТІВ ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ ТЕРМООБРОБКОЮ

Виконано аналіз впливу на величину граничних залишкових напружень циклу зварних з'єднань. Отримано рівняння для визначення максимальних граничних напружень циклу, підданого обробці зварного з'єднання. Викладена методика розрахунку ефективності повного усунення залишкових напружень термообробкою застосовна не тільки для випадку, коли вихідні залишкові напруження в зварному з'єднанні досягають значення межі текучості матеріалу, але також і для випадку, коли ці напруження не перевищують значення, але вищі за граничну величину початкових залишкових напружень, за яких максимальний рівень напружень в зонах концентраторів зварного з'єднання при циклічному навантаженні досягає значення межі текучості матеріалу.

Отримано залежності для визначення граничних напружень за локальної термообробки металоконструкцій локально-зосередженими тепловими потоками. Встановлено, що зниження вихідного рівня залишкових зварних напружень підвищує границю витривалості стикових з'єднань. На основі розробленого методу оцінки впливу залишкових зварних напружень та їх перерозподілу внаслідок локальної термообробки досліджено залежність граничної величини залишкових напружень від коефіцієнта асиметрії циклу зовнішнього навантаження.

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 локаль-

на термообробка має на опір втомі зварних з'єднань конструкцій в умовах знакозмінного циклу навантаження.

Ключові слова: *термообробка, зварювання, надійність, довговічність, змінне навантаження, втомна міцність, металокопструкції, машини.*

Вступ. Однією з основних задач сучасної техніки і практики застосування зварювальних технологій є підвищення надійності і довговічності несучих металокопструкцій машин і споруд. Значна частина промислових зварних металокопструкцій, які знаходять застосування в інженерній практиці, експлуатуються в умовах змінного (зокрема, циклічно-змінного) навантаження. Несуча здатність більшості металокопструкцій (крани, екскаватори, будівельні і дорожні машини, вироби спеціального призначення) визначається головним чином опором втомі елементів зварних з'єднань. Про це свідчать багаточисельні випадки утворення в зонах зварних швів втомних тріщин, що нерідко призводить до передчасного виходу з ладу або катастрофічного руйнування зварних копструкцій [1, 2].

Роль як розтягуючих, так і стискувальних залишкових напружень у механічних процесах з урахуванням втоми, суттєво змінюється залежно як від рівня цих напружень, так і зовнішніх механічних і теплових навантажень, асиметрії циклу, типу з'єднань, фізико-механічних характеристик застосовуваних матеріалів [2–6]. Відсутність надійних і водночас простих і зрозумілих методик розрахунку впливу залишкових напружень на опір втомі зварювальних елементів копструкцій стримує широке впровадження зміцнюючих технологій, заснованих на перерозподілі залишкових напружень.

Підвищення циклічної довговічності зварних металокопструкцій об'єктів машинобудування, автомобілебудування, авіаційній промисловості, 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. Якнайповніше використання технологій локальної термообробки гальмується відсутністю простих інженерних і водночас надійних методів розрахункової оцінки впливу залишкових напружень розтягу і стиску на циклічну довговічність зварних елементів. Тому дана стаття, в якій розглянуто процедуру формування розрахункових методів прогнозування ефективності застосування цього виду обробітку для підвищення опору втомі зварних з'єднань елементів машинобудівних копструкцій є практично важливою і не

втрачає своєї актуальності і донині, незважаючи на досить давню історію висвітлення питань вирішення даної проблеми [2, 6].

Поставимо задачу визначення працездатності елементів зварних металоконструкцій і прогнозування оцінки підвищення опору втомі. Подано варіант методики розрахункової оцінки ефективності підвищення опору втомі зварних металічних з'єднань на основі аналізу напруженого стану з урахуванням залишкових напружень та їх зміни під дією локальної термообробки і циклічного навантаження.

В статті подано метод розрахункової оцінки ефективності заходів підвищення втомі зварних з'єднань, заснованих на перерозподілі залишкових напружень. Метод базується на аналізі напруженого стану в зонах концентраторів зварних елементів з урахуванням залишкових зварних напружень і їх зміни під дією локальної термообробки локально-скерованих джерел нагрівання та циклічного навантаження.

Аналіз попередніх публікацій. Дослідження з наукового напрямку підвищення надійності і довговічності елементів зварних конструкцій локальною термообробкою започатковані ще в минулому сторіччі Інститутом електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України в рамках науково-технічної проблеми «Систематизувати і узагальнити дослідження відомих способів і розробити нові конструктивно-технологічні заходи, які забезпечують підвищення несучої здатності зварних конструкцій при одночасному зниженні матеріалоемності; розробити рекомендації з розрахунку зварних металоконструкцій на втому». З цією метою виконано дослідження закономірностей зміни залишкових напружень за умов циклічного навантаження [2–6]. Ці дослідження дали змогу здійснити переоцінку існуючих підходів і по-новому підійти до оцінки впливу залишкових зварних напружень і їх перерозподілу під дією термообробки на величину граничних напружень і циклічну довговічність зварних елементів конструкцій.

Сучасні інженерні конструкції працюють в умовах підвищених температур (900°C і більше). Наприклад, авіаційні двигуни пасажирського лайнера або надзвукового реактивного винищувача, чи двигуни потужної техніки будівельної індустрії, працюють 2–4% свого ресурсу в найбільш тяжконавантаженому режимі, 20–30% в номінальному (експлуатаційному) режимі, решта часу в більш легких режимах [1–3]. В цих умовах міцність конструкційних матеріалів, особливо металів та їх сплавів, суттєво залежить від температури, тривалості та особливості навантаження [4, 5]. В умовах роботи комбінованих режимів (від початку до повної зупинки) застосовують принцип «лінійного сумування пошкоджень», який вперше було висунуто Пальгреном у 1924 р. при оцінці довговічності кулькових підшипників. Для тривалої міцності цей принцип був застосований Робінсоном у 1952 р. як узагальнення експериментальних даних [2].

Мета статті: оцінка ефективності підвищення втомного опору елементів зварних конструкцій термообробкою.

Виклад основного матеріалу. Міцність конструкційних матеріалів, особливо металів та їх сплавів, суттєво залежить від температури, тривалості та особливостей прикладання зовнішніх теплових навантажень [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 [7–11]. Незважаючи на значні здобутки, отримані в цій галузі і висвітлені в низці робіт [2–16], досі не до кінця з'ясовані закономірності зміни залишкових напружень в умовах змінного навантаження залежно від конструктивно-технологічних та експлуатаційних факторів. Ця обставина стримує розвиток методів оцінки опору втомі, заснованих на аналізі напружено-деформованого стану в зонах концентраторів зварних з'єднань.

Метод розрахункової оцінки впливу залишкових зварних напружень на величину граничних циклічних напружень зварних з'єднань передбачає, що амплітуда граничних напружень зварного з'єднання з високим рівнем розтягуючих залишкових напружень σ_a^{zal} визначається залежністю [4]:

$$\sigma_a^{zal} = \frac{\sigma_b - \sigma_T / \alpha_\sigma}{\sigma_b / \sigma_{-1} - 1}, \quad (1)$$

де σ_{-1} — амплітуда граничних напружень зварювального з'єднання без залишкових напружень при симетричному циклі навантаження; σ_T і σ_b — границі текучості і міцності матеріалу відповідно; α_σ — пружний коефіцієнт концентрації напружень зварювального з'єднання.

Величина максимальних граничних напружень σ_{max}^{zal} у цьому випадку залежно від коефіцієнта асиметрії R_σ і середніх напружень σ_m циклу зовнішнього навантаження визначається з рівняння [5]

$$\sigma_{max}^{zal} = \frac{2\sigma_a}{1 - R_\sigma}, \quad (2)$$

$$\sigma_{max}^{zal} = \sigma_a^{zal} + \sigma_m. \quad (3)$$

Графік залежності (2) в координатах (σ_{max}, σ_m) є прямою лінією, нахиленою під кутом 45° до координатних осей. Якщо локальна термообробка призводить до повного зняття залишкових зварних напружень, то подавши діаграму граничних напружень з'єднань, що перебувають в умовах локальної термообробки, у вигляді залежностей Гудмена [16]

$$\sigma_{\max} = \frac{2}{(1 - R_{\sigma})\sigma_{-1} + (1 + R_{\sigma})\sigma_b}.$$

З урахуванням (1) отримуємо рівняння для визначення максимальних граничних напружень циклу, підданого обробці зварного з'єднання $\sigma_{\max}^{обр}$, за відомим значенням $\sigma_a^{зал}$

$$\sigma_{\max}^{обр} = \frac{\sigma_b - \sigma_T / \alpha_{\sigma}}{(1 - R_{\sigma})(\sigma_b - \sigma_T / \alpha_{\sigma}) / 2\sigma_a^{зал} + 1} \quad (4)$$

Величина максимальних граничних напружень циклу внаслідок зняття залишкових напружень збільшується від $\sigma_{\max}^{зал}$ до $\sigma_{\max}^{обр}$.

Якщо зовнішнє навантаження характеризується значними за величиною середніми напруженнями циклу (зокрема, від власної ваги конструкції), які залишаються сталими незалежно від рівня змінної складової циклу, то усунення залишкових напружень приведе до підвищення максимальних напружень, які набуватимуть деякого значення $\sigma_{\max 1}^{обр}$, але меншого за величину $\sigma_{\max}^{обр}$. За фіксованого значення σ_m оцінку ефективності повного зняття залишкових напружень слід здійснювати з використанням залежності (3), а також залежності

$$\sigma_{\max}^{обр} = \frac{\sigma_a^{зал} \cdot \sigma_b + \sigma_m (\sigma_b - \sigma_T / \alpha_{\sigma})}{\sigma_a^{зал} + \sigma_b - \sigma_T / \alpha_{\sigma}} \quad (5)$$

Отримані залежності (2)–(5) вказують на те, що різниця значень границь витривалості зварних з'єднань у вихідному (до термообробки) і по завершенні термомеханічної обробки зменшується. У деякому проміжному стані, за якого

$$R_{\sigma} = R_{\sigma 1}, \text{ або } \sigma_m = \sigma_{m 1},$$

причому

$$R_{\sigma 1} = 1 - \frac{2\alpha_{\sigma}\sigma_a}{\sigma_T}, \quad \sigma_{m 1} = \sigma_T - \alpha_{\sigma}\sigma_a^{зал},$$

спостерігається майже повне співпадіння амплітуд циклічних напружень.

Викладена методика розрахунку ефективності повного усунення залишкових напружень термообробкою застосовна не тільки для випадку, коли вихідні залишкові напруження в зварному з'єднанні досягають значення межі текучості матеріалу, але також і для випадку, коли ці напруження не перевищують значення σ_T , але вищі за граничну величину початкових залишкових напружень $\sigma_{зал}^p$, за яких максимальний рівень напружень в зонах концентраторів зварного

з'єднання при циклічному навантаженні досягає значення межі текучості матеріалу ($\sigma_{\max}^k = \sigma_T$). Залежно від асиметрії циклу зовнішнього навантаження величина $\sigma_n^{зал}$ визначається з співвідношення

$$\sigma_{зал}^p / \sigma_T = 1 - \frac{2\alpha_\sigma \sigma_{зал}^p}{(1 - R_\sigma) \sigma_T}.$$

Графік цієї залежності для різних типів зварних з'єднань з низько вуглецевої сталі подано на рис. 1.

Повне зняття залишкових зварних напружень є частковим випадком сприятливого перерозподілу залишкових напружень в умовах термообробки. В більшості випадків такою обробкою досягається лише часткове усунення розтягуючих залишкових напружень або формування в зонах концентраторів зварних з'єднань залишкових напружень стиску. Якщо рівень залишкових напружень після обробки $\sigma_{обр}^{зал} \geq \sigma_{зал}^p$, то такий перерозподіл залишкових напружень не приведе до підвищення втомної міцності зварного елемента; це обумовлюється тим, що в зонах концентраторів зварного з'єднання в умовах циклічного навантаження буде також як в необробленому виробі реалізовано граничний цикл зміни напружень ($\sigma_{\max}^k = \sigma_T$).

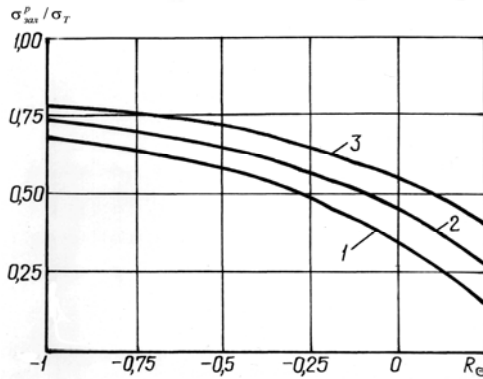


Рис. 1. Залежність граничної величини залишкових напружень $\sigma_{зал}^p$ від коефіцієнта асиметрії циклу зовнішнього навантаження. R_σ : крива 1 —

$$\frac{\alpha_\sigma \sigma_a^{зал}}{\sigma_T} = 0,325; \text{ крива 2 — } \frac{\alpha_\sigma \sigma_a^{зал}}{\sigma_T} = 0,27; \text{ крива 3 — } \frac{\alpha_\sigma \sigma_a^{зал}}{\sigma_T} = 0,22$$

Діаграми граничних напружень зварних з'єднань, підданих термообробці, за наявності залишкових розтягуючих або стискуючих

напружень, будуть паралельними аналогічній діаграмі без залишкових напружень [6], що відображено на рис. 1. Різниця значень границь витривалості зварних з'єднань як без залишкових напружень так і з ними, згідно результатів робіт [6; 7], а також за умови фіксації величини середніх напружень циклу σ_m зовнішнього навантаження, не залежить від них, тобто

$$\Delta\sigma_{\max}^{\sigma_m=\text{const}} = \frac{\sigma_{\text{зал}}^{\text{обр}} \cdot \sigma_{-1}}{\alpha_{\sigma} \cdot \sigma_b}. \quad (6)$$

Використовуючи залежність, запозичену з праць [2, 3] отримаємо таке співвідношення:

$$\sigma_{\max}^{\text{обр}} = \sigma_{\max} \left(1 - \frac{\sigma_{\text{зал}}^{\text{обр}}}{\alpha_{\sigma} \cdot \sigma_b} \right), \quad (7)$$

отримуємо

$$\Delta\sigma_{\max}^{R_{\sigma}=\text{const}} = \frac{\sigma_{\text{зал}}^{\text{обр}} \cdot \sigma_{\max}}{\alpha_{\sigma} \cdot \sigma_b}, \quad (8)$$

Звідси, беручи до уваги залежності (6)–(8), випливає, що відносна зміна меж витривалості під дією залишкових зварних напружень не залежить від асиметрії циклу зовнішнього навантаження, а з підвищенням значення R_{σ} величина $\Delta\sigma_{\max}^{R_{\sigma}=\text{const}}$ зростає, оскільки зростає також величина σ_{\max} .

Вихідними даними для оцінки ефективності локальної термообробки на основі отриманих залежностей (6)–(8), а також результатів робіт [1–3] є значення границь витривалості зварних з'єднань без залишкових напружень. Якщо такі дані відсутні, а є у наявності значення амплітуди граничних напружень зварних з'єднань з високими залишковими напруженнями $\sigma_a^{\text{зал}}$, обумовлених термообробкою [8–15], то на основі залежності, отриманої у праці [2]

$$\sigma_{-1} = \frac{\sigma_b}{(\sigma_b - \sigma_T / \alpha_{\sigma}) / \sigma_a^{\text{зал}} + 1},$$

приходимо до таких рівнянь для визначення границь витривалості зразків, підданих термообробці:

$$\sigma_{\max}^{\text{обр}} = \frac{\sigma_a^{\text{зал}} (\sigma_b - \sigma_{\text{зал}}^{\text{обр}} / \alpha_{\sigma}) + \sigma_m (\sigma_b - \sigma_T / \alpha_{\sigma})}{\sigma_b + \sigma_a^{\text{зал}} - \sigma_T / \alpha_{\sigma}}; \quad (9)$$

$$\sigma_{\max}^{\text{обр}} = \frac{\sigma_b - \sigma_{\text{зал}}^{\text{обр}} / \alpha_{\sigma} \sigma_a^{\text{зал}} + \sigma_m (\sigma_b - \sigma_T / \alpha_{\sigma})}{(1 - R_{\sigma}) \cdot (\sigma_b - \sigma_T / \alpha_{\sigma}) / 2\sigma_a^{\text{зал}} + 1}. \quad (10)$$

За умови $\sigma_{зал}^{обр} = 0$ рівняння (9) і (10) співпадають з рівняннями, отриманими у роботі [2], які визначають межу витривалості зварних з'єднань у випадку повного зняття залишкових напружень.

Як свідчить аналіз впливу залишкових напружень на величину граничних напружень циклу зварних з'єднань, якщо в умовах постлокальної термообробки рівень залишкових напружень в зонах концентраторів зварного виробу знаходиться у діапазоні $\sigma_T \leq \sigma_{зал} \leq \sigma_{зал}^{гр}$, то термообробка не досягла бажаного результату (є неефективною) і амплітуда граничних напружень з'єднання не залежить як від асиметрії циклу зовнішнього навантаження, так і рівня вихідних залишкових напружень (лінія 1, рис. 2).

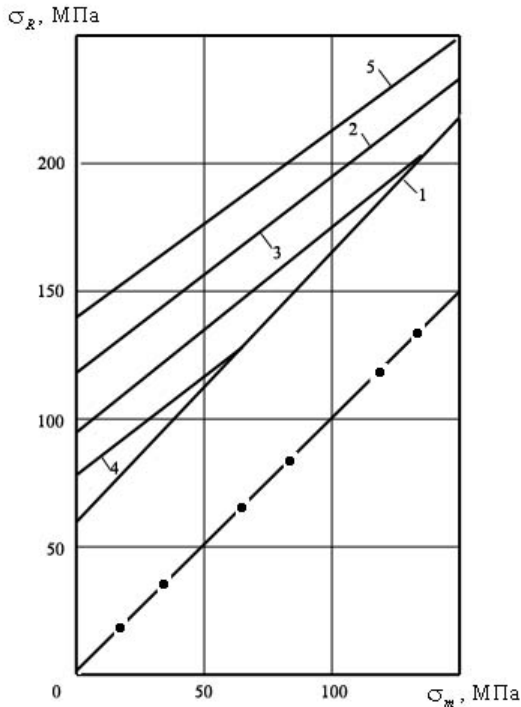


Рис. 2. Діаграма граничних напружень зварного стикового з'єднання:

крива 1 — $\sigma_{зал} \geq \sigma_{зал}^{гр}$; крива 2 — $\sigma_{зал} = 0$; крива 3 — $\sigma_{зал} = 100$ МПа;

крива 4 — $\sigma_{зал} = 200$ МПа; крива 5 — $\sigma_{зал} = -100$ МПа

Якщо зварне з'єднання перебуває в умовах локальної термообробки, причому у зонах концентраторів $\sigma_{зал}^{обр} = \sigma_{зал}^{гр}$, і вважати, що

рівень цих напружень не зміниться під дією циклічного навантаження, то величина граничних напружень дається залежністю

$$\sigma_{\max}^{обр} = \begin{cases} \frac{2\sigma_{-1}(\sigma_b - \sigma_{зал}^{обр} / \alpha_\sigma)}{(1 - R_\sigma) \cdot \sigma_b + (1 + R_\sigma) \cdot \sigma_{-1}}, R_\sigma < R_{\sigma_2}, \\ \frac{2(\sigma_b - \sigma_{зал}^{обр} / \alpha_\sigma)}{(1 - R_\sigma) \cdot (\sigma_b / \sigma_{-1} - 1)}, R_\sigma \geq R_{\sigma_2}. \end{cases} \quad (11)$$

У рівнянні (11) позначено: $R_{\sigma_2} = 1 - \frac{2\alpha_\sigma \sigma_{-1} (\sigma_b - \sigma_T / \alpha_\sigma)}{(\sigma_T - \sigma_{зал}^{обр}) (\sigma_b / \sigma_{-1} - 1)}$.

Якщо вихідними даними для розрахунку є значення амплітуди граничних напружень зварних з'єднань з високими залишковими напруженнями розтягу $\sigma_a^{зал}$, то рівняння (11) набуде вигляду:

$$\sigma_{\max}^{обр} = \begin{cases} \frac{\sigma_b - \sigma_{зал}^{обр} / \alpha_\sigma}{(1 - R_\sigma) \cdot (\sigma_b - \sigma_T / \alpha_\sigma) / 2\sigma_a^{зал} + 1}, R_\sigma < R_{\sigma_2}, \\ \frac{2\sigma_a^{зал}}{1 - R_\sigma}, R_\sigma \geq R_{\sigma_2}, \end{cases} \quad (12)$$

де $R_{\sigma_2} = 1 - \frac{2\alpha_\sigma \sigma_a^{зал}}{\sigma_T - \sigma_{зал}^{обр}}$.

Діаграма граничних станів, побудована у відповідності до залежностей (11), (12), складається з двох ділянок (рис. 2). Перша є лінійною, паралельна аналогічній залежності для зварних з'єднань без залишкових напружень. Ця лінія визначає значення границь витривалості аж до її перетину з лінією граничних напружень з високими розтягуючими залишковими напруженнями.

Апробація отриманих розрахункових залежностей здійснювалась шляхом випробувань зварних стикових з'єднань ($\alpha_\sigma = 1,32$) з низьколегованої сталі 14Г2 ($\sigma_T = 380$ МПа, $\sigma_b = 540$ МПа).

Результати втомних випробувань зварних зразків при симетричному циклі навантаження (чистий згин) показали, зниження вихідного рівня залишкових зварних напружень до значення 170 МПа підвищує границю витривалості стикових з'єднань на основі $N = 2 \cdot 10^6$ циклів від 70 МПа до 90 МПа, що складає 28%. Співставлення експериментальних даних і результатів обрахунку наведено на рис. 3 і показало добру їх відповідність.

Отримані тут залежності відрізняються від класичних, наведених у праці [17], що обумовлюється, по-перше, тим, що аналіз впливу

залишкових напружень зварних з'єднань на опір втомі виконано з урахуванням концентрації напружень на перерозподіл залишкових напружень; по-друге, з отриманих розрахункових залежностей випливає, що зміна межі витривалості за фіксованого значення середніх напружень циклу зовнішнього навантаження складає $\frac{\sigma_{-1}\sigma_{зал}}{\alpha_\sigma\sigma_b}$, а у роботі [17] вона приймається рівною $\frac{\sigma_{-1}\sigma_{зал}}{\sigma_b}$.

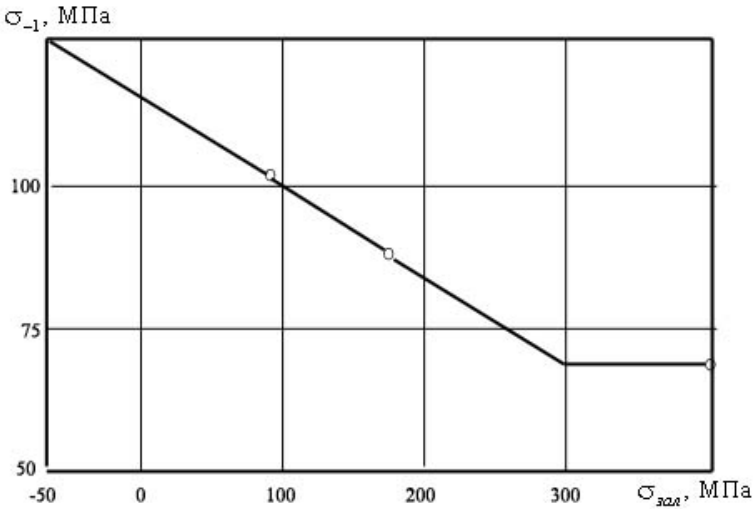


Рис. 3. Розрахункова залежність межі витривалості зварного стикового з'єднання при симетричному циклі навантаження від рівня залишкових напружень (o — експериментальні дані)

Значення середніх напружень циклу зовнішнього навантаження складає $\frac{\sigma_{-1}\sigma_{зал}}{\alpha_\sigma\sigma_b}$, а у роботі [17] вона приймається рівною $\frac{\sigma_{-1}\sigma_{зал}}{\sigma_b}$.

Нехтування цією обставиною приводить до того, що для стикового з'єднання розрахункова величина зміни межі витривалості під дією залишкових напружень відрізняється від фактичної на 20..40%, а у випадку хрестоподібного з'єднання — більш ніж 100%.

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

$$\sigma = A + B \lg N, \quad (13)$$

Графік (13) 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

$$\lg(N_s / N_1) = \frac{\sigma - \sigma_R^s}{\sigma_2 - \sigma_R^s} \lg(N_2 / N_1), \quad (14)$$

де в залежностях (13), (14) 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 (13), (14).

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 заданому 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 (точка C на рис. 4) 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.

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

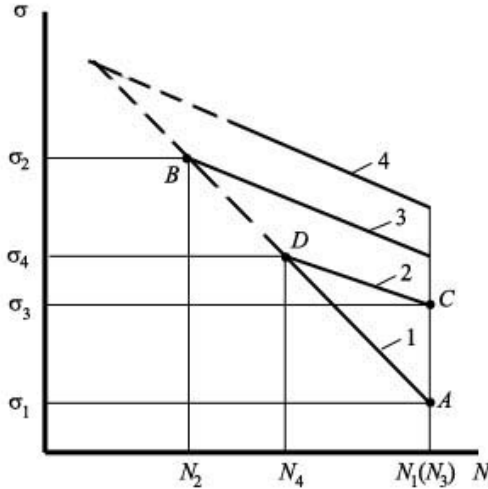


Рис. 4. Похила ділянка кривої втоми зварних з'єднань:
крива 1 — в стані після завершення зварювання;
2, 3, 4 — після термообробки за умови $\sigma_s > 0$, $\sigma_s = 0$ і $\sigma_s < 0$

$$\sigma_R^p = \frac{\sigma_b - \sigma_s / \alpha_\sigma}{(\sigma_b - \sigma_T / \alpha_\sigma) \sigma_R^s + 1} \quad (15)$$

Координати другої точки N_4 і σ_4 (точка D на рис. 4) визначаються з міркувань: із зростанням рівня зовнішнього навантаження різниця значень довговічності зварних з'єднань у вихідному стані та після термообробки знижується, що обумовлюється 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. 4). 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

$$\sigma_s + \alpha_\sigma \sigma_4 = \sigma_T \text{ або } \sigma_4 = (\sigma_T - \sigma_s) / \alpha_\sigma \quad (16)$$

Оскільки довговічність оброблених і необроблених зварних з'єднань за таких напружень, які визначаються з умови (16), будуть рівні між собою, то відповідні цьому рівню напруження значення циклічної довговічності N_4 визначаються підстановкою залежності (16) у співвідношення (13), звідки

$$N_4 = \frac{\sigma_T - \sigma_s + \alpha_\sigma a}{\alpha_\sigma b}. \quad (17)$$

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

$$b' = \frac{(\sigma_T - \sigma_s) / \alpha_\sigma - \sigma_R^p}{\lg(N_4 / N_1)}, \quad a' = \sigma_R^p - \frac{(\sigma_T - \sigma_s) / \alpha_\sigma - \sigma_R^p}{\lg(N_4 / N_1)} \lg N_1. \quad (18)$$

Підставляючи вирази (18) в співвідношення (13) дістанемо розрахункову формулу для визначення циклічної довговічності N_p обробленого зварного з'єднання

$$\lg(N_p / N_1) = \frac{\sigma - \sigma_R^p}{(\sigma_T - \sigma_s) / \alpha_\sigma - \sigma_R^p} \lg(N_4 / N_1) \quad (19)$$

Беручи до уваги залежності (15) і (17) і підставляючи їх у вираз (19) та виконавши необхідні перетворення дістанемо рівняння для визначення циклічної довговічності термообробленого зварного з'єднання на основі параметрів кривої втоми в стані після зварювання

$$\lg(N_p / N_1) = \frac{F_1}{b F_2}, \quad (20)$$

де

$$F_1 = \left\{ \sigma \left[(\sigma_b - \sigma_T / \alpha_\sigma) / \sigma_R^s \right] - \sigma_b + \sigma_s / \alpha_\sigma \right\} \left[(\sigma_T - \sigma_s) / \alpha_\sigma - a - b \lg N_1 \right];$$

$$F_2 = \left[(\sigma_T - \sigma_s) / \alpha_\sigma \right] \left[(\sigma_b - \sigma_T / \alpha_\sigma) / \sigma_R^s + 1 \right] - \sigma_b + \sigma_s / \alpha_\sigma$$

Введемо позначення

$$Q = \frac{N_p}{N_s}, \quad (21)$$

де Q — коефіцієнт, який вказує на в скільки раз зростає циклічна довговічність зварного виробу під дією зміцнюючої термообробки при заданому рівні навантаження.

Переписуючи залежність (14) у вигляді

$$\lg(N_s / N_1) = \frac{\sigma - \sigma_R^s}{(\sigma_T - \sigma_s) / \alpha_\sigma - \sigma_R^s} \lg(N_4 / N_1) \quad (22)$$

і підставляючи співвідношення (19) і (22) у вираз (21) та позначивши $(\sigma_T - \sigma_s) / \alpha_\sigma = \sigma_p$, приходимо до залежності

$$\lg Q = \frac{(\sigma_R^p - \sigma_R^s)(\sigma_p - \sigma)}{(\sigma_p - \sigma_R^p)(\sigma_p - \sigma_R^s)} \lg(N_1 / N_4). \quad (23)$$

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 (23) 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 (13)–(23) виконано розрахункові оцінки ефективності застосування термічної обробки з метою підвищення циклічної довговічності зварних з'єднань конструкцій, що відображено на рис. 5, рис. 6.

Результати розрахунків згідно залежності (20) показують, що повне усунення залишкових напружень в стиковому з'єднанні з низьколегованої сталі приводить до підвищення циклічної довговічності в 2..3 рази порівняно з довговічністю з'єднання в стані після зварювання, що ілюструється графіками на рис. 5. 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. 6). Співставлення результатів розрахункової оцінки впливу перерозподілу залишкових зварних напружень термообробкою на циклічну довговічність зварних з'єднань в області багаточислового навантаження ($N > 2.4 \cdot 10^5$ циклів) і результатів втомних випробувань габаритних зварних зразків показало добру їх відповідність, що ілюструється графіками на рис. 5 і рис. 6.

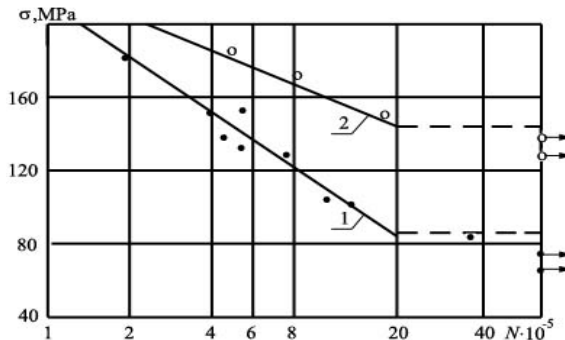


Рис. 5. Залежність циклічної довговічності зварного стикового з'єднання від рівня прикладених напружень: 1 — стан після зварювання;

2 — після термообробки за умови $\sigma_s = 0$ (суцільні криві відповідають даним, отриманим на основі розрахункових залежностей, темні • і світлі о кружечки — експериментальні значення)

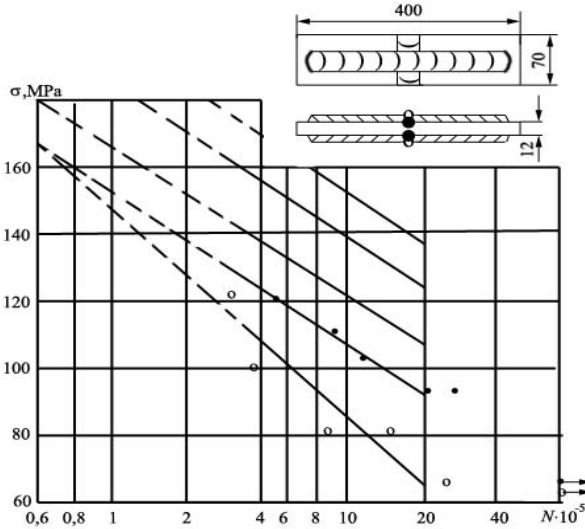


Рис. 6. Залежність циклічної довговічності зварного стикового з'єднання зі сталі 14Г2 від рівня прикладених напружень: 1 — стан після зварювання; 2, 3, 4, 5 — після термообробки за умови $\sigma_s = 0$ МПа, $\sigma_s = 85$ МПа, $\sigma_s = 170$ МПа і $\sigma_s = 185$ МПа відповідно (суцільні криві відповідають даним, отриманих на основі розрахункових залежностей, темні • і світлі о кружечки — експериментальні значення).

Висновки. Оскільки ефективність локальної термообробки головним чином залежить від величини і характеру розподілу тимчасових температурних полів і напружень, що виникають в зварних конструкціях за дії нерівномірного нагрівання, то невіддале сполучення зварних і тимчасових температурних напружень в процесі термообробки може привести навіть до зростання залишкових. 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

межі витривалості, збільшується в 2..4 рази порівняно з довговічністю з'єднань, які мають високі розтягуючі залишкові напруження.

Отримані результати придатні для використання в інженерній практиці при розробленні рекомендацій з підвищення надійності і циклічної довговічності зварних з'єднань і вузлів різного роду конструкцій та інженерних систем в машинобудуванні, тепло- та атомній енергетиці, автомобільній, авіаційній та космічній галузях.

Список використаних джерел:

1. Андрейків О. С. Розрахунок залишкового ресурсу відповідальних елементів мостів / О. С. Андрейків, 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. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Кудрявцев Ю. Ф. Изменение предельных циклических напряжений сварных соединений под действием остаточных напряжений / Ю. Ф. Кудрявцев, П. П. Михеев // Конструкционная прочность и механика разрушения сварных соединений. — Л., 1986. — С. 68–72.
7. 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.
8. 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.
9. Максимович В. Н. О выборе режимов нагрева и охлаждения для понижения остаточных сварочных напряжений в пластинах / В. Н. Максимович, Л. В. Хомляк // Проблемы прочности. — 1983. — № 4. — С. 33–39.
10. Іваник Є. Г. Розрахункова оцінка ефективності підвищення опору втомі зварних з'єднань / Є. Г. Іваник, В. І. Косарчин, В. М. Семерак // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів і конструкцій / за заг. ред. Й. Й. Лучка. — Львів : Каменяр, 2012. — Вип. 9. — С. 131–134.
11. Биргер И. А. Сопротивление материалов : учебное пособие / И. А. Биргер, Р. Р. Мавлютов. — М. : Наука, 1986. — 560 с.

12. Тальпов Г. Б. Приближенная теория сварочных напряжений / Г. Б. Тальпов — Л. : Изд-во ЛГУ, 1957. — 182 с.
13. Винокуров В. А. Отпуск сварных конструкций для снижения напряжений / В. А. Винокуров. — М. : Машиностроение, 1973. — 215 с.
14. Винокуров В. А. Сварочные деформации и напряжения / В. А. Винокуров. — М. : Машиностроение, 1968. — 236 с.
15. Винокуров В. А. Сварочные деформации и напряжения / В. А. Винокуров. — М. : Машиностроение, 1968.— 236 с.
16. Гатовский К. М. Оценка напряженно-деформированного состояния при стыковой сварке листов больших габаритов / К. М. Гатовский, С. П. Марков, В. С. Налетов // Процессы постройки, сварки и монтажа судов. — Л., 1981. — С. 69–74.
17. 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.

FORECAST EVALUATION OF EFFICIENCY OF INCREASING OF WELDING PROTECTION OF ELEMENTS OF WELDED CONSTRUCTIONS BY THERMAL PROPERTIES

An analysis of influence on the magnitude of the limiting residual stresses of the cycle of welded joints is performed. An equation for determining the maximum boundary stresses of a cycle subjected to the treatment of a welded joint is obtained. The methodology for calculating the effectiveness of the complete elimination of residual stresses by heat treatment is applicable not only for the case when the output residual stresses in the welded joint reach the value of the material yield strength, but also for the case when these stresses do not exceed the value but above the limit value of the initial residual stresses, in which the maximum stresses in the zones of the weld hubs during cyclic loading reaches the value of the material yield strength.

Dependences were obtained for determining the boundary stresses for local heat treatment of metal structures by locally lumped heat fluxes. It has been established that reducing the output level of residual weld stresses increases the boundary of endurance of joints joints. On the basis of the developed method of estimating the impact of residual weld stresses and their redistribution as a result of local heat treatment, the dependence of the limiting value of residual stresses on the coefficient of asymmetry of the external load cycle was investigated.

The analysis of the obtained correlations and experimental data indicates that the local heat treatment leads to a significant increase in the boundary stresses and cyclic durability of the welded joints. The effectiveness of such a type of strengthening of the elements of welded structures depends on the mechanical characteristics of materials, parameters of external load, type of connections, etc. The greatest influence of local heat treatment is on the resistance of fatigue welded joints of constructions in conditions of an alternating load cycle.

Key words: *thermoprocessing, welding, dependable, long-lived, change power, fatigue durability, metal-constructions, machines.*

Отримано: 8.11.2018