

УДК 539.4

В. Книш, докт. техн. наук; С. Соловей, канд. техн. наук

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України

ПІДВИЩЕННЯ ОПОРУ ВТОМІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ З НАКОПИЧЕНИМИ ВТОМНИМИ ПОШКОДЖЕННЯМИ

Резюме. Експериментально досліджено ефективність зміцнення високочастотною механічною проковкою (ВМП) таврових зварних з'єднань з накопиченими втомними пошкодженнями з метою підвищення їх залишкової довговічності та несучої здатності. Показано, що залежно від рівнів максимальних прикладених напружень до зміцнення ВМП та їх тривалості залишкова довговічність таврових зварних з'єднань низьколегованих сталей 09Г2С та 10ХСНД може змінюватися у широкому діапазоні. Виділено три принципово відмінних між собою варіанти прикладення навантажень до та після зміцнення, які визначають ефективність застосування ВМП зварних з'єднань з накопиченими втомними пошкодженнями.

Ключові слова: таврові зварні з'єднання, втома, накопичені втомні пошкодження, високочастотна механічна проковка, підвищення довговічності.

V. Knysh, S. Solovei

IMPROVE FATIGUE RESISTANCE OF WELDED JOINTS WITH CUMULATIVE FATIGUE DAMAGES

Summary. The paper is devoted to determination of effectiveness of application of high-frequency mechanical peening (HFMP) technology for improvement of residual fatigue life of welded joints of metal structures in service, having a significant level of accumulated fatigue damage, but no fatigue cracks. Fatigue testing was conducted on specimens of welded tee-joints of low-alloyed structural steels 09G2S and 10KhSND at zero-to-tension alternating cycle with 5 Hz frequency. To establish the influence of applied loading levels before and after strengthening and their duration four series of specimens (6 specimens in each series) were tested. Proceeding from testing results three fundamentally different variants of load application before and after strengthening were established, which determine the effectiveness of application of HFMP of welded joints with accumulated fatigue damage. It is shown that increase of residual fatigue life of welded joints with long operating life, depends on the levels of accumulated fatigue damage before strengthening and levels of residual stresses in stress raiser zones. It was experimentally established that residual fatigue life of high-loaded (levels of maximum applied stresses in weld zones exceed material yield limit) welded tee-joints after HFMP strengthening at 70% accumulated damage is not inferior to that of joints strengthened in as-welded condition. Shortening the operating life of such joints from 70% to 10% of their fatigue life, improves the joint strengthening effectiveness in 3.1...3.6 times, compared to strengthening at their welding stage. Thus, it is reasonable to perform HFMP strengthening of such structures after putting them into operation. In the case, when the applied service loads do not lead to any essential redistribution of residual welding stresses in the stress raiser zones, treatment of welded joints by HFMP technology should be performed in as-welded condition (immediately after they are made).

Key words: T-shaped welded joints, fatigue, cumulative fatigue damages, high-frequency mechanical peening, fatigue life improvement.

Постановка проблеми. Значна частка відповідальних інженерних зварних металоконструкцій (мости, шляхопроводи, переходи та ін.), які експлуатуються в народному господарстві України, вичерпали призначений при проектуванні термін служби або близькі до цього. Внаслідок дії змінних навантажень у найбільш навантажених зварних вузлах та елементах конструкцій після їх тривалої експлуатації накопичуються втомні пошкодження, зароджуються та розвиваються тріщини втоми. Такі втомні пошкодження суттєво знижують несучу здатність конструкції в цілому. При виконанні ремонтно-відновлювальних робіт, направлених на безпечне продовження терміну служби металоконструкції, необхідно не тільки усунути наявні

тріщини втомі, але й не допустити появу нових тріщин в аналогічних за конструктивним виконанням та рівнем навантаження місцях протягом продовженого терміну служби. Значно підвищити характеристики опору втомі зварних з'єднань дозволяють методи поверхневого пластичного деформування (ППД): дробеструменева обробка, обкатка роликком, пневмопроковка, обробка вибухом та ін. Систематичними дослідженнями, виконаними в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона, показано, що серед існуючих методів ППД застосування високочастотної механічної проковки (ВМП) забезпечує найвищі показники опору втомі зміцнених зварних з'єднань. Ця обробка на сучасному етапі розвитку ресурсощадних технологій є найефективнішим способом зміцнення зварних конструкцій, що піддаються впливу змінних навантажень. Висока ефективність технології ВМП встановлена при зміцненні з'єднань у стані після зварювання, тобто для підвищення експлуатаційного ресурсу конструкцій, які виготовляються. Що стосується ефективності застосування технології ВМП для зміцнення експлуатованих металоконструкцій, то такі дані практично відсутні. Тому роботи, присвячені відновленню технологією ВМП несучої здатності та продовженню терміну служби зварних металоконструкцій, які експлуатуються, з тривалою наробкою в умовах змінного навантаження, є актуальними.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Інтерес до зміцнення технологією ВМП зварних з'єднань металоконструкцій після тривалої експлуатації виник на початку ХХІ сторіччя після створення мобільного і компактного устаткування для ВМП, яке не потребувало наявності інженерних комунікацій та дозволяло зміцнювати конструкції у польових умовах [1 – 5]. Експериментальні дослідження зі встановлення ефективності зміцнення технологією ВМП зварних з'єднань експлуатованих конструкцій проводили, переважно, на з'єднаннях, що відпрацювали 50% довговічності у вихідному (незміцненому) стані. При цьому рівні прикладених максимальних напружень після зміцнення, як правило, залишалися незмінними, тобто такими, як і до зміцнення. Авторами робіт [3, 5] на з'єднаннях матеріалів різного класу міцності були отримані майже однакові результати – після зміцнення зварних з'єднань з 50% рівнем накопичених втомних пошкоджень їх залишкова довговічність збільшувалася в 1,9...2,5 рази у порівнянні зі зміцненням відразу після виготовлення. При цьому було показано, що після зміцнення ВМП максимальні експлуатаційні напруження, які нижчі за границю витривалості зміцнених у вихідному стані зварних з'єднань, пошкодження не спричиняють. У роботі [4] встановлено, що попереднє статичне розтягування з'єднань до зміцнення підвищує ефективність ВМП до 4 разів у порівнянні зі зміцненням у стані після зварювання. Однак у роботі [1] показано, що у ряді випадків (з відмінними рівнями максимальних прикладених напружень до та після зміцнення ВМП) ефективність зміцнення зварних з'єднань з накопиченими втомними пошкодженнями значно нижча у порівнянні зі зміцненням на стадії виготовлення. Така різниця у результатах досліджень, очевидно, зумовлена рівнями максимальних напружень, прикладеними до та після зміцнення ВМП, і потребує додаткових досліджень.

Мета роботи – експериментально встановити ефективність застосування технології ВМП для підвищення залишкової довговічності таврових зварних з'єднань низьколегованих конструкційних сталей залежно від рівнів експлуатаційних навантажень до та після обробки.

Постановка завдання. Експериментальні дослідження проводили на зразках таврових з'єднань низьколегованих сталей 09Г2С ($\sigma_T = 370$ МПа $\sigma_B = 540$ МПа) та 10ХСНД ($\sigma_T = 450$ МПа, $\sigma_B = 570$ МПа) 12 категорії за ГОСТом 19281-89.

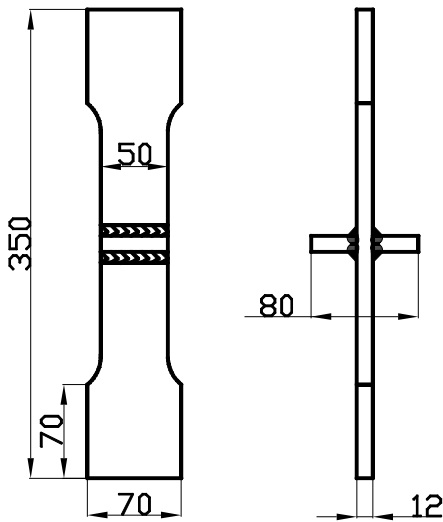


Рисунок 1. Форма та розміри зразків

Figure 1. Geometrical characteristics of specimen

Заготовки під зразки з цієї сталі вирізували з листового прокату так, щоб довша сторона була орієнтована уздовж прокату. Поперечні ребра приварювали кутовими швами з повним проплавленням з двох сторін ручним електродуговим зварюванням електродами марки УОНІ 13/55. Форма і геометричні розміри зразка наведені на рис. 1. Товщина зразка 12 мм зумовлена широкою застосовністю в зварних металоконструкціях прокату товщиною 8...20 мм.

Втомні випробовування зварних зразків проводили на випробувальній машині УРС 20 (з максимальним зусиллям $\pm 20\text{тс}$) при одночасному змінному розтягуванні з асиметрією циклу $R_\sigma = 0$. Частота навантаження складала 5 Гц. Усі зразки

випробовувалися до повного руйнування. Для встановлення ефективності застосування технології ВМП залежно від рівнів прикладених навантажень до та після обробки виготовляли 3 серії зразків (дві зі сталі 09Г2С та одна зі сталі 10ХСНД). Кожна серія складалася з 6 зразків. Криві втоми зварних з'єднань сталей 09Г2С та 10ХСНД у вихідному і зміцненому відразу після зварювання технологією ВМП станах наведено у роботах [5, 6].

Перша серія зразків зі сталі 09Г2С випробовувалась у вихідному стані при рівнях максимальних прикладених напружень, близьких значенню обмеженої границі витривалості на базі $2 \cdot 10^6$ циклів змін напружень (180 МПа), до напрацювання 50% довговічності зразків до повного руйнування. Після зміцнення зразків технологією ВМП рівні прикладених максимальних напружень збільшували до: 260 МПа (2 зразки), 278 МПа (2 зразки) та 296 МПа (2 зразки).

Зразки другої серії зі сталі 09Г2С випробовувались у вихідному стані при рівнях максимальних прикладених напружень, які значно перевищували обмежену границю витривалості на базі $2 \cdot 10^6$ циклів змін напружень (260 МПа), до напрацювання 50% довговічності зразків до повного руйнування. Після зміцнення зразків технологією ВМП рівні прикладених максимальних напружень збільшували до: 275 МПа (2 зразки), 290 МПа (2 зразки) та 305 МПа (2 зразки). Кількість циклів, яка відповідала 50% довговічності при 180 МПа та 260 МПа, розраховувалася по кривій втоми для даних зварних з'єднань, наведеної у роботі [5].

Зразки третьої серії зі сталі 10ХСНД випробовувались у вихідному стані при рівнях максимальних прикладених напружень, які відповідали області багатоциклової втоми зміцнених зварних з'єднань: 280 МПа (2 зразки), 290 МПа (2 зразки) та 300 МПа (2 зразки). Після напрацювання зразками 50% довговічності та наступного зміцнення технологією ВМП рівні прикладених максимальних напружень при подальших випробовуваннях залишалися незмінними. Кількість циклів, яка відповідала 50% довговічності при 280 МПа, 290 МПа та 300 МПа, розраховувалася по кривій втоми для даних зварних з'єднань, наведеної у роботі [6].

Враховуючи дані робіт [1, 4, 5], можна припустити, що на ефективність зміцнення технологією ВМП впливають не тільки рівні прикладених напружень, а й їх тривалість. Для експериментального встановлення впливу довготривалості прикладення напружень до зразків у вихідному стані на їх залишкову довговічність після обробки ВМП було

виготовлено 6 зразків сталі 09Г2С (четверта серія). Зварні з'єднання випробовувалися у вихідному стані при максимальних напруженнях циклу 260 МПа до напрацювання 10%, 30% та 70% довговічності до повного руйнування, по 2 зразки для кожного рівня наробки. Після зміцнення технологією ВМП випробовування продовжували при підвищених до 305 МПа рівнях максимальних напружень циклу.

Результати дослідження. Результати випробовувань перших трьох серій зразків таврових зварних з'єднань сталей 09Г2С та 10ХСНД наведено на рис. 2 та рис. 3.

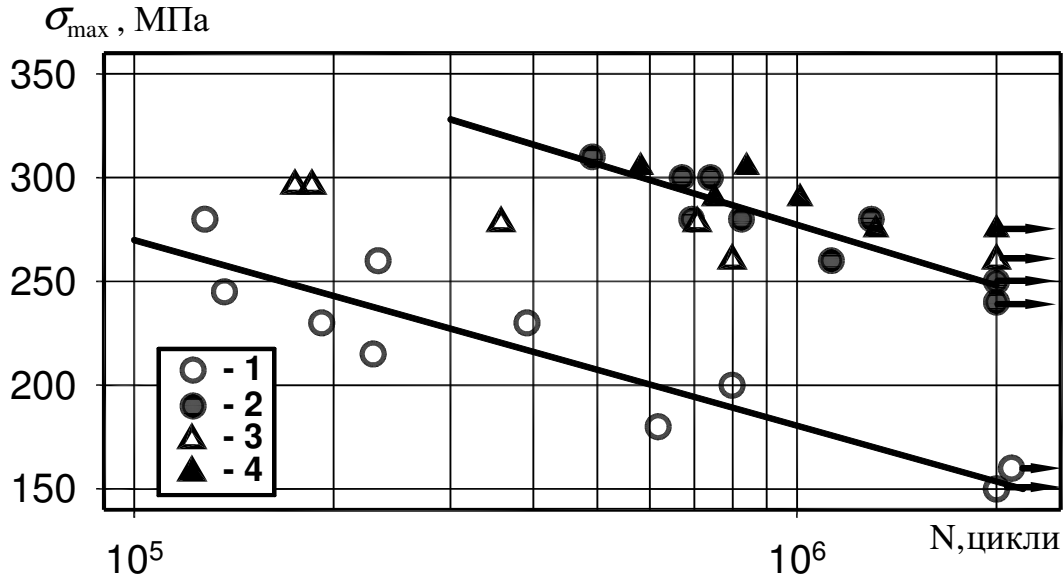


Рисунок 2. Результати втомних випробовувань таврових зварних з'єднань сталі 09Г2С: 1 – у вихідному стані [5]; 2 – зміцнених у стані після зварювання [5]; 3, 4 – зміцнених після накопичення 50% довговічності у вихідному стані при максимальних напруженнях циклу 180 МПа та 260 МПа відповідно

Figure 2. Results of fatigue testing of welded tee-joints of 09G2 steel: 1 – in as-welded condition [5]; 2 – strengthened in as-welded condition [5]; 3, 4 – strengthened after accumulation of 50% of fatigue life in as-welded condition at maximum cycle stresses of 180 MPa and 260 MPa

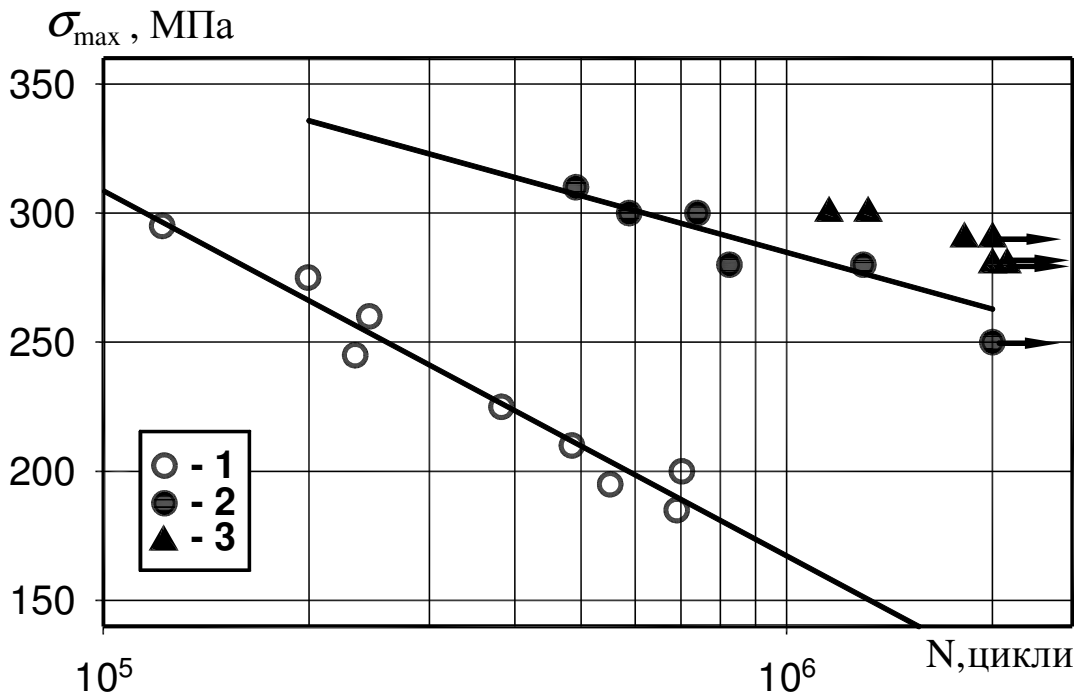


Рисунок 3. Результати втомних випробовувань таврових зварних з'єднань сталі 10ХСНД:

1 – у вихідному стані [6]; 2 – зміцнених у стані після зварювання [6];
3 – зміцнених після накопичення 50% довговічності у вихідному стані

Figure 3. Results of fatigue testing of welded tee-joints of 10KhSND steel:
1 – in as-welded condition [6]; 2 – strengthened in as-welded condition [6];
3 – strengthened after accumulation of 50% of fatigue life in as-welded condition

Як бачимо з рис. 2, зміцнення за технологією ВМП таврових зварних з'єднань, які накопичили 50% втомних пошкоджень при максимальних напруженнях циклу 180 МПа, підвищило їх залишкову довговічність у 2...6 разів в залежно від рівнів прикладених напружень після зміцнення. Проте ці значення залишкової довговічності на 10...70% нижчі за довговічність зварних з'єднань, зміцнених у стані після зварювання. Залишкова довговічність зварних з'єднань, зміцнених технологією ВМП після накопичення 50% втомних пошкоджень при максимальних напруженнях циклу 260 МПа, у 1,05...1,85 рази вища за циклічну довговічність зварних з'єднань, зміцнених у стані після зварювання.

Внаслідок зміцнення технологією ВМП високонавантажених зразків третьої серії зі сталі 10ХСНД із 50% втомними пошкодженнями, їх залишкова довговічність збільшилась в 1,7...2.4 рази у порівнянні з довговічністю зварних з'єднань, зміцнених у стані після зварювання (рис. 3). При цьому три з шести зразків не зруйнувалися при напрацюванні $2 \cdot 10^6$ циклів змін напружень у зміцненому стані.

Отримані результати випробовувань вказують на те, що залишкова довговічність таврових зварних з'єднань, зміцнених технологією ВМП після накопичення 50% втомних пошкоджень, залежить від рівнів прикладених напружень до зміцнення. Це пов'язано з тим, що високі рівні прикладених напружень можуть призвести до часткової або повної релаксації залишкових зварювальних напружень розтягу в зонах зварних швів, а в деяких випадках – спричинити появу в зонах концентраторів пластичних деформацій і наведення залишкових напружень стиску. Для наближеного визначення максимальних напружень циклу σ_{\max} , при яких досягається релаксація залишкових напружень розтягу, можна використовувати рівняння [7]

$$\sigma_{\max} > \sigma_T / \alpha_\sigma$$

де σ_T – границя текучості матеріалу; α_σ – коефіцієнт концентрації напружень, зумовлений формою з'єднання.

Результати випробовувань зварних з'єднань з різним рівнем накопичених втомних пошкоджень (четверта серія зразків) наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Ефективність зміцнення технологією ВМП високонавантажених таврових зварних з'єднань сталі 10ХСНД залежно від рівня накопичених втомних пошкоджень у вихідному стані

Номер зразка	У вихідному (незміцненому) стані			Після зміцнення за технологією ВМП		$\frac{N_{зал}}{N_{зміц}}$, (%)
	$\sigma_{\max}^{нак}$ (МПа)	$N_{нак}$ (тис. цикл.)	D (%)	$\sigma_{\max}^{екс}$ (МПа)	$N_{зал}$ (тис. цикл.)	
1	260	12,8	10,0	305	1871,3	363,8
2	260	12,8	10,0	305	1614,6	313,9

3	260	38,4	30,0	305	1168,5	227,2
4	260	38,4	30,0	305	1407,2	273,6
5	260	64,0	50,0	305	839,5*	163,2
6	260	64,0	50,0	305	580,8*	112,9
7	260	89,6	70,0	305	452,9	88,0
8	260	89,6	70,0	305	628,4	122,2

* – Результати отримані при випробовуваннях другої серії зразків; $\sigma_{\max}^{\text{нак}}$ та $\sigma_{\max}^{\text{екс}}$ – рівні максимальних прикладених напружень до та після зміцнення.

Як бачимо з таблиці 1, залишкова довговічність зварних з'єднань $N_{\text{зал}}$, зміцнених технологією ВМП, підвищується зі зменшенням напрацювання кількості циклів $N_{\text{нак}}$ (долі пошкоженості D) з'єднанням у вихідному (незміцненому) стані. При зміцненні зварних з'єднань після накопичення 70% втомних пошкоджень їх залишкова довговічність $N_{\text{зал}}$ практично не поступається довговічності з'єднань, зміцнених на стадії виготовлення $N_{\text{зміц}}$. Зменшення тривалості наробки таких з'єднань з 70% до 10% їх довговічності у вихідному стані підвищує ефективність зміцнення технологією ВМП зварних з'єднань в 3,1...3,6 рази, у порівнянні зі зміцненням на стадії виготовлення. Це можна пояснити наступним. Високі рівні прикладених напружень призводять до релаксації залишкових зварювальних напружень у зонах швів вже після перших циклів навантаження, але без суттєвого накопичення втомних пошкоджень. Наступні цикли навантаження (збільшення долі пошкоженості D) призводять лише до інтенсивного накопичення втомних пошкоджень [8].

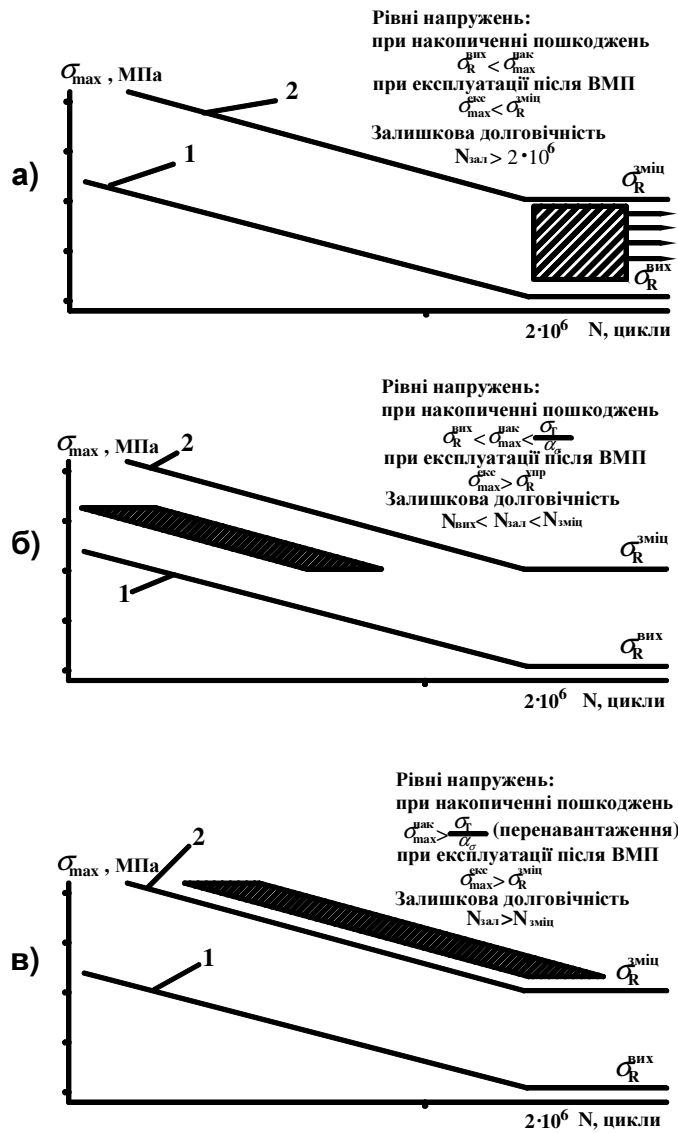


Рисунок 4. Схематичне зображення ефективності застосування технології ВМП: а, б та в – відповідні варіанти прикладення напружень до та після зміцнення
Figure 4. Chart of the effectiveness of application of HFMP: a, б and в – different variants of load application before and after strengthening

накопичують певну частку пошкодженості при рівнях максимальних напружень $\sigma_{max}^{нак}$, що перевищують границю витривалості зварних з'єднань у вихідному стані $\sigma_R^{вих}$. Якщо після зміцнення технологією ВМП зварних з'єднань рівні максимальних експлуатаційних напружень $\sigma_{max}^{екс}$ нижчі за границю витривалості зварних з'єднань у зміцненому стані $\sigma_R^{зміц}$, то залишкова довговічність $N_{зал}$ таких з'єднань перевищує $2 \cdot 10^6$ циклів змін напружень без утворення тріщин втомі (рис. 4а, заштрихована область);

2) елементи зварної металоконструкції, що піддається змінним навантаженням, накопичують певну частку пошкодженості при рівнях максимальних напружень, які не призводять до суттєвого перерозподілу залишкових зварювальних напружень у зоні шва ($\sigma_{max}^{нак} < \sigma_T / \alpha_\sigma$). Після зміцнення технологією ВМП зварних з'єднань рівні

Тому для максимального підвищення залишкової довговічності високонавантажених зварних з'єднань елементів конструкцій зміцнення технологією ВМП доцільно проводити після введення конструкції в експлуатацію.

При цьому необхідно прагнути до якомога меншого терміну їх попередньої експлуатації до зміцнення. Ідеальним варіантом є застосування попереднього статичного перевантаження до виконання обробки ВМП, що за результатами роботи [4] дозволить підвищити довговічність таких зварних з'єднань в 4 рази у порівнянні зі зміцненням у вихідному стані.

Отримані результати зміцнення технологією ВМП зварних з'єднань елементів металоконструкцій з накопиченими втомними пошкодженнями (без утворення втомних тріщин) узагальнено на рис. 4. Виділено три принципово відмінних між собою варіанта прикладення навантажень до та після зміцнення, які визначають ефективність застосування ВМП зварних з'єднань з накопиченими втомними пошкодженнями:

1) елементи зварної металоконструкції, яка піддається змінним навантаженням,

максимальних експлуатаційних напружень $\sigma_{\max}^{\text{екс}}$ підвищують вище за значення границі витривалості з'єднань у зміцненому стані. В цьому випадку залишкова довговічність зварних з'єднань нижча за довговічність зварних з'єднань, зміцнених при виготовленні, але вища за довговічність незміцнених зварних з'єднань (4б, заштрихована область). Залишкова довговічність збільшується зі зменшенням накопичених втомних пошкоджень до зміцнення;

3) елементи зварної металоконструкції, яка піддається змінним навантаженням, накопичують певну частку пошкодженості при рівнях максимальних напружень, які спричиняють повну релаксацію залишкових зварювальних напружень у зоні шва ($\sigma_{\max}^{\text{нак}} < \sigma_T / \alpha_\sigma$). Після зміцнення технологією ВМП зварних з'єднань рівні максимальних експлуатаційних напружень $\sigma_{\max}^{\text{екс}}$ підвищують вище за значення границі витривалості з'єднань у зміцненому стані. В цьому випадку залишкова довговічність зварних з'єднань вища за довговічність зварних з'єднань, зміцнених при виготовленні (4в, заштрихована область). Як і в попередньому випадку залишкова довговічність збільшується зі зменшенням накопичених втомних пошкоджень до зміцнення. Максимальне збільшення залишкової довговічності досягається при статичному перевантаженні до зміцнення.

Висновки. Експериментально встановлено, що в умовах регулярного навантаження ефективність зміцнення технологією ВМП зварних з'єднань з накопиченими втомними пошкодженнями залежить від рівня і тривалості дії прикладеного навантаження до зміцнення. Показано, що залишкова довговічність високонавантажених таврових зварних з'єднань низьколегованих сталей після зміцнення ВМП при 70% накопиченій пошкодженості не поступається довговічності з'єднань, зміцнених у стані після зварювання. Зменшення тривалості напрацювання таких з'єднань з 70% до 10% їх довговічності підвищує ефективність зміцнення з'єднань в 3,1...3,6 рази порівняно зі зміцненням на стадії виготовлення.

Conclusions. It is experimentally established that under the conditions of regular loading, effectiveness of strengthening by HFMP technology of welded joints with accumulated fatigue damage, depends on the level and duration of action of applied stress before strengthening. It is shown that residual fatigue life of high-load welded tee-joints of low-alloyed steels after HFMP strengthening at 70% accumulated damage is not inferior to that of joints strengthened in as-welded condition. Shortening of operating life of such joints from 70% to 10% of their fatigue life improves the effectiveness of joint strengthening in 3.1...3.6 times, compared to strengthening at their welding stage.

Список використаної літератури

1. Гарф, Э.Ф. Оценка долговечности трубчатых узлов, подвергнутых ультразвуковой ударной обработке [Текст] / Э.Ф. Гарф, А.Е. Литвиненко, А.Х. Смирнов // Автомат. сварка. – 2001. – №2. – С. 13 – 16.
2. Kuhlmann, U. Verlängerung der lebensdauer von schweißkonstruktion aus höher festen baustählen durch Anwendung der UIT-technologie/ U. Kuhlmann, A. Dürr, P. Günther, J. Bergmann, R. Thumser, U. Gerth, P. Gerster // Schweißen und Schneiden. – 2005. – Vol. 57. – №8. – P. 384 – 391.
3. Kudryavtsev, Y. Rehabilitation and repair of welded elements and structures by ultrasonic peening / Y. Kudryavtsev, J. Kleiman, A. Lugovskoy, L. Lobanov, O. Voitenko, G. Prokopenko // Welding in the World. – 2007. – Vol. 51. – №7 – 8. – P. 47 – 53
4. Zhao, X. Analysis of the S-N curves of welded joints enhanced by ultrasonic peening treatment / X. Zhao, D. Wang, L. Huo // Materials & Design. – 2011. – Vol. 32. – №1. – P. 88 – 96.
5. Прокопенко, Г. Подовження залишкового ресурсу зварних з'єднань сталей Ст3сп і 09Г2С високочастотним механічним проковуванням [Текст] / Г. Прокопенко, В. Книш, С. Соловей // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – 2011. – Спецвипуск. – Частина 2. – С. 35 – 41.
6. Сопротивление коррозионной усталости сварных соединений, упрочненных высокочастотной механической проковкой [Текст] / В.В. Книш, И.И. Вальтерис, А.З. Кузьменко, С.А. Соловей //

- Автомат. сварка. – 2008. – №4. – С. 5 – 8.
7. Прочность сварных соединений при переменных нагрузках [Текст]; под ред. В.И. Труфякова. – К.: Наукова думка, 1990. – 256 с.
 8. Труфяков, В.И. Усталость сварных соединений [Текст] / В.И. Труфяков. – К.: Наукова думка, 1973. – 216 с.

Отримано 15.08.2013