В.В.Книш, С.О.Соловей, В.М.Булаш, А.О.Гришанов

ПІДВИЩЕННЯ ОПОРУ ВТОМІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ З НАКОПИЧЕНИМИ ВТОМНИМИ ПОШКОДЖЕННЯМИ ПОВЕРХНЕВИМ ПЛАСТИЧНИМ ДЕФОРМУВАННЯМ*

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України,
вул. Казимира Малевича, 11, 03150, Київ, Україна; e-mail: 2052382@gmail.com

Abstract. The fatigue life of the butt and T-welded joints of the 09G2S steel when treated by the high-frequency mechanical impact treatment are studied both for as-welded joints and joints with accumulated fatigue damages. Fatigue tests established that residual fatigue life of welded joints treated by high-frequency mechanical impact treatment after accumulated fatigue damage depends both on the level accumulated fatigue damage and on the magnitude of the maximum cycling stress applied before and after peening. The effectiveness of increasing the residual fatigue life of welded joints with accumulated fatigue damage after their peening by high-frequency mechanical impact processing is quantitatively assessed.

Key words: welded joint, accumulative fatigue damage, fatigue life, high-frequency mechanical impact.

Вступ.

Довговічність зварних металоконструкцій, які експлуатуються під дією змінних циклічних навантажень (мости, морські стаціонарні платформи, щогли антен, крани, рами візків залізничних локомотивів, екскаватори, сільськогосподарські машин тощо) визначається показниками опору втомі зварних з'єднань їх елементів, значення яких нижчі, ніж основного металу [2, 7]. При тривалій експлуатації в зоні концентраторів напружень таких металоконструкцій відбувається накопичення втомних пошкоджень, рівень яких може наближатися до критичного при наближенні до призначеного на етапі їх проектування терміну служби. Проте іноді економічна доцільність потребує продовження терміну безпечної експлуатації конструкції з накопиченими втомними пошкодженнями на основі оцінки їх реального стану без додаткових технологічних втручань, або після проведення відповідних ремонтно-відновлювальних робіт. При проведені ремонтно-відновлювальних робіт конструкцій з втомними пошкодженнями головне завдання полягає в зміцненні обробкою зон концентраторів напружень з метою підвищення їх опору втомі [4, 9, 14]. Для підвищення опору втомі зварних з'єднань широко застосовуються методи поверхневого пластичного деформування (ППД) металу. Одним з цих методів, який рекомендовано Міжнародним інститутом зварювання для підвищення характеристик опору втомі зварних з'єднань алюмінієвих та сталевих конструкцій, є обробка високочастотним механічним проковуванням (ВМП) з використанням енергії ультразвуку [6, 15]. За технологією ВМП обробці піддається вузька зона переходу металу шва на основний метал. Внаслідок обробки відбувається

* За матеріалами доповіді на Міжнародній науковій конференції «Сучасні проблеми механіки – 2023», присвяченій 145-річчю від дня народження С.П. Тимошенка, Київ, 14 – 16 листопада 2023 р.

інтенсивне пластичне деформування поверхневого шару металу, в якому наводяться залишкові напруження стиску близькі до границі текучості матеріалу, збільшується твердість, відбуваються зміни в структурі металу з подрібненням зерен до нанорозмірів (90 ... 120 нм) в тонкому шарі металу (~ 30 мкм), зменшується коефіцієнт концентрації напружень з'єднання [16, 18, 19, 21, 23, 25]. Багаторічними дослідженнями встановленні основні закономірності підвищення опору втомі зварних з'єднань металоконструкцій зміцнених ВМП на стадії виготовлення в залежності від класу міцності сталі, типу з'єднання, характеристик циклу змінного навантаження, впливу корозійних середовищ тощо [3, 5, 10, 11, 20, 22]. За консервативним оцінюванням внаслідок зміцнення ВМП лінії сплавлення з'єднань мінімальне підвищення границі витривалості з'єднань складає 30%, а циклічна довговічність при цьому збільшується у чотири рази [22]. Більшість проведених експериментальних досліджень з встановлення ефективності застосування ВМП стосується з'єднань, зміцнених на стадії виготовлення. Даних щодо збільшення залишкової довговічності зварних з'єднань, зміцнених технологією ВМП після накопичення втомних пошкоджень, представлено значно менше [1, 12, 13, 24]. Результати цих робіт показують, що ефективність зміцнення технологією ВМП зварних з'єднань конструкцій, які внаслідок тривалої експлуатації мають накопичені втомні пошкодження, залежить від рівня максимальних напружень циклу навантаження та кількості циклів напрацювання до зміцнення.

Мета даної роботи полягає у встановленні залишкової втомної довговічності зміцнених за технологію ВМП стикових і таврових зварних з'єднань низьколегованої сталі 09Г2С з накопиченими втомними пошкодженнями різного рівня в залежності від величини максимальних напружень віднульового циклу до та після зміцнення.

1. Постановка задачі. Вихідні положення.

Розглядається багатоциклове ($N_R > 10^4$) втомне руйнування зразків таврових і стикових зварних з'єднань сталі 09Г2С за умов одновісного віднульового циклічного розтягування з частотою 5 Гц. При цьому максимальне напруження в циклі $\sigma_{\max}$ не перевищує σ_Y . Зразки з'єднань випробовуються на втому у вихідному після зварювання стані та після їх зміцнення за технологією ВМП комплексом USTREAT-3.0 [17]. Всі зразки випробовуються до повного руйнування або досягнення бази випробувань $2 \cdot 10^6$ циклів змін напружень. На основі отриманих експериментальних даних будуються криві втоми незміцнених і зміцнених ВМП з'єднань, як 50% лінії регресії експериментальних даних. Рівень втомних пошкоджень $D_i^{\text{вих}}$ в незміцнених зразках, накопичений при максимальному напруженні циклу $\sigma_{\max i}$, у відповідності з лінійною гіпотезою підсумовування втомних пошкоджень задається відношенням [7, 8]:

$$D_i^{\text{вих}} = \frac{N_i^{\text{вих}}}{N_{Ri}^{\text{вих}}}, \tag{1}$$

де $N_i^{\text{вих}}$ і $N_{Ri}^{\text{вих}}$ – відповідно кількість циклів навантаження без руйнування і при руйнуванні незміцненого зразка, визначені на основі встановленої кривої втомі для заданого значення $D_i^{\text{вих}}$ ($N_i^{\text{вих}} < N_{\text{Ri}}^{\text{вих}}$).

Аналогічно рівень втомних пошкоджень $D_{\text{зал}j}^{\text{ВМП}}$, накопичених після зміцнення зварних з'єднань з рівнем пошкоджень $D_i^{\text{вих}}$, при максимальному напружені циклу $\sigma_{\max j}$ ($\sigma_{\max i} < \sigma_{\max j}$), задається відношенням

$$D_{\text{зал}j}^{\text{ВМП}} = \frac{N_{\text{зал}j}^{\text{ВМП}}}{N_{Rj}^{\text{ВМП}}}, \tag{2}$$

де $N_{\text{зал}j}^{\text{ВМП}}$ і $N_{Rj}^{\text{ВМП}}$ – відповідно кількість циклів навантаження при руйнуванні зразків, зміцнених ВМП при накопиченні пошкодженості $D_i^{\text{вих}}$ та без пошкоджень. $N_{Rj}^{\text{ВМП}}$ визначається з відповідних кривих втоми з'єднань, зміцнених у вихідному стані після зварювання.

Гранична сумарна пошкодженість зварних з'єднань (до та після зміцнення) D_f при максимальному напружені циклу $\sigma_{\max j}$ визначається сумою:

$$D_f = D_j^{\text{вих}} + D_{\text{зал}j}^{\text{ВМП}}, \tag{3}$$

де $D_j^{\text{вих}}$ – пошкодженість при максимальному напруженні циклу $\sigma_{\max j}$, еквівалентна пошкодженості $D_i^{\text{вих}}$ при максимальному напруженні циклу $\sigma_{\max i}$.

У роботі [1] при лінійному підсумовуванні накопичених втомних пошкоджень в зварних з'єднань до та після зміцнення ВМП рекомендували приймати $D_f = 1$.

Залишкова довговічність незміцнених зразків з'єднань з накопиченими втомними пошкодженнями $D_j^{\text{вих}}$ визначається з встановленої кривої втоми для цих з'єднань

$$N_{\text{зал}j}^{\text{вих}} = N_{Rj}^{\text{вих}} - N_j^{\text{вих}}. \tag{4}$$

Кількісну оцінку ефективності підвищення залишкової довговічності зварних з'єднань з накопиченими втомними пошкодженнями на рівні $D_j^{\text{вих}}$ після їх зміцнення технологією ВМП пропонується проводити за величиною коефіцієнта η_j, який визначається відношенням

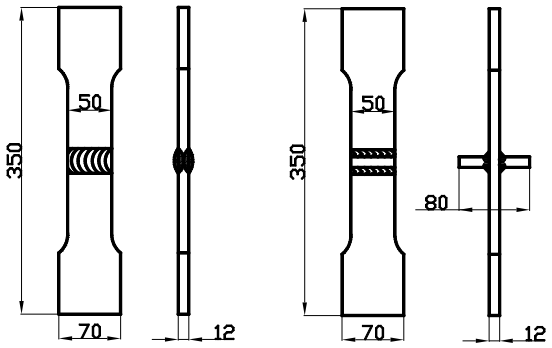
$$\eta_j = \frac{N_{\text{зал}j}^{\text{ВМП}}}{N_{\text{зал}j}^{\text{вих}}}, \tag{5}$$

де $N_{\text{зал}j}^{\text{ВМП}}$ – залишкова довговічність при руйнуванні зразків з'єднань, зміцнених ВМП після накопичення втомних пошкоджень на рівні $D_j < 1$.

Задача полягає в експериментальному встановленні значень коефіцієнта підвищення залишкової довговічності η_j таврових і стикових зварних з'єднань сталі 09Г2С з накопиченими втомними пошкодженнями післязварювальною обробкою ВМП та значень граничної сумарної пошкодженості D_f в залежності від величини максимальних напружень циклу до і після обробки.

2. Довговічність зразків з'єднань.

Дослідження проводилися на зразках стикових та таврових зварних з'єднань сталі 09Г2С ($\sigma_T = 370$ МПа, $\sigma_B = 490$ МПа), виготовлених з прокату товщиною 12 мм. Форма і геометричні розміри зразків приведені на рис. 1 (*а* – стикове з'єднання, *б* – таврове з'єднання). Ефективність застосування ВМП для збільшення залишкової довговічності таврових зварних з'єднань з різним рівнем накопичених втомних пошкоджень досліджували у діапазоні максимальних напружень циклу навантаження 180 … 305 МПа. Розглянуто як два різні рівні максимальних напружень (180 МПа та 260 МПа) циклічного навантаження зразків у вихідному стані (до зміцнення) при накопиченні 50% втомних пошкоджень впливають на залишкову довговічність з'єднань після зміцнення. Досліджено вплив рівня накопичених втомних пошкоджень (10 … 70%) при значенні максимального напруження циклу навантаження 260 МПа у вихідному стані на залишкову довговічність з'єднань після зміцнення, випробуваних при максимальних напруженнях циклу 305 МПа.



а *б*

Рис. 1

На рис. 2 представлені криві втоми таврових з'єднань, випробуваних у вихідному стані після зварювання (точки 1) та після зміцнення у вихідному стані технологією ВМП (точки 2). Також на рисунку приведені дані випробувань зразків з'єднань, зміцнених технологією ВМП після накопичення 50% рівня втомних пошкоджень при максимальних напруженнях циклу навантаження 180 МПа (точки 3) та 260 МПа (точки 4).

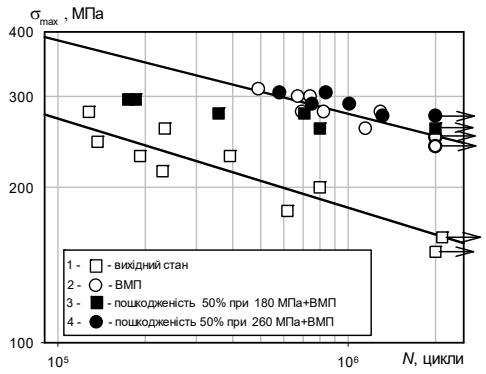


Рис. 2

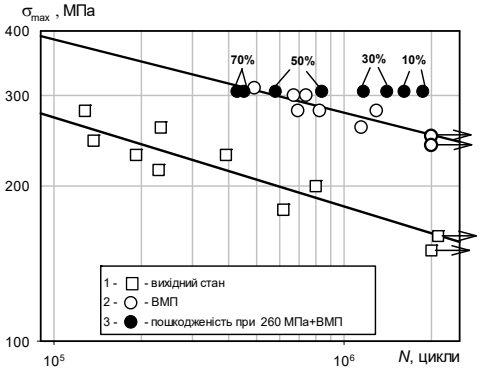


Рис. 3

На рис. 3 окрім кривих втоми таврових з'єднань у вихідному (точки 1) та зміцненому ВМП (точки 2) станах приведені дані випробування зразків, зміцнених ВМП після накопичення 10 … 70% втомних пошкоджень при максимальних напруженнях циклу навантаження 260 МПа (точки 3).

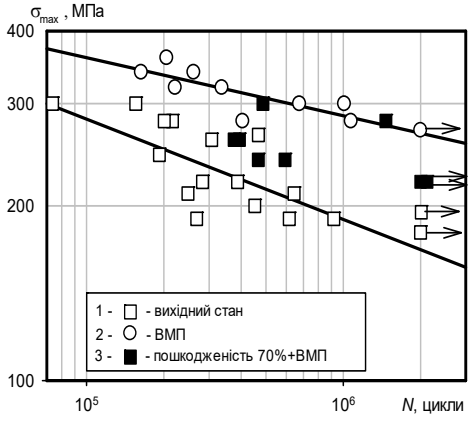


Рис. 4

Ефективність застосування ВМП для збільшення залишкової довговічності стикових зварних з'єднань з накопиченими втомними пошкодженнями досліджували у діапазоні максимальних напружень циклу навантаження 220 … 300 МПа. Зміцнення технологією ВМП проводили при накопиченні 70% втомних пошкоджень у незміцненому стані. Після зміцнення втомні випробування зразків продовжували на тих самих рівнях максимальних напружень циклу, що і до зміцнення. На рис. 4 приведені криві втоми стикових зварних з'єднань у вихідному (точки 1)

та зміцненому ВМП відразу після зварювання (точки 2) станах, а також результати випробувань зразків з'єднань, зміцнених ВМП після накопичення 70% рівня втомних пошкоджень (точки 3).

В таблиці приведені дані випробувань зразків з'єднань на втому, значення рівнів пошкоджень з'єднань до зміцнення та після зміцнення, значення граничної сумарної пошкодженості зразків та величина коефіцієнта підвищення довговічності з'єднань зміцненням ВМП.

Таблиця

Тип зразків	Номер зразка №	Пошкодженість зразків до зміцнення		Залишкова довговічність з'єднань				D_f	η_j
		$\sigma_{\max i}$ (МПа)	$D_i^{\text{вих}}$	$\sigma_{\max j}$ (МПа)	$N_{\text{зал}j}^{\text{вих}}$ (тис. циклів)	$N_{\text{зал}j}^{\text{ВМП}}$ (тис. циклів)	$D_{\text{зал}\,j}^{\text{ВМП}}$		
Таврове з'єднання	1	**180**	0,5	**260**	64	798,8	0,52	1,02	12,5
	2	**180**	0,5	**260**	64	>2000,0*	>1,30	>1,80	>31,3
	3	**180**	0,5	**278**	43,5	707,0	0,71	1,21	16,3
	4	**180**	0,5	**278**	43,5	357,5	0,36	0,86	8,2
	5	**180**	0,5	**296**	30,2	174,7	0,27	0,77	5,8
	6	**180**	0,5	**296**	30,2	185,3	0,29	0,79	6,1
	7	**260**	0,5	**275**	46,6	>2000,0*	>1,87	>2,37	>43,0
	8	**260**	0,5	**275**	46,6	1315,6	1,23	1,73	28,3
	9	**260**	0,5	**290**	34,3	751,1	1,01	1,51	21,9
	10	**260**	0,5	**290**	34,3	1011,0	1,37	1,87	29,5
	11	**260**	0,1	**305**	46,0	1871,3	3,64	3,74	40,7
	12	**260**	0,1	**305**	46,0	1614,6	3,14	3,24	35,1
	13	**260**	0,3	**305**	35,8	1168,5	2,27	2,57	32,7
	14	**260**	0,3	**305**	35,8	1407,2	2,74	3,04	39,3
	15	**260**	0,5	**305**	25,6	839,5	1,63	2,13	32,9
	16	**260**	0,5	**305**	25,6	780,8	1,52	2,02	30,6
	17	**260**	0,7	**305**	15,3	452,9	0,88	1,58	29,5
	18	**260**	0,7	**305**	15,3	428,4	0,83	1,53	27,9
Стикове з'єднання	1	**220**	0,7	**220**	139,0	>2000,0*	>0,25	>0,95	>14,4
	2	**220**	0,7	**220**	139,0	>2000,0*	>0,25	>0,95	>14,4
	3	**240**	0,7	**240**	88,5	466,8	0,11	0,81	5,3
	4	**240**	0,7	**240**	88,5	593,1	0,14	0,84	6,7
	5	**260**	0,7	**260**	56,3	393,7	0,17	0,87	7,0
	6	**260**	0,7	**260**	56,3	375,6	0,16	0,86	6,7
	7	**280**	0,7	**280**	36,0	1465,7	1,20	1,90	40,7
	8	**300**	0,7	**300**	22,7	486,6	0,75	1,45	21,4

* – зразок не зруйнувався при досягненні бази випробувань 2 млн. циклів.

3. Аналіз результатів.

Значення граничної сумарної накопиченої втомної пошкодженості D_f, отримані при випробуванні зразків таврових зварних з'єднань сталі 09Г2С, зміцнених при накопиченні 50% втомних пошкоджень при максимальному напруженні 180 МПа, знаходяться у діапазоні 0,77 … 1,21 (табл.). При цьому один зразок не зруйнувався після

досягнення бази випробувань $2 \cdot 10^6$ циклів змін напружень у зміцненому ВМП стані (значення D_f більше 1,80). Коефіцієнт підвищення довговічності з'єднань після застосування технології ВМП η_j збільшується із зниженням максимальних напружень циклу навантаження після зміцнення. Значення граничної сумарної накопиченої втомної пошкодженості D_f, отримані при випробуванні зразків таврових з'єднань, зміцнених після накопичення 50% пошкоджень при більш високих максимальних напруженнях циклу 260 МПа, знаходяться у діапазоні 1,51 … 2,13. При цьому один зразок не зруйнувався після досягнення бази випробувань $2 \cdot 10^6$ циклів змін напружень у зміцненому ВМП стані (значення D_f більше 2,37). Збільшення значень D_f з'єднань, які відповідають $\sigma_{\max} = 260$ МПа у порівнянні з $\sigma_{\max} = 180$ МПа при накопиченні пошкоджень, пов'язано з тим, що високі рівні прикладених номінальних напружень до зміцнення з'єднань призводять в поверхневих шарах металу в зонах концентраторів (зони переходу металу шва на основний метал) до структурних змін, релаксації залишкових зварювальних напружень розтягу, підвищення механічних властивостей матеріалу. Це збільшує ефективність обробки при подальшому зміцненні технологією ВМП, η_j збільшується до значень 21,9 … 32,9 у всьому діапазоні напружень після зміцнення (табл.).

При високих прикладених напруженнях до таврових зварних з'єднань рівень накопичених втомних пошкоджень у вихідному стані має визначальний вплив на залишкову довговічність з'єднань після зміцнення ВМП. Так, значення граничної накопиченої втомної пошкодженості при накопиченні 70% втомних пошкоджень до зміцнення знаходяться в діапазоні 1,53 … 1,58, при накопиченні 50% – в діапазоні 2,02 … 2,13, при накопиченні 30% – в діапазоні 2,57 … 3,04, а при накопиченні 10% – в діапазоні 3,24 … 3,74. Ефективність зміцнення η_j також підвищується з 27,9 до 40,7 із зниженням рівня накопичених втомних пошкоджень у вихідному стані. При цьому слід відмітити, що зміцнення високонавантажених зварних з'єднань з 50%, 30% і 10% рівнями накопичених втомних пошкоджень призводить до збільшення залишкової довговічності, відповідно, в 1,52 … 1,63, в 2,27 … 2,74 і в 3,14 … 3,64 рази у порівнянні з довговічністю зварних з'єднань, зміцнених ВМП на стадії виготовлення.

Залишкова довговічність стикових зварних з'єднань, зміцнених ВМП при накопиченні 70% втомних пошкоджень, при максимальних напруженнях циклу 220 МПа становила більше $2 \cdot 10^6$ циклів змін напружень (рис. 4). Залишкова довговічність зварних з'єднань, які випробовували на рівнях максимальних напружень циклу навантаження 240 … 260 МПа, після зміцнення знаходиться в межах розкиду експериментальних даних зварних з'єднань у вихідному (незміцненому) стані. При цьому ефективність зміцнення η_j находиться у діапазоні 5,3 … 7,0 (табл.). Залишкова довговічність зварних з'єднань, які випробовували на рівнях максимальних напружень циклу 280 … 300 МПа, після зміцнення знаходиться в межах розкиду експериментальних даних зварних з'єднань, зміцнених ВМП відразу після зварювання (рис. 4). Ефективність зміцнення може сягати значень 21,4 … 40,7.

Отримані експериментальні дані при випробуванні стикових зварних з'єднань підтверджують експериментальні дані, отримані при випробуванні таврових з'єднань, про те, що збільшення рівнів прикладених максимальних напружень циклу при попередньому циклічному навантаженні призводить до більш суттєвого підвищення опору втомі зварних з'єднань після зміцнення технологією ВМП. Оскільки відчутні зміни структури металу, релаксація залишкових зварювальних напружень розтягу та інші зміни будуть відбуватися при локальному пластичному деформуванні поверхневих шарів металу в зонах концентраторів напружень (зони переходу металу шва на основний метал), то максимальні напруження циклу $\sigma_{\max i}$ до зміцнення повинні задоволь-

няти нерівність $\sigma_{\max i} > \sigma_T / \alpha_\sigma$ (де σ_T – границя текучості матеріалу, а α_σ – значення теоретичного коефіцієнту концентрації напружень з'єднання).

Висновок.

Побудовано криві втоми стикових і таврових зварних з'єднань сталі 09Г2С у вихідному та зміцненому високочастотним механічним проковуванням станах. Досліджено особливості підвищення технологією ВМП залишкової довговічності зварних з'єднань з накопиченими втомними пошкодженнями в діапазоні 10%...70% при різних рівнях максимальних напружень циклічного навантаження до та після зміцнення. Показано, що при лінійному підсумовуванні втомних пошкоджень в зварних з'єднаннях до та після зміцнення ВМП значення граничної сумарної втомної пошкодженості знаходяться в діапазоні 0,86…3,74. Запропоновано коефіцієнт кількісної оцінки ефективності підвищення залишкової довговічності зварних з'єднань з втомними пошкодженнями після їх зміцнення технологією ВМП. Визначено значення цього коефіцієнта в залежності від рівня втомних пошкоджень з'єднань у вихідному стані і величини максимальних напружень циклу до та після зміцнення ВМП. Виявлено, що високі максимальні напруження циклічного навантаження, прикладеного до стикових і таврових зварних з'єднань при накопиченні втомних пошкоджень у вихідному стані, суттєво збільшують їх залишкову довговічність після зміцнення ВМП. При цьому втомна довговічність високонавантажених таврових зварних з'єднань із 70% накопиченими втомними пошкодженнями після обробки ВМП відповідає втомній довговічності з'єднань, оброблених ВМП відразу після виготовлення (без втомних пошкоджень). Зміцнення таких з'єднань з 50%, 30% і 10% рівнями накопичених втомних пошкоджень призводить до збільшення залишкової довговічності, відповідно, в 1,52 … 1,63, в 2,27 … 2,74 і в 3,14 … 3,64 рази у порівнянні з довговічністю зварних з'єднань, зміцнених ВМП на стадії виготовлення.

РЕЗЮМЕ. Проведено дослідження довговічності стикових і таврових зварних з'єднань сталі 09Г2С при зміцненні високочастотним механічним проковуванням у станах після зварювання та після накопичення втомних пошкоджень. Випробуваннями на втому встановлено, що залишкова довговічність зварних з'єднань, зміцнених високочастотним механічним проковуванням після накопичення втомних пошкоджень, залежить як від рівня накопичених втомних пошкоджень, так і від величини максимальних напружень циклу до та після обробки. Виконано кількісну оцінку ефективності підвищення залишкової довговічності зварних з'єднань з накопиченими втомними пошкодженнями після їх зміцнення високочастотним механічним проковуванням.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: зварне з'єднання, накопичене втомне пошкодження, втомна довговічність, високочастотна механічна проковка.

1. *Гарф Э.Ф., Литвиненко А.Е., Смирнов А.Х.* Оценка долговечности трубчатых узлов, подвергнутых ультразвуковой ударной обработке // Автомат. сварка. – 2001. – N 2. – С. 13 – 16.
2. *Труфяков В.И.* Усталость сварных соединений. – Киев: Наукова думка, 1973. – 220 с.
3. *Abdullah A., Malaki M., Eskandari A.* Strength enhancement of the welded structures by ultrasonic peening // Mater. Design. – 2012. – **38**. – P. 7 – 18.
4. *Abston S.* The technology and applications of ultrasonic impact technology // Australasian Welding Journal. – 2010. – **55**. – P. 20 – 21.
5. *Al-Karawi H., von Bock und Polach R.U.F., Al-Emrani M.* Fatigue life extension of existing welded structures via high frequency mechanical impact (HFMI) treatment // Eng. Struct. – 2021. – **239**. – Article number 112234.
6. *Haagensen P.J., Maddox S J.* IIW Recommendations on Post Weld Improvement of Steel and Aluminium Structures. – IIW Doc. XIII-1815-00. – 45 p.
7. *Hobbacher A.F.* Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components. IIW Collection. – New York: Springer, 2009. – 150 p.

8. *ISO 12110-1:2013* Metallic materials – Fatigue testing – Variable amplitude fatigue testing – Part 1: General principles, test method and reporting requirements. – 2013. – 12 p.
9. *Kleiman J., Kudryavtsev Y., Lugovskyi O.* Effectiveness of ultrasonic peening in fatigue improvement of welded elements and structures // Mechanics and Advanced Technologies. – 2017. – **81**, N3. – P. 92 – 98.
10. *Knysh V.V., Mordyuk B.N., Prokopenko G.I., Solovey S.A.* Increasing corrosion fatigue of welded joints of steel 15khsnd with construction defects by electric discharge surface alloying and high frequency mechanical impact // Metallofizika i Noveishie Tekhnologii. – 2019. – **41**, N 12. – P. 1631 – 1652.
11. *Knysh V.V., Solovei S.A., Kir'yan V.I., Bulash V.N.* Increasing the corrosion fatigue resistance of welded joints by high-frequency mechanical peening // Strength of Materials. – 2018. – **50**, N 3. – P. 443 – 447.
12. *Knysh V.V.*, *Solovei S., Motrunich S., Nyrkova L., Yıldırım H.C.* Influence of the accelerated corrosion exposure on the fatigue behaviour of welded joints treated by high frequency mechanical impact // Int. J. Fatigue. – 2021. – **149**. – Article number 106272.
13. *Knysh V.V., Solovei S.O., Nyrkova L.I., Osadchuk S.O*. Influence of marine media on the fatigue strength of butt welded joints of 15KhSND steel hardened by high-frequency mechanical impacts // Materials Science. – 2020. – **55**, N 6. – P. 812 – 821.
14. *Lefebvre F., Peyrac C., Elbel G., Revilla-Gomez C., Verdu C., Buffiere J.Y.* HFMI: understanding the mechanisms for fatigue life improvement and repair of welded structures // Welding in the Word. – 2017. – **61**, N 4. – P. 789 – 799.
15. *Marquis G.B., Barsoum Z.* IIW recommendations on high frequency mechanical impact (HFMI) treatment for improving the fatigue strength of welded joints. In: IIW Recommendations for the HFMI Treatment. – Singapore: Springer, 2016. – P. 1 – 34.
16. *Mordyuk B.N., Prokopenko G.I.* Ultrasonic impact treatment – an effective method for nanostructuring the surface layers in metallic materials. In: M. Aliofkhazraei (Ed.) Handbook of Mechanical Nano-structuring. – Weinheim: Wiley-VCH, 2015. – P. 417 – 434.
17. *Prokopenko G.I., Mordyuk B.M., Krasovsky T.A., Knysh V.V., Solovey S.O.* Creation of industrial equipment for high frequency mechanical impact on railway car building products and methods for assessing the quality of treatment // Science and Innovation. – 2019. – **15**, N 2. – P. 25 – 37.
18. *Volosevich P.Yu., Prokopenko G.I., Knysh V.V., Vojtenko O.V.* Structural changes in a zone of a joint weld of St3 steel under ultrasonic shock treatment and their influence on a raise of fatigue resistance // Metallofizika i Noveishie Tekhnologii. – 2008. – **30**, N 10. – P. 1429 – 1443.
19. *Wang T., Wang D.P., Huo L.X., Zhang Y.F.* Discussion on fatigue design of welded joints enhanced by ultrasonic peening treatment (UPT) // Int. J. Fatigue. – 2009. – **31**. – P. 644 – 650.
20. *Weinert J., Gkatzogiannis S., Engelhardt I., Knoedel P., Ummenhofera T.* Investigation of corrosive influence on the fatigue behaviour of HFMI-treated and as-welded transverse non-load-carrying attachments made of mild steel S355 // Int. J. Fatigue. – 2021. – **151**. – Article number 106225.
21. *Ya M., Xing Y.M., Dai F.L., Lu K., Lu J.* Study of residual stress in surface nanostructured AISI 316L stainless steel using two mechanical methods // Surf. Coat. Technol. – 2003. – **168**, N 2 – 3. – P. 148 – 155.
22. *Yildirim H.C., Marquis G.B.* Overview of fatigue data for high frequency mechanical impact treated welded joints // Welding in the World. – 2012. – **56**, N 7 – 8. – P. 82 – 96.
23. *Yuan K.L., Sumi Y.* Simulation of residual stress and fatigue strength of welded joints under the effects of ultrasonic impact treatment (UIT) // Int. J. Fatigue. – 2016. – **92**. – P. 321 – 332.
24. *Zhao X., Wang D., Huo L.* Analysis of the S-N curves of welded joints enhanced by ultrasonic peening treatment // Mater. Design. – 2011. – **32**, N 1. – P. 88 – 96.
25. *Zhao X.H., Wang M.G., Zhang Z.Q., Liu Y.* The effect of ultrasonic peening treatment on fatigue performance of welded joints // Materials. – 2016. – **9**, N 6. – Article number 471.

Надійшла 01.10.2024 Затверджена до друку 11.06.2024