

УДК 621.791.052:620.193.2

**В. Книш**

Ст. наук. співр., канд. фіз.-мат. наук

**О. Кузьменко**

Інженер

**С. Соловей**

Інженер

Інститут електрозварювання  
ім. Є.О. Патона НАН України,  
м. Київ

## **НАКОПИЧЕННЯ ВТОМНИХ ПОШКОДЖЕНЬ У ТАВРОВИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАННЯХ У ПОЧАТКОВОМУ І ЗМІЦНеноМУ ВИСОКОЧАСТОТНИМ ПРОКОВУВАННЯМ СТАНАХ ПРИ БЛОКОВОМУ НАВАНТАЖЕННІ**

*У рамках гіпотези лінійного підсумовування втомних пошкоджень встановлені критерії руйнування таврових зварних з'єднань сталі 09Г2С у початковому і зміцненому технологією ВМП після зварювання станах в умовах блокового навантаження при зростаючій, спадаючій і квазівипадковій послідовностях прикладення навантажень у кожному блоці. Показано, що для консервативного оцінювання довговічності цих з'єднань в умовах блокового навантаження можна приймати єдиний критерій втомного руйнування рівний 0,5 як для незміцнених, так і для зміцнених технологією ВМП з'єднань.*

**накопичення втомних пошкоджень, високочастотне механічне проковування, циклічна довговічність, втома, зварне з'єднання, зміцнення**

Вичерпання ресурсу виробу або конструкції, що працюють в умовах тривалої експлуатації при змінних навантаженнях, прийнято подавати у вигляді процесу поступового накопичення втомних пошкоджень матеріалом, що приводить до зміни його властивостей, зародженню і розвитку тріщин та, зрештою, до руйнування. При цьому навіть знаючи найбільш вірогідні місця виникнення втомної тріщини в елементах зварних конструкцій, достатньо складно вірогідно визначити якісну або кількісну міру пошкоженості матеріалу до зародження мікротріщини. В [1 — 4] пошкоженість матеріалу пропонують оцінювати за зміною стану поверхні за допомогою гальванічних плівок, твердості, мікротвердості, густини і т.п. Проте точність визначення частки пошкоженості матеріалу за допомогою вищезгаданих

методів залежить від багатьох чинників, тому вони не завжди можуть бути застосовані до реальних конструкцій. Як правило, розв'язування задач з оцінювання й прогнозування довговічності таких конструкцій, припускає розрахункове визначення напружено-деформованого стану їхніх зварних елементів і встановлення закону підсумовування втомних пошкоджень, в якості міри яких приймається відношення кількості циклів напрацювання на заданих рівнях навантаження до довговічності з'єднання, що відповідає цьому рівню навантаження. Це пов'язано з тим, що в процесі експлуатації конструкція піддається складним режимам навантаження і безпосереднє використання кривих втоми, отриманих при сталій амплітуді циклу, стає неможливим. Розгляду існуючих гіпотез, законів і моделей накопичення втомних

пошкоджень в основному металі і зварних з'єднаннях, які дають можливість оцінити довговічність виробу або конструкції в умовах дії спектру навантажень за допомогою доступних кривих втоми, отриманих при дії сталої амплітуди циклу, присвячена велика кількість праць, зокрема й оглядові [5 — 8].

При розв'язуванні задач з оцінювання довговічності зварних з'єднань металоконструкцій, що експлуатуються в умовах змінного навантаження найширше використовується гіпотеза лінійного підсумовування пошкоджень. Популярність лінійної гіпотези пояснюється її простотою і відсутністю невідомих параметрів. Вперше вона була запропонована Пальмгреном у 1924 р. і пізніше розвинена Майнером у 1945 р.

Згідно з гіпотезою лінійного підсумовування втомних пошкоджень частка пошкоженості  $D_i$  при будь-якому  $i$ -тому рівні напружень циклу прямо пропорційна відношенню кількості циклів його дії  $n_i$  до кількості циклів, що відповідає руйнуванню на цьому рівні  $N_i$ . Передбачається, що руйнування відбудеться, якщо

$$\sum_{i=1}^k D_i = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \geq a, \quad (1)$$

де  $a$  — критерій руйнування.

Останніми роками, з метою підвищення циклічної довговічності зварних вузлів і елементів металоконструкцій, широке застосування знаходять технології поверхневого пластичного деформування, зокрема ультразвукове високочастотне механічне проковування (ВМП) біляшовної зони зварних швів [9 — 11]. Ефективність застосування такої технології на стадії виготовлення виробів при регулярному навантаженні добре досліджена, проте, експериментальні дані зі встановлення закону підсумовування втомних пошкоджень у зміцнених ВМП зварних з'єднаннях практично відсутні, крім єдиної праці [12].

Мета статті — експериментально оцінити можливість застосувати гіпотезу лінійного підсумовування втомних пошкоджень і встановити критерії руйнування при блоковому навантаженні таврових зварних з'єднань у початковому та зміцненому технологією ВМП станах, при зростаючому, спадному і квазівипадковому порядках прикладення навантажень у блоці.

Експериментальні дослідження проводили на зразках таврових з'єднань низьколегованої сталі 09Г2С ( $\sigma_T = 370$  МПа  $\sigma_B = 540$  МПа). Заготовки під зразки з цієї сталі вирізали з листового прокату так, щоб довга сторона була орієнтована вздовж прокату. Поперечні ребра приварювали кутовими швами з двох сторін ручною електродуговою зваркою електродами марки УОНІ 13/55. Форма і геометричні розміри зразка наведені на рис. 1. Товщина зразка 12 мм обумовлена широкою застосовністю у зварних металоконструкціях прокату товщиною 8...20 мм. При зміцненні з'єднань технологією ВМП поверхневому пластичному деформуванню піддавалася вузька зона переходу металу шва до основного металу. Втомні випробування зварних зразків проводили на випробувальній машині УРС 20 при однобічному змінному розтягуванні з асиметрією циклу  $R_\sigma = 0$ . Всі зразки випробувалися до повного руйнування. Для встанов-

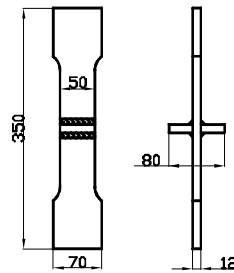


Рис. 1. Форма та розміри зразка таврового зварного з'єднання сталі 09Г2С

лення критерію руйнування таврових зварних з'єднань при блоковому навантаженні (величини  $a$ ) відповідно до гіпотези лінійного підсумовування втомних пошкоджень випробували 6 серій зразків: по 3 серії для зміцнених і незміцнених зварних з'єднань відповідно. При цьому кожна серія складалася з трьох зразків.

При втомних випробуваннях зварних з'єднань у початковому стані в умовах блокового навантаження блок включав п'ять сходинок навантаження з напрацюванням 5% довговічності на кожному. Тобто, частка пошкоженості одного блоку навантаження при лінійному підсумовуванні втомних пошкоджень складала 25% довговічності зразка до руйнування. Кількість циклів напрацювання на кожному ступені навантаження визначали за встановленою у [13] кривою втоми таврових зварних з'єднань сталі 09Г2С у початковому стані. Перша серія зразків випробувалася при блоковому навантаженні зі зростаючим порядком прикладення навантажень у кожному блоці. Максимальне напруження циклу в блоці задавалось рівним 180 МПа на першій сходинці навантаження з подальшим збільшенням до 260 МПа (п'ята сходинка навантажування) з кроком 20 МПа. Зразки другої серії випробувалися при блоковому навантаженні зі спадним порядком прикладення навантажень у кожному блоці (при початковому рівні напружень 260 МПа з подальшим зменшенням до 180 МПа також з кроком 20 МПа). Зразки третьої серії випробували при таких п'яти послідовних рівнях максимальних напружень циклу в блоці: 220, 200, 240, 180, 260 МПа (квазівипадковий порядок прикладення навантажень у кожному блоці). Довжина блоку (кількість циклів в одному блоці) при випробуваннях зварних з'єднань в початковому після зварювання стані складала  $115 \times 10^3$  циклів змін напружень. Кількість циклів на кожній сходинці навантажування зразків таврового зварного з'єднання сталі 09Г2С при зростаючій (а), спадній (б) і квазівипадковій (в) послідовності прикладення навантажень у кожному блоці вказано на схемі, яка подана на рис. 2.

При втомних випробуваннях зварних з'єднань, зміцнених технологією ВМП в початковому після зварювання стані, в умовах блокового навантаження блок включав 4 рівні навантаження з напрацюванням 6,25% довговічності на кожному. Таким чином, частка пошкоженості одного блоку навантаження при лінійному підсумовуванні втомних пошкоджень складала 25% довговічності зразка до руйнування. Кількість циклів напрацювання на кожній сходинці навантаження визначали за встановленою кривою

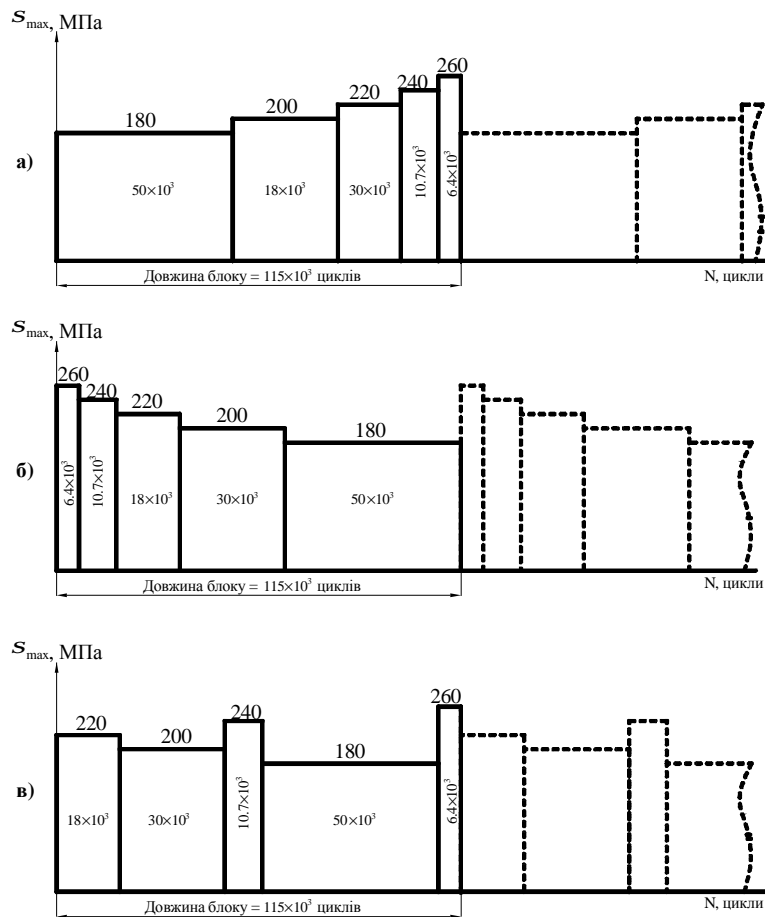


Рис. 2. Схема блокового навантаження незміцнених зразків таврового зварного з'єднання сталі 09Г2С при зростаючій (а), спадній (б) і квазівипадковій (в) послідовностях прикладення навантажень у блоці

втому таврових зварних з'єднань сталі 09Г2С зміцнених технологією ВМП у стані після зварювання, наведеній у [13]. Четверту серію зразків випробували при блоковому навантаженні зміцнених зразків зі зростаючим порядком прикладення навантажень у кожному блоці. Максимальне напруження циклу в блоці задавали рівним 260 МПа на першій сходинці навантажування з подальшим збільшенням до 305 МПа (четвертий рівень навантаження) з кроком 15 МПа. Зміцнені зразки п'ятої серії випробували при блоковому навантажуванні зі спадним порядком прикладення навантажень у кожному блоці (при початковому рівні напружень 305 МПа з подальшим зменшенням до 260 МПа також з кроком 15 МПа).

Зміцнені зразки шостої серії випробували при таких чотирьох послідовних рівнях максимальних напружень циклу у блоці: 290, 275, 305, 260 МПа (квазівипадковий порядок прикладення навантажень у кожному блоці). Довжина блоку (кількість циклів в одному блоці) для всіх блокових навантажень зміцнених зварних з'єднань складала  $241 \times 10^3$  циклів змін напружень. Кількість циклів змін напружень на кожній сходинці вантажування зміцнених зразків при зростаючій (а), спадній (б) і квазівипадковій (в) послідовностях прикладення навантажень у кожному блоці вказана на схемі поданій на рис. 3.

Результати випробувань зварних з'єднань у початковому стані і зміцнених технологією ВМП у стані після зварювання подані в табл.1. Встановлені при втомних випробуваннях в умовах блокового навантаження граничні значення суми відносних довговічностей зварних з'єднань у початковому стані змінюються в межах від 0,60 до 0,97. При цьому порядок прикладення навантажень неістотно впливає на циклічну довговічність зварних з'єднань. Так, значення сумарної пошкодженості, отримані при випробуванні незміцнених зразків до руйнування, при зростаючій послідовності прикладення навантажень у блоці знаходяться в межах від 0,60 до 0,77, при спадній послідовності – від 0,75 до 0,97 і при квазівипадковій послідовності – від 0,71 до 0,91.

Експериментально встановлені граничні значення суми відносних довговічностей при випробуваннях на втому всіх зразків зварних з'єднань, зміцнених технологією ВМП відразу після зварювання, знаходяться в діапазоні від 0,52 до 0,92. При цьому розкид значень сумарної пошкодженості для зростаючої послідовності прикладених навантажень знаходиться в межах від 0,65 до 0,92, для спадної послідовності – від 0,52 до 0,84, а для квазівипадкового виду навантаження – від 0,61 до 0,77 (табл.1). Отже, при блоковому навантажуванні зміцнених ВМП таврових зварних з'єднань сталі 09Г2С порядок

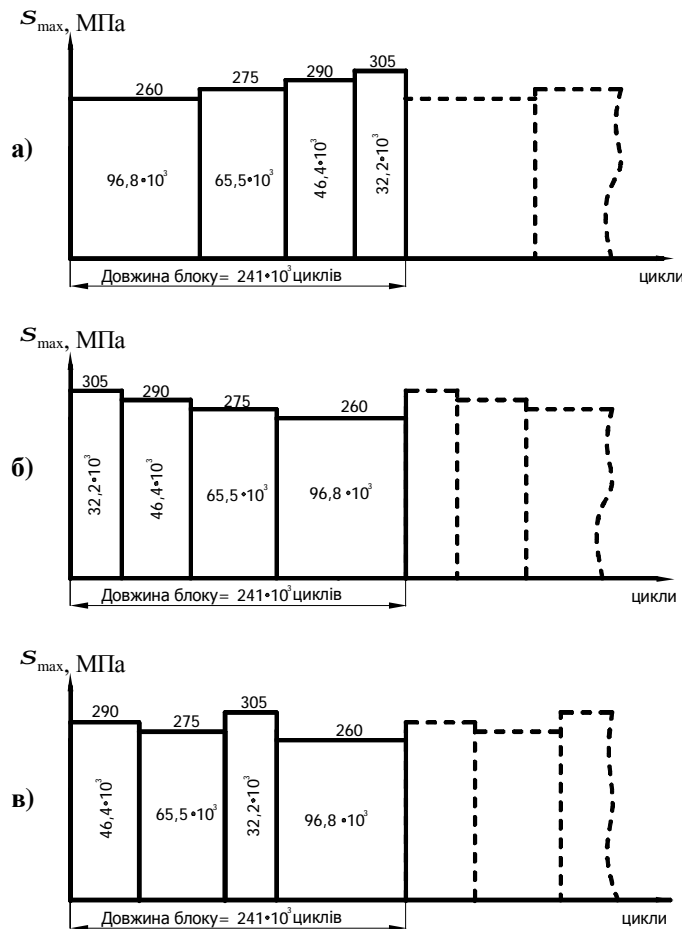


Рис. 3. Схема блокового навантаження зміцнених технологією ВМП в стані після зварювання зразків таврового зварного з'єднання сталі 09Г2С при зростаючій (а), спадній (б) і квазівипадковій (в) послідовностях прикладення навантажень у блоці

Таблиця 1

Критерії втомного руйнування зразків таврового зварного з'єднання сталі 09Г2С при блоковому навантаженні в залежності від порядку прикладення навантажень у блоці

Стан з'єднання	Порядок прикладення навантажень у блоці	Гранична сумарна пошкодженість			
		зразок 1	зразок 2	зразок 3	середнє значення
Незміцнений після зварювання	Зростаючий	0,60	0,77	0,65	0,67
	Спадаючий	0,87	0,75	0,97	0,86
	Квазівипадковий	0,77	0,71	0,91	0,80
Зміцнений ВМП після зварювання	Зростаючий	0,83	0,92	0,65	0,80
	Спадаючий	0,52	0,62	0,84	0,66
	Квазівипадковий	0,61	0,77	0,73	0,70

прикладення навантажень у блоці, як і у разі незміцнених зварних з'єднань, не чинить істотного впливу на циклічну довговічність з'єднань.

Отримані значення граничної сумарної пошкодженості при блоковому навантаженні зварних з'єднань у початковому стані істотно відрізняються від експериментально встановлених у [13] для п'ятисходинкового навантаження при прикладанні таких самих порядків та рівнів

максимальних напружень циклу. Діапазон значень граничної сумарної пошкодженості при блоковому навантаженні ( $\sum(n_i/N_i) = 0,60..0,97$ ) значно вужчий за діапазон значень граничної сумарної пошкодженості багатосхідчастого навантаження ( $\sum(n_i/N_i) = 0,32..1,97$ ). При блоковому навантаженні зварних з'єднань у початковому стані частка пошкоджень, що вноситься кожною сходиною навантаження в блоці у граничну сумарну пошкод-

женість, незначна і зменшується зі збільшенням кількості блоків, тому накопичення пошкоджень практично не залежить від послідовності прикладених навантажень. Що стосується багатосхідчастого навантаження, то саме послідовність прикладання навантажень справляє визначальний вплив на накопичення втомних пошкоджень через перерозподіл залишкових напружень.

Діапазон значень граничної сумарної пошкодженості при блоковому навантажуванні зварних з'єднань, зміцнених технологією ВМП в стані після зварювання ( $\sum (n_i/N_i) = 0,52...0,92$ ), практично не відрізняється від експериментально встановленого у [13] діапазону значень граничної сумарної пошкодженості для багатосхідчастого навантаження при прикладанні таких самих порядків і рівнів максимальних напружень циклу ( $\sum (n_i/N_i) = 0,65...1,08$ ). Це обумовлено тим, що при випробуваннях зварних з'єднань, зміцнених технологією ВМП, порядок прикладання навантажень не впливає на перерозподіл високих залишкових напружень стиску в зоні переходу шва на основний метал, наведених технологією ВМП, а отже, і на накопичення втомних пошкоджень.

**Висновки:** 1. У рамках гіпотези лінійного підсумовування втомних пошкоджень встановлені критерії втомного руйнування таврових зварних з'єднань сталі 09Г2С у початковому і зміцненому технологією ВМП після зварювання станах при зростаючому, спадному і квазівипадковому блоках навантаження, діапазон розсіювання яких знаходиться у межах інтервалу 0,52...0,97. Для консервативного оцінювання довговічності цих з'єднань в умовах блокового навантаження можна приймати єдиний критерій втомного руйнування рівний 0,5 як для незміцнених, так і для зміцнених технологією ВМП з'єднань.

2. Встановлено, що блокове навантаження зварних з'єднань у початковому стані звужує діапазон граничної сумарної пошкодженості, отриманий для багатосхідчастого навантаження при таких самих порядках і рівнях максимальних напружень циклу, зі значень 0,32...1,97 до значень 0,6...0,97.

3. Діапазон розкиду граничної сумарної пошкодженості зварних з'єднань, зміцнених технологією ВМП в стані після зварювання, отриманий експериментально при багатосхідчастому навантажуванні (0,65...1,08), відповідає діапазону розкиду блокового навантаження (0,52...0,92).

## Література

1. Дворецкий В.И., Троценко Д.А., Мясоедов М.И. Исследование накопления усталостного повреждения в сварных соединениях с помощью медных гальванических пленок // Автомат. сварка. — 1982. — №6. — С. 5—8.

2. Игнатович С.Р., Закиев И.М., Борисов Д.И., Закиев В.И. Оценка поврежденности поверхностного слоя материалов при циклическом нагружении методами нанометрирования и наносклерометрии // Пробл. прочности. — 2006. — №4. — С. 132—139.

3. Лебедев А.А., Музыка Н.Р., Волчек Н.Л. Определение поврежденности конструкционных материалов по

параметрам рассеяния характеристик твердости // Пробл. прочности. — 2002. — №4. — С. 5—11.

4. Чаусов Н.Г., Лебедев А.А., Богданович А.З. О предельной поврежденности материала в зоне концентратора // Пробл. прочности. — 2002. — №6. — С. 31—37.

5. Manson S.S., Halford G.R. Re-examination of cumulative fatigue damage analysis — an engineering perspective // Engineering Fracture Mechanics. — 1986. — Vol. 25. — P. 539—571.

6. Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение. Пер. с англ. — М.: Мир, 1984. — 624 с.

7. Троценко В.Т. Рассеянное усталостное повреждение металлов и сплавов. Сообщение 3. Деформационные и энергетические критерии // Пробл. прочности. — 2006. — №1. — С. 5—31.

8. Fatemi A., Yang L. Cumulative fatigue damage and life prediction theories: a survey of the state of the art for homogeneous materials // International Journal of Fatigue. — 1998. — V. 20, №1. — P. 9—34.

9. Лобанов Л.М., Кирьян В.И., Кныш В.В., Прокопенко Г.И. Повышение сопротивления усталости сварных соединений металлоконструкций высокочастотной механической проковкой (обзор) // Автомат. сварка. — 2006. — №9. — С. 3—11.

10. Лобанов Л.М., Кир'ян В.И., Кныш В.В. Підвищення ресурсу зварних металоконструкцій високочастотною механічною проковкою // Фіз.-хім. механіка матеріалів. — 2006. — №1. — С. 56—61.

11. Kudryavtsev Y., Kleiman J., Lugovskoy A., Lobanov L., Knysh V., Voitenko O., Prokopenko G. Rehabilitation and repair of welded elements and structures by ultrasonic peening // Welding in the world. — 2007. — V. 51, №7/8. — P. 47—53.

12. Lixing Huo, Dongpo Wang, Yufeng Zhang. Investigation of the fatigue behaviour of the welded joints treated by TIG dressing and ultrasonic peening under variable-amplitude load // International Journal of Fatigue. — 2005. — Vol. 27. — P. 95—101.

13. Кныш В.В., Соловей С.А., Кузьменко А.З. Накопление усталостных повреждений в тавровых сварных соединениях стали 09Г2С в исходном и упрочненном высокочастотной механической проковкой состояниях // Автомат. сварка. — 2008. — №10. — С. 12—18.

Отримана 12.05.09

V. Knysh, O. Kuzmenko, S. Solovei

**Fatigue damage accumulation in T-shaped as-welded and treated by high-frequency mechanical peening (HFMP) joints under variable-amplitude of loading**

E. Paton Institute of Welding of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

Due to hypothesis of the linear summation of fatigue damages is defined the failure criteria of the t-shaped as-welded and treated by high-frequency mechanical peening (HFMP) joints of steel 09G2S under variable-amplitude of loading: increasing, decreasing and quasirandom. It is showed that conservative estimation of fatigue life of these joints under variable-amplitude of loading can be accepted the single failure criterion is equal 0,5 as for as-welded so treated by HFMP joints.