

УДК 539.4

**С. Соловей, канд. техн. наук**

*Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України*

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ НАКОПИЧЕННЯ ВТОМНИХ ПОШКОДЖЕНЬ У ЗВАРНИХ З'ЄДНАННЯХ**

**Резюме.** Експериментально досліджено вплив послідовності прикладення навантажень (зростаючої, спадаючої та квазівипадкової) на циклічну довговічність зварних з'єднань низьколегованої сталі 09Г2С при багатоступеному та блоковому навантаженні. За гіпотезою лінійного підсумовування втомних пошкоджень встановлено відповідні граничні значення накопиченої втомної пошкодженості до руйнування зразків залежно від виду та послідовності прикладених навантажень. Показано, що при блоковому навантаженні зварних з'єднань порядок прикладення навантажень у блоці істотно не впливає на значення накопиченої втомної пошкодженості таврових зварних з'єднань, які знаходяться у діапазоні від 0,60 до 0,97.

**Ключові слова:** накопичення втомних пошкоджень, високочастотна механічна проковка, циклічна довговічність, втома, зварне з'єднання.

**S. Solovei**

## **RESEARCH OF THE FATIGUE DAMAGE ACCUMULATION REGULARITIES IN THE WELDED JOINTS**

**Summary.** The paper is devoted to establishing the regularities of fatigue damage accumulation in welded joints at multistep and block loading with different sequences of load application in the block. Fatigue testing was conducted on specimens of welded tee-joints of low-alloyed structural steel 09G2S at zero-to-tension alternating cycle with the frequency of 5 Hz. Different sequences of load application (increasing, decreasing or quasirandom) were assigned by 5 loading steps. Hypothesis of linear summation of fatigue damage was used to establish the respective boundary values of accumulated fatigue damage of specimens, depending on the kind and sequence of applied loading. It is shown that at multistep loading of welded joints, the sequence of load application essentially influences cyclic fatigue life of welded joints. Boundary values of accumulated fatigue damage of the joints before fracture at increasing sequence of applied loading are in the range from 0.32 to 0.56, at decreasing sequence – from 1.48 up to 1.97 and at quasirandom sequence – from 0.84 to 1.24. Thus, the sequence of load application to welded joints causes an opposite effect in terms of regularities of fatigue damage accumulation compared to base metal. It is established that the range of boundary values of accumulated fatigue damage at block loading (0.60...0.97) is four times narrower than the range of values of boundary total damage at multistep loading (0.32...1.97). While calculating the cyclic fatigue life of welded joints subjected to block loading by the hypothesis of linear summation of fatigue damage, it is recommended to take boundary value of accumulated fatigue damage of 0.6 as the damage criterion.

**Key words:** accumulation of fatigue damages, high-frequency mechanical peening, fatigue life, fatigue, welded joint.

**Постановка проблеми.** Несуча здатність зварних металоконструкцій інженерного призначення (мости, шляхопроводи, морські стаціонарні платформи та ін.), що експлуатуються в умовах змінного навантаження, визначається опором їх зварних вузлів і з'єднань втомним руйнуванням. Вичерпання ресурсу таких конструкцій прийнято представляти у вигляді процесу поступового накопичення втомних пошкоджень матеріалом, що призводить до зміни його властивостей, зародження і розвитку тріщин та, зрештою, до руйнування. Навіть знаючи найвірогідніші місця виникнення втомних тріщин в елементах зварних конструкцій з тривалою наробкою, достатньо складно достовірно визначити рівень накопичених втомних пошкоджень, а відповідно й термін їх подальшої безпечної експлуатації. Це пов'язано з тим, що в процесі експлуатації зварні металоконструкції піддаються складним режимам навантаження, тому безпосереднє використання кривих втоми, отриманих при

постійній амплітуді циклу, для визначення залишкової довговічності стає неможливим. Для розв'язування задач з оцінювання і прогнозування довговічності елементів експлуатованих зварних металоконструкцій необхідно розрахунком визначити напружено-деформований стан їх зварних елементів і встановити закономірність підсумовування втомних пошкоджень, у якості міри яких приймається відношення кількості циклів напрацювання на заданому рівні навантаження до довговічності з'єднання, що відповідає цьому рівню навантаження. У зв'язку з цим, роботи, що направлені на встановлення закономірностей накопичення втомних пошкоджень у зварних з'єднаннях елементів конструкцій при різних режимах навантаження, дозволять достовірніше визначати їх залишкову довговічність.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Розгляду існуючих гіпотез, законів і моделей накопичення втомних пошкоджень в основному металі та зварних з'єднаннях, які дають можливість оцінити довговічність виробу або конструкції в умовах дії спектру навантажень за допомогою доступних кривих втоми, встановлених при регулярному навантаженні, присвячена значна кількість робіт [1 – 4], у тому числі й оглядові [5 – 7].

При розв'язуванні задач з оцінювання довговічності зварних з'єднань металоконструкцій, що експлуатуються в умовах змінного навантаження, в переважній більшості використовується гіпотеза лінійного підсумовування втомних пошкоджень

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

де  $n_i$  і  $N_i$  – відповідно кількість циклів напрацювання та кількість циклів до руйнування при напруженні  $\sigma_i$  зварного з'єднання;

$a$  – граничне значення накопиченої втомної пошкоженості.

У роботах [1, 8] показано, що рівень діючих напружень та порядок їх прикладення до зварних з'єднань суттєво впливає на значення величини  $a$ . Головним чином, це пов'язано особливостями перерозподілу залишкових зварювальних напружень розтягу у зонах концентрації напружень (у зоні зварного шва).

**Мета роботи** – експериментально встановити граничні значення накопиченої втомної пошкоженості таврових зварних з'єднань при багатоступеневому та блоковому навантаженнях з різним порядком прикладення напружень (ступенів навантаження).

**Постановка завдання.** Експериментальні дослідження проводили на зразках таврових з'єднань низьколегованої сталі 09Г2С 12 категорії за ГОСТом 19281-89, класу міцності 345 МПа ( $\sigma_T = 370$  МПа  $\sigma_B = 540$  МПа).

Заготовки під зразки з цієї сталі вирізували з листового прокату так, щоб довша сторона була орієнтована уздовж прокату. Поперечні ребра приварювали кутовими швами з двох боків ручним електродуговим зварюванням електродами марки УОНИ 13/55 (корінь – електродами  $\varnothing$  3 мм, личкування – електродами  $\varnothing$  4 мм). Форма й геометричні розміри зразка наведені на рис. 1. Товщина зразка 12 мм зумовлена широкою застосованістю в зварних металоконструкціях прокату товщиною 8...20 мм.

Втомні випробування зварних зразків проводили на випробувальній машині УРС 20 (з максимальним зусиллям  $\pm 20$ тс) при одноісному змінному розтягуванні з асиметрією циклу  $R_\sigma = 0$ . Частота навантаження складала 5 Гц. Усі зразки випробувалися до повного руйнування. Для встановлення граничних значень величини  $a$  при багатоступеневому і блоковому навантаженнях таврових зварних з'єднань відповідно до гіпотези лінійного підсумовування втомних пошкоджень випробували 6 серій зразків зварних з'єднань: по 3 серії зразків в умовах дії багатоступеневого та блокового навантажень відповідно. При цьому кожна серія складалася з 3-х зразків.

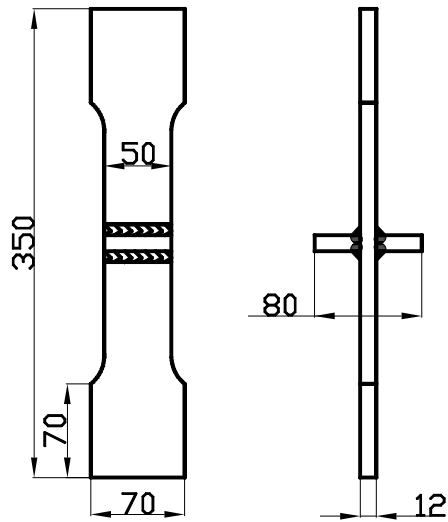


Рисунок 1. Форма та розміри зразків

Figure 1. Geometrical characteristics of specimen

При втомних випробовуваннях зварних з'єднань в умовах багатоступеневого навантаження блок включав 5 ступенів навантаження з напрацюванням 20% довговічності на кожному. Кількість циклів напрацювання на кожному ступені навантаження визначали за встановленою у роботі [9] кривою втоми таврових зварних з'єднань сталі 09Г2С (рис. 2). Першу серію зразків випробовували при заданому максимальному напруженні, що дорівнював 180 МПа на першому ступені навантаження з подальшим збільшенням до 260 МПа з кроком 20 МПа (зростаючий порядок прикладення навантажень). Зразки другої серії випробовували зі спадаючим порядком прикладення навантажень (при початковому рівні напружень 260 МПа з подальшим зменшенням до 180 МПа також з кроком 20 МПа). Зразки третьої серії випробовували при наступних п'яти послідовних рівнях максимальних напружень

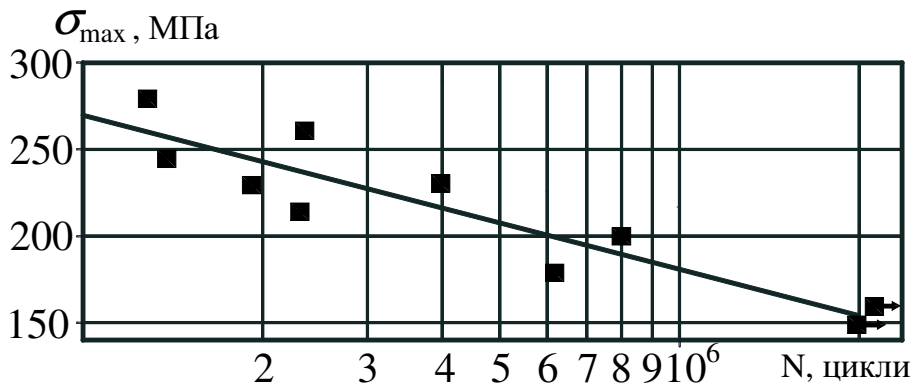
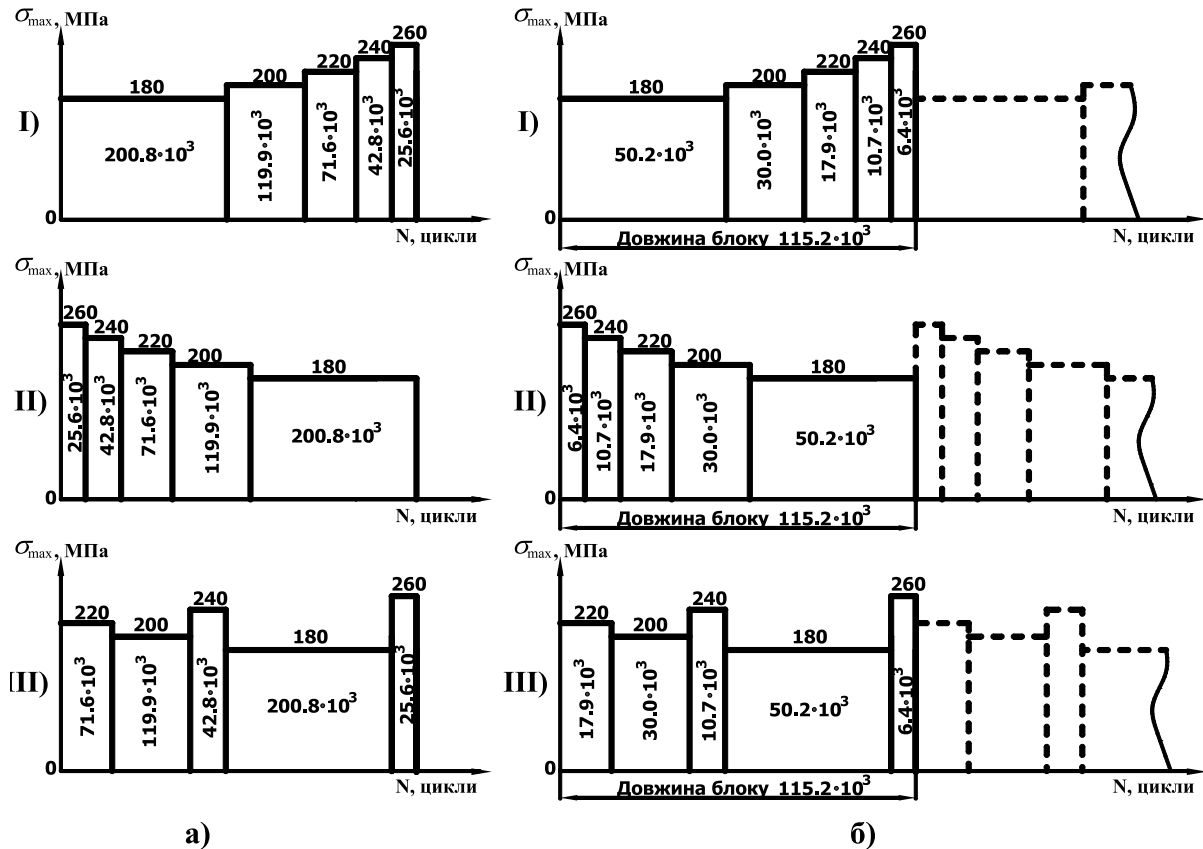


Рисунок 2. Крива втоми таврових зварних з'єднань сталі 09Г2С [9]

Figure 2. S-N curve of T-shaped welded joints of steel 09G2S [9]

циклу: 220, 200, 240, 180, 260 МПа (квазівипадковий порядок прикладення навантажень). Кількість циклів на кожному ступені навантаження зразків таврового зварного з'єднання сталі 09Г2С при зростаючій (I), спадаючій (II) і квазівипадковій (III) послідовностях прикладення навантажень вказано на схемі, яка наведена на рис. 3а.

При втомних випробовуваннях зварних з'єднань в умовах блокового навантаження різні порядки прикладення навантажень у блоці (зростаючий, спадаючий або квазівипадковий) задавали аналогічними 5 ступенями навантаження. На відміну від багатоступеневого навантаження, при блоковому навантаженні напрацювання на кожному ступені складало 5% довговічності. Тобто частка пошкодженості одного блоку навантаження при лінійному підсумовуванні втомних пошкоджень складала 25% довговічності зразка до руйнування. Довжина блока (кількість циклів в одному блоці) при випробовуваннях зварних з'єднань складала  $115,2 \times 10^3$  циклів змін напружень. Кількість циклів на кожному ступені навантаження зразків таврового зварного з'єднання сталі 09Г2С при зростаючій (I), спадаючій (II) і квазівипадковій (III) послідовностях прикладення навантажень у кожному блоці в умовах блокового навантаження вказано на схемі (рис. 3б).



**Рисунок 3.** Послідовності прикладення навантажень до зварних з'єднань при багатоступеневому (а) та блоковому (б) навантаженні: зростаюча (I), спадаюча (II), квазівипадкова (III)

**Figures 3.** Sequences of applied stress to welded joints under multistage (a) and block (б) loadings: increasing (I), decreasing (II), quasi-random (III)

**Результати дослідження.** Результати випробовувань таврових зварних з'єднань в умовах дії багатоступеневого та блокового навантажень наведено в таблиці 1.

**Таблиця 1**

Граничні значення накопиченої втомної пошкодженості при руйнуванні зразків таврового зварного з'єднання при багатоступеневому та блоковому навантаженні залежно від порядку прикладення навантажень

Вид навантаження	Порядок прикладення навантажень	Граничне значення накопиченої втомної пошкодженості $a$ , %			
		зразок 1	зразок 2	зразок 3	середнє значення
Багатоступеневе	Зростаючий	55,6	32,2	43,7	43,8
	Спадаючий	197,0	148,1	179,1	174,7
	Квазівипадковий	84,1	124,1	98,4	102,2
Блочне	Зростаючий	60,3	77,1	64,6	67,3
	Спадаючий	87,4	75,3	96,7	86,5
	Квазівипадковий	76,9	71,3	90,6	79,6

Встановлені лінійним підсумовуванням граничні значення суми відносних довговічностей при випробовуваннях на втому зразків зварних з'єднань в умовах дії багатоступеневого навантаження змінюються в межах від 0,32 до 1,97 (табл. 1). При цьому порядок прикладення навантажень істотно впливає на циклічну довговічність зварних з'єднань. Значення сумарної пошкодженості, отримані при випробовуванні трьох зразків до руйнування, при зростаючій послідовності прикладення навантажень знаходяться в межах від 0,32 до 0,56, при спадаючій послідовності – від 1,48 до 1,97, при квазівипадковому виді навантаження – від 0,84 до 1,24. Ці граничні значення величини  $a$  підтверджують, що порядок прикладення навантажень у зварних з'єднаннях викликає протилежний ефект у закономірностях накопичення втомних пошкоджень у порівнянні з основним металом [1, 8]. Це пов'язано з так званім ефектом «перенавантаження», коли внаслідок прикладення високих рівнів навантаження у зонах концентраторів напружень зварних з'єднань відбувається перерозподіл залишкових зварювальних напружень розтягу, що призводить до підвищення циклічної довговічності.

Встановлені при втомних випробуваннях в умовах блокового навантаження граничні значення накопиченої втомної пошкодженості  $a$  зварних з'єднань змінюються в межах від 0,60 до 0,97. При цьому порядок прикладення навантажень суттєво не впливає на циклічну довговічність зварних з'єднань. Значення сумарної пошкодженості, отримані при випробовуванні зразків до руйнування, при зростаючій послідовності прикладення навантажень в блоці знаходяться в межах від 0,60 до 0,77, при спадаючій послідовності – від 0,75 до 0,97, при квазівипадковій послідовності – від 0,71 до 0,91. Тому при розрахунку за гіпотезою лінійного підсумовування втомних пошкоджень циклічної довговічності зварних з'єднань, які піддаються дії блокового навантаження, незалежно від порядку прикладення навантажень у блоці в якості консервативного критерію руйнування можна приймати значення сумарної пошкодженості  $a = 0,6$ .

Отже, отримані значення критеріїв руйнування при блоковому навантаженні зварних з'єднань істотно відрізняються від значень, встановлених для багатоступеневого навантаження. Діапазон граничних значень накопичених втомних пошкоджень при блоковому навантаженні ( $\sum n_i / N_i = 0,60 \dots 0,97$ ) значно вузьчий за діапазон значень граничної сумарної пошкодженості багатоступінчастого навантаження ( $\sum n_i / N_i = 0,32 \dots 1,97$ ). Це пов'язано з тим, що при блоковому навантаженні зварних з'єднань періодична поява високих рівнів напружень спричиняє не тільки перерозподіл залишкових напружень, але й призводить до знеміцнення металу в зонах концентраторів напружень. Що стосується багатоступінчастого навантаження, то саме послідовність прикладення навантажень впливає на накопичення втомних пошкоджень унаслідок перерозподілу залишкових зварювальних напружень.

**Висновки.** Експериментально підтверджено, що при багатоступеневому навантаженні зварних з'єднань порядок прикладення навантажень суттєво впливає на циклічну довговічність зварних з'єднань. Граничні значення накопиченої втомної пошкодженості (за умови використання гіпотези лінійного підсумовування втомних пошкоджень) при руйнуванні таврових зварних з'єднань сталі 09Г2С при зростаючому порядку прикладення навантажень знаходяться у діапазоні від 0,32 до 0,56, при спадаючому – від 1,48 до 1,97, при квазівипадковому – від 0,84 до 1,24. Встановлено, що при блоковому навантаженні зварних з'єднань порядок прикладення навантажень

істотно не впливає на значення критерію втомного руйнування таврових зварних з'єднань, які знаходяться у діапазоні від 0,60 до 0,97. При розрахунку за гіпотезою лінійного підсумовування втомних пошкоджень циклічної довговічності зварних з'єднань, які піддаються дії блокового навантаження, незалежно від порядку прикладення навантажень у блоці, у якості консервативного критерію руйнування рекомендується приймати значення сумарної пошкоженості  $a = 0,6$ .

**Conclusions.** It is experimentally testified that at multistep loading of welded joints the sequence of load application has an essential influence on their cyclic fatigue life. Boundary values of accumulated fatigue damage (under the condition of application of the hypothesis of linear summation of fatigue damage) at fracture of welded tee-joints of 09G2S steel at increasing sequence of load application are in the range from 0.32 to 0.56, at decreasing sequence they are in the range of 1.48 to 1.97 and at quasirandom sequence they are equal from 0.84 to 1.24. It is established that under block loading of welded joints the sequence of load application does not have any essential influence on the values of criterion of fatigue fracture of welded tee-joints, which are in the range from 0.60 up to 0.97. While calculating the cyclic fatigue life of welded joints subjected to block loading, by the hypothesis of linear summation of fatigue damage, irrespective of the sequence of load application in the block, it is recommended to take the value of summary damage  $a = 0.6$  as the conservative fracture criterion.

#### Список використаної літератури:

1. Sonsino, C.-M. Damage accumulation under variable amplitude loading of welded medium- and high-strength steels / C.-M. Sonsino, T. Lagoda, G. Demofonti // International Journal of Fatigue. – 2004. – Vol. 26. – P. 487 – 495.
2. Svensson, T. Fatigue life prediction based on variable amplitude tests-specific applications / T. Svensson, P. Johannesson, J. Mare // International Journal of Fatigue. – 2005. – Vol. 27. – №8. – P. 966 – 973.
3. Taylor, D. Some new methods for prediction fatigue in welded joints / D. Taylor, N. Barrett, G. Lucano // International Journal of Fatigue. – 2002. – Vol. 24. – №5. – P. 509 – 518.
4. Wang, R.J. Fatigue life prediction based on natural frequency changes for spot welds under random loading / R.J. Wang, D.G. Shang // International Journal of Fatigue. – 2009. – Vol. 31. – №2. – P. 361 – 366.
5. Manson, S.S. Re-examination of cumulative fatigue damage analysis – an engineering perspective / S.S. Manson, G.R. Halford // Engineering Fracture Mechanics. – 1986. – Vol. 25. – P. 539 – 571.
6. Fatemi, A. Cumulative fatigue damage and life prediction theories: a survey of the state of the art for homogeneous materials / A. Fatemi, L. Yang // International Journal of Fatigue. – 1998. – Vol. 20. – №1. – P. 9 – 34.
7. Коллинз, Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение: пер. с англ. [Текст] / Дж. Коллинз. – М.: Мир, 1984. – 624 с.
8. Прочность сварных соединений при переменных нагрузках [Текст]; под ред. В.И. Труфякова. – К.: Наукова думка, 1990. – 256 с.
9. 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.

Отримано 02.08.2013