

ПОДОВЖЕННЯ ТЕРМІНУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ КОНСТРУКЦІЙ І СПОРУД ВИСОКОЧАСТОТНОЮ МЕХАНІЧНОЮ ПРОКОВКОЮ

В.В. Книш¹, Б.М. Мордюк², Г.І. Прокопенко², С.О. Соловей¹,
Г.О. Линник³, В.В. Волочай⁴, Т.В. Попова⁵

¹Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, ²Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України, ³Департамент колії та споруд АТ «Укрзалізниця», Україна, ⁴ПАТ «Крюковський вагонобудівний завод», Україна, ⁵ДП «УкрНДІ вагонобудування», Україна

Abstract. Results of purposeful control of the structural-phase state in the surface layers of structural materials, in particular, low-alloyed steels by ultrasonic impact treatment (UIT) are presented. As shown, the efficiency of the UIT application for increasing the fatigue strength of welded joints of constructions and the foundry products is high. The considerable experience of successful use of this technology in carriage building, during the operation of responsible constructions and products, as well as in repair works has been accumulated.

Нові можливості зміцнення поверхні за допомогою ультразвуку були досягнуті із створенням способу передачі енергії ультразвукових коливань в виріб через проміжний деформуючий елемент у вигляді кульок або стрижнів, що розміщувались між торцем ультразвукового концентратора та оброблюваною поверхнею. Вони здійснюють інтенсивні вимушені коливання в невеликому проміжку (~ 0,01 - 0,05 мм) з частотою близько 1 - 3 кГц. Такий спосіб було запропоновано в 70-х роках минулого століття в Росії і Україні. Згодом у вітчизняній і світовій літературі він дістав назву ультразвукова ударна обробка (УЗУО), а також високочастотна механічна проковка (ВМП), Ultrasonic Impact Treatment (UIT), High Frequency Mechanical Impact (HFMI).

В Інституті металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України, були проведені всебічні дослідження природи процесів, що відбуваються при УЗУО (ВМП). Запропоновано фізичні моделі, які пов'язують збільшення щільності дислокацій і точкових дефектів зі зміцненням та зниженням деформуючих зусиль, аномальним масоперенесенням атомів, а також з релаксацією та перерозподілом залишкових напружень [1]. При УЗУО (ВМП) відбувається швидке накопичення ступеню деформації, що призводить до суттєвого подрібнення зерен і наноструктуризації поверхневого шару в різних металах. У сплавах відбувається не лише зміна структури, а й фазового складу поверхонь та перебіг інших фізико-хімічних процесів. У результаті високочастотного ударного навантаження зростають і покращуються фізико-механічні характеристики функціональних і конструкційних матеріалів [2]. Широкомасштабні дослідження, проведені в ІМФ ім. Г.В. Курдюмова НАН України, стали підґрунтям для створення фізичних основ технології обробки матеріалів за допомогою ультразвуку, що дозволило істотно підвищити втомну міцність, твердість, зносостійкість і корозійні характеристики ряду конструкційних і функціональних сплавів на основі Fe, Al, Ti і Zr.

Подовження строку служби металевих конструкцій та споруд із застосуванням ВМП зварних з'єднань забезпечується комплексно на всіх стадіях розвитку їх втомного руйнування: від збільшення довговічності елементів конструкцій на стадії виготовлення до підвищення залишкового ресурсу споруд під час експлуатації (на стадії накопичення пошкоджень до утворення втомної тріщини). В Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України виконано значний комплекс експериментальних і теоретичних досліджень, який дозволяє визначати збільшення ресурсу зварних металоконструкцій після ВМП як на стадії виготовлення, так і після тривалої експлуатації з урахуванням впливу кліматичних чинників, наявності технологічних несправів, поверхневих пошкоджень незначної глибини та ін. [3]. Важливим завданням на цьому етапі є відновлення цілісності та несучої здатності

конструкції з втомними тріщинами із застосуванням ремонтного зварювання з подальшим зміцненням технологією ВМП.

Значна частка металевих конструкцій та споруд (мости, шляхопроводи, крани, рами візків транспортних засобів та ін.), які експлуатуються в Україні, вичерпала (або близька до цього) свій призначений при проектуванні строк служби, проте об'єктивна реальність потребує їх подальшої експлуатації. Під час тривалої експлуатації дані конструкції, як правило, зазнають впливу кліматичних чинників зовнішнього середовища та змінного навантаження, що призводить до утворення корозійних пошкоджень, накопичення високих рівнів втомних пошкоджень та розвитку втомних тріщин в їх елементах. Тому основним завданням даної роботи було збільшення несучої здатності та ресурсу промислових виробів, зварних конструкцій та споруд за рахунок формування методом ВМП поверхневого шару з новими фізико-механічними властивостями [3].

Експериментально обґрунтована доцільність застосування технології ВМП для підвищення характеристик опору втомі стикових зварних з'єднань тривало експлуатованих металоконструкцій з корозійно-втомними пошкодженнями, що виникли внаслідок одночасного впливу змінного навантаження та атмосферних чинників зони помірного клімату. Зміцнення технологією ВМП стикових з'єднань сталі 15ХСНД після попереднього циклічного напруження ($2 \cdot 10^6$ циклів) та експонування за підвищеної вологості повітря та температури впродовж 1200 годин призводить до збільшення їх циклічної довговічності більш ніж у 10 разів. Границя обмеженої витривалості цих з'єднань на базі $2 \cdot 10^6$ циклів підвищується на 30% (рис. 1).

Застосування технології ВМП для стикових зварних з'єднань конструкцій та споруд на стадії їх виготовлення, які під час експлуатації зазнаватимуть одночасного впливу змінних навантажень та впливу атмосфери морського клімату, без застосування захисного протикорозійного покриття не ефективно. Границя обмеженої витривалості на базі $2 \cdot 10^6$ циклів зварних з'єднань після оброблення ВМП лише на 9% вища за границю обмеженої витривалості не зміцнених з'єднань (рис. 1).

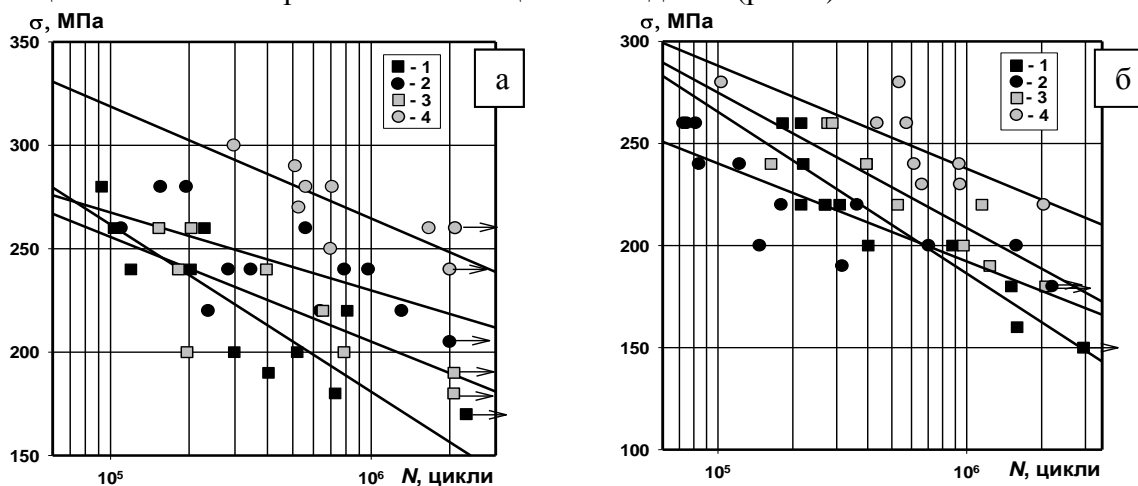


Рис. 1. Криві втоми стикових зварних з'єднань сталі 15ХСНД, отримані після моделювання впливу помірного (а) та морського (б) клімату України: 1, 2 – у вихідному стані та після зміцнення ВМП за впливу на них корозійного середовища, відповідно;

3 – після циклічного напруження $2 \cdot 10^6$ циклів з наступним експонуванням в корозійному середовищі без застосування ВМП; 4 – після циклічного напруження $2 \cdot 10^6$ циклів, експонування в корозійному середовищі та наступної ВМП.

Несучі конструкції металевих прогонових будов залізничних мостів з тріщинами втоми, досліджувались при різних способах їх гальмування. З метою співставлення поряд з новими розглядалися і відомі способи, які сьогодні використовують на практиці. Серед них висвердлювання у зоні вершини тріщини отвору без/або з установленням в нього високоміцного болта для створення стискаючих напружень.

Великогабаритні пласкі зразки для досліджень із сталі СтЗсп товщиною 14 мм мали центральну початкову наскрізну тріщину від втоми довжиною 76 мм. (рис. 2).

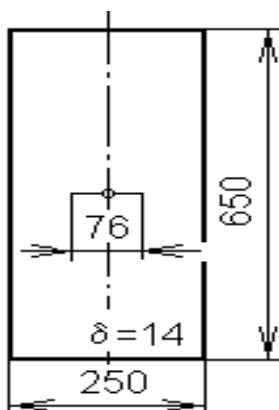


Рис. 2. Ескіз зразка для втомних випробувань.

Після застосування різних способів гальмування тріщини циклічне навантаження зразків здійснювали у м'якому режимі при віднульовій асиметрії циклу і максимальному напруженні $\sigma_{\max} = 150$ МПа. За побудованими залежностями підростання тріщин від кількості циклів змінного навантаження до повного руйнування зразків визначався коефіцієнт збільшення довговічності K_d . Результати експериментальних досліджень ефективності задіяних способів гальмування тріщин від втомленості в пласких зразках із сталі СтЗсп наведені у табл. 1. Отримані дані свідчать, що тільки свердлування отвору на шляху розвитку тріщини малоефективне. Суттєво збільшується циклічна довговічність завдяки вставленню в отвір високоміцного болта, який створює навколо вершини тріщини високі напруження стиснення [4].

Таблиця 1. – Залежність коефіцієнту збільшення довговічності K_d від способу гальмування тріщини.

№	Спосіб гальмування тріщини	N, циклів	K_d
1	Вихідний стан	35000	1
2	Висвердлювання отворів $\varnothing 23$ мм	52200	1,45
3	Встановлення в отвори високоміцних болтів $\varnothing 22$ мм з натягом 20 тс.	730550	20,87
4	Ремонт тріщини заварюванням	1450000	41,43
5	Ремонт тріщини заварюванням з наступною ВМП	2000000	57,14

Найбільш ефективним способом є заварювання пошкодженого зразка після вибирання металу в зоні тріщини. Відомо, що при зварюванні виникають напруження розтягу в перехідній зоні між швом і основним металом, з'являються концентратори напружень та інші дефекти. Тому пропонуються методи обробки зварних з'єднань, які суттєво підвищують їх циклічну довговічність. В результаті досліджень встановлено, що найбільш ефективним методом підвищення опору втомі зразків є зварювання з подальшою ВМП (табл. 1).

В роботі також проаналізовано проблеми виходу з ладу сталевих виливок відповідального призначення, що використовуються у вагонобудуванні, та шляхи їх вирішення. Розглянуто можливість застосування технології ВМП для зміцнення поверхні ливарних виробів складної конфігурації. Представлені результати випробувань втомної міцності бокових рам вантажних вагонів, виробництва ПАТ «Кременчуцький сталеливарний завод». Були проведені випробування на втому у форсованому режимі 3-х рам бокових візка мод. 18-7020 вантажного вагону, виготовлених згідно з кресленням 7020.00.002-0. Результати випробувань на втому рам бокових наведені в табл. 2.

Циклічна довговічність рам бокових склала від $2,176 \cdot 10^6$ до $3,565 \cdot 10^6$ циклів навантаження, що значно перевищує розрахункове допустиме число циклів до руйнування $[N_p] = 0,345 \cdot 10^6$ циклів навантаження. За результатами випробувань на втому бокових рам вантажних вагонів, оброблених за технологією ВМП, було встановлено підвищення показників втомної довговічності для всіх випробуваних рам.

Особливої уваги заслуговує той факт, що вироби, в яких додатково були оброблені технологічні «вікна», показали не тільки зростання довговічності, а й так званої «живучості», тобто зростання часу між моментом утворення тріщини й остаточним руйнуванням рами.

Таблиця 2. – Результати випробувань на втому рам бокових [5].

Номер деталі	Навантаження циклу, кН (тс)			Кількість циклів		Місце та характер руйнування	Відносна живучість $(N_p - N_{тр}) / N_p, \%$
	максимальна P_{max}	мінімальна P_{min}	амплітудна P_a	до появи тріщини, $N_{тр}$	до руйнування N_p		
750018	614 (62)	118 (12)	245 (25)	2 087 000	2 176 000	Похилий пояс	4,0 9
7600	614 (62)	118 (12)	245 (25)	2 770 000	3 272 000	Нижній кут ресорного отвору	15, 34
7798	614 (62)	118 (12)	245 (25)	2 737 000	3 565 000	Похилий пояс вздовж під домкратної подушки	23, 23

На ПАТ «Крюковський вагонобудівний завод» для зняття внутрішніх напружень застосовується високий відпуск – нагрівання до температури 750°C з охолодженням в печі. Технологічний цикл обробки займає близько 24 годин, а споживання електроенергії становить біля 1000 кВт-годин. Високий відпуск є традиційним методом зняття внутрішніх напружень, проте даний метод потребує значних матеріальних витрат. Альтернативними методами підвищення втомної міцності великогабаритних деталей стають технології з використанням інтенсивної пластичної деформації, які зміцнюють зварний шов, усувають дрібні дефекти зварювання та формують залишкові напруження стиснення. Одним із таких методів, який останнім часом набуває широкого розповсюдження, є технологія ВМП [6]. Дана технологія була використана для обробки зварних швів натурних макетів візків пасажирських вагонів з наступними втомними випробуваннями. Аналіз результатів показав значні переваги обробки макетів технологією ВМП перед високим відпалом. Так, зміна довговічності макетів із сталі Ст20 (до руйнування) при знакозмінних навантаженнях у відсотках відносно вихідного стану (після зварювання) збільшилась після відпалу і ВМП на 143% і 255%, відповідно.

Таким чином, в роботі сформульовано базові засади подовження ресурсу нових та тривало експлуатованих зварних конструкцій і споруд із конструкційних сталей технологією ВМП. Виконані дослідження дозволяють прогнозувати збільшення ресурсу зварних металоконструкцій після ремонтних і відновлюваних робіт.

Література

1. Прокопенко Г.І. Фізичні основи ультразвукового ударного зміцнення металевих поверхонь / Г.І. Прокопенко, Б.М. Мордюк, М.О. Васильєв, С.М. Волошко // Київ: Наук. думка. – 2017. – 465 с.
2. Mordyuk V.N. Ultrasonic Impact Treatment – an effective method for nanostructuring the surface layers of metallic materials / V.N. Mordyuk, G.I. Prokopenko // Handbook of mechanical nanostructuring (M. Aliofkhaeaei, Ed.), Wiley-VCH. – 2015. – P. 417-434.
3. Кныш В.В. Повышение долговечности сварных соединений с усталостными повреждениями / В.В. Кныш, С.А. Соловей // Киев: КПИ имени Игоря Сикорского. – 2017. – 320 с.
4. Кир'ян В.І. Продовження терміну експлуатації зварних металевих прогонових будов з тріщинами втомі / В.І. Кир'ян, В.В. Книш, Г.О. Линник // Зб. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. – Київ: НТУ. – 2006. – Вип. №73. – С.121-126.
5. Попова Т.В. Вплив ультразвукового ударного оброблення та електроіскрового легування на фізико-механічні властивості та структурний стан сталей 20ГЛ і 15ХСНД // Автореферат дис... канд. техн. наук. – Київ, 2018. – 20 с.
6. Приходько В.И. Повышение выносливости рам и узлов тележек пассажирских вагонов высокочастотной механической проковкой / В.И. Приходько, Н.В. Высоколян, С.Г. Калантыря // Сварка и металлоконструкции. – 2015. – №1. – С. 15-17.