

ВПЛИВ МОРСЬКОГО СЕРЕДОВИЩА НА ВТОМНУ ДОВГОВІЧНІСТЬ СТИКОВИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ СТАЛІ 15ХСНД, ЗМІЦНЕНИХ ВИСОКОЧАСТОТНИМ МЕХАНІЧНИМ УДАРОМ

В. В. КНИШ, С. О. СОЛОВЕЙ, Л. І. НИРКОВА, С. О. ОСАДЧУК

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

Досліджено ефективність застосування технології високочастотного механічного удару (ВМУ) для підвищення характеристик опору втомі стикових зварних з'єднань (ЗЗ) на стадії виготовлення металоконструкцій та після їх тривалої експлуатації в умовах морського клімату. Корозійні пошкодження у ЗЗ моделювали за випроб у камері нейтрального соляного туману КСТ-1 за температури $(35 \pm 2)^\circ\text{C}$, розпорошуючи розчин хлориду натрію 15 min через кожні 45 min досліджень впродовж 1200 h. Концентрація хлориду натрію в розчині становила $50 \pm 5 \text{ g/dm}^3$, рН 6,5...7,2. На втому випробувано чотири серії зразків стикових ЗЗ сталі 15ХСНД: у вихідному і зміцненому ВМУ станах після витримування у камері КСТ-1; після напрацювання $2 \cdot 10^6$ cycles змін напружень та витримки у камері КСТ-1; після напрацювання $2 \cdot 10^6$ cycles, витримування у камері КСТ-1 та подальшого зміцнення ВМУ. Експериментально встановлено, що застосування технології ВМУ суттєво підвищує циклічну довговічність стикових ЗЗ металоконструкцій в умовах змінних навантажень і морського клімату.

Ключові слова: *стикове зварне з'єднання, високочастотний механічний удар, корозивне середовище, корозійна тривкість, втома, циклічна довговічність.*

Вступ. Строк служби зварних конструкцій та споруд тривалої експлуатації (прогонові будови мостів, шляхопроводи, рами візків залізничного транспорту тощо) визначають опором втомі їх зварних з'єднань (ЗЗ). Відшарування захисного лакофарбового покриття таких конструкцій призводить до втомного руйнування (рис. 1) за участі корозивного середовища. Відновлення покриттів пов'язано з протикорозійними заходами (видалення продуктів корозії механічними способами), які додатково зменшують проектну товщину металу експлуатованих металоконструкцій, що підвищує максимальні напруження, прикладені до зварних вузлів та елементів конструкцій. Оскільки до відповідальних конструкцій та споруд ставлять високі вимоги щодо безпеки, то доцільно під час ремонтно-відновлювальних робіт застосовувати методи поверхневого пластичного деформування металу, в т. ч. високочастотний механічний удар (ВМУ), який дає змогу суттєво підвищити опір втомі ЗЗ елементів металоконструкцій як на стадії виготовлення, так і під час експлуатації [1–6]. Незважаючи на те, що ВМУ рекомендують застосовувати для зміцнення мостів, морських конструкцій і суден, даних щодо впливу цього способу оброблення на корозійну тривкість та втому конструкцій не наведено, хоча під час розрахунків ступінь корозійних пошкоджень у ЗЗ безпосередньо пов'язують [7] з границею плинності матеріалу. З результатів електрохімічних досліджень у розчині 3% NaCl встановлено, що оброблення лінії переходу від металу шва (МШ) до металу зони термічного впливу (ЗТВ) методом ВМУ сприяє збільшенню потенціалу та зменшенню швидкості корозії зони проковування [8, 9]. Це пов'язують зі зниженням максимальних залишкових зварювальних напружень розтягу після оброблення методом ВМУ. Втомними випробу-

Контактна особа: В. В. КНИШ, e-mail: knyshj@paton.kiev.ua

ваннями на базі $(10...13) \cdot 10^3$ cycles встановлено, що зміцнення технологією ВМУ зварних з'єднань з нержавних сталей марок 316 і 347 призводить до збільшення їх довговічності в розчині $3,5 \text{ wt.}\% \text{ NaCl} + 3,5 \cdot 10^{-4} \text{ M Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 + 5 \cdot 10^{-5} \text{ M Na}_2\text{S}$ [9]. Показано, що внаслідок обробки ВМУ довговічність ЗЗ зростає на 25% за розмаху напружень 420 МПа і на 75% за 470 МПа [9]. В умовах багатоциклової втоми завдяки обробці методом ВМУ циклічна довговічність стикових ЗЗ зростає у 2–6 разів, а таврових – у 4–10 разів (залежно від прикладених напружень). При цьому границі обмеженої витривалості на базі $2 \cdot 10^6$ cycles підвищуються, відповідно, на 70 та 114% [10]. Однак досліджень корозійних пошкоджень у пластично-деформованому шарі металу та їх впливу на втомну довговічність також не наведено [8–10]. Проте відомо, що внаслідок тривалої дії кліматичних чинників характерних, наприклад, для морського клімату, утворюються корозійні пошкодження МШ [11, 12], що суттєво знижує характеристики опору втоми ЗЗ.

Під час дослідження впливу атмосфери республіки Маврикій на пласкі зразки основного металу (ОМ) низьколегованої сталі та МШ стикових ЗЗ, отриманих різними способами зварювання, встановлено, що після витримування впродовж 216 h шаром продуктів корозії покрито 100% площі зразків. Лише на зразках, отриманих неплавким електродом, через такий же час корозією покрито 40% площі зразків [11]. Під час дослідження тривкості до пітингової корозії стикових ЗЗ сталі G20Mn5QT зі сталлю Q345D виявили, що через 21 days витримки у корозивному середовищі на основному металі сталі G20Mn5QT утворюються пітинги глибиною 16 μm , у металі шва – 10 μm , а в металі ЗТВ – 2,5 μm [12]. Раніше показано [13], що зміцнення стикових ЗЗ перед витримуванням (1200 h) в умовах підвищеної вологості повітря і температури, незважаючи на часткове корозійне розчинення пластично-деформованого шару металу ЗЗ, сприяє збільшенню їх циклічної довговічності до 7 разів (залежно від рівня напружень) та границі обмеженої витривалості на базі $2 \cdot 10^6$ cycles – на ~ 39%. Оскільки корозивні середовища руйнують основний метал і пластично-деформований ВМУ шар металу, то актуально оцінити ефективність цієї технології.

Матеріал і методика досліджень. Досліджували зразки стикових ЗЗ (рис. 2) низьколегованої сталі 15ХСНД ($\sigma_{0,2} = 400 \text{ МПа}$, $\sigma_B = 565 \text{ МПа}$), яку застосовують для виготовлення прогонів залізничних мостів. Вона добре зварюється, тривка до атмосферних впливів і роботоздатна в діапазоні температур $-70^\circ\text{C}...+45^\circ\text{C}$. Хімічний склад сталі такий (wt.%): 0,142 С; 0,466 Si; 0,63 Mn; 0,02 S; 0,013 P; 0,31 Ni; 0,66 Cr; 0,34 Cu. Заготовки для ЗЗ розміром 600×175 mm вирізали з гарячекатаного листового прокату 6000×2000 mm товщиною 12 mm. Стикові ЗЗ отримували під флюсом ОР 192 (фірми Oerlikon) дротом Св-08ГІНМА $\varnothing 4$ mm двостороннім однодуговим автоматичним зварюванням пластин без попереднього

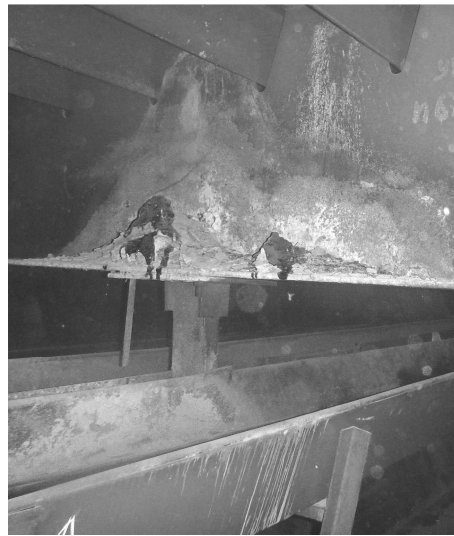


Рис. 1. Корозійні пошкодження зварних металоконструкцій автодорожньої естакади через шлюзи Дніпровської ГЕС (Запоріжжя).

Fig. 1. Corrosion damages of the welded structures of highway overpass via gateways of Dniprovskа HPP (Zaporizhzhya).

оброблених крайок зі зазором 0...1 mm. Зварювали за зворотної полярності від електричного випрямляча ВСЖ-1600. Режим зварювання першого шва: $U = 55$ V, $I = 650...700$ A, $V = 26,7$ m/h, другого (з протилежного боку): $U = 57$ V, $I = 760...780$ A, $V = 26,7$ m/h. Другий шов формували після повного охолодження першого. З кожної зварної пластини розміром 600×350 mm виготовляли 8 зразків.

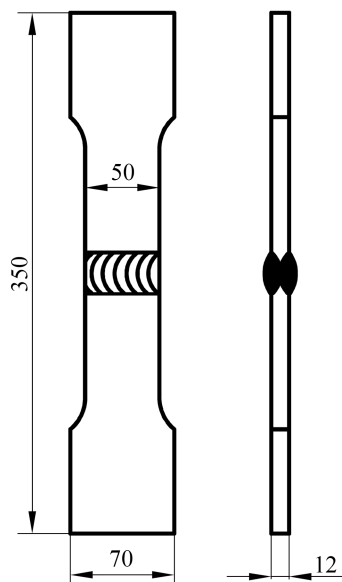


Рис. 2. Схема зразка для випробувань на втоми.

Fig. 2. Specimen for fatigue test (schematically).

Випробовували зразки ЗЗ на машині УРС-20 циклічним розтягом з асиметрією циклу $R_\sigma = 0$ і частотою навантаження 5 Hz. Випробування завершували після руйнування зразків або перевищення бази випробувань $2 \cdot 10^6$ cycles. Досліджували зразки у вихідному стані без (I серія) і з обробкою ВМУ (II) за впливу корозивного середовища; після циклічного напруження з подальшою дією корозивного середовища без (III) та з обробкою ВМУ (IV). Криві втоми ЗЗ у вихідному та зміцненому ВМУ станах у повітрі отримали раніше [10].

Попереднє циклічне напруження зразків третьої та четвертої серій здійснили на гідравлічних машинах ZDM-10 рн за максимальних напружень у віднульовому циклі 150 МПа (в околі границі обмеженої витривалості таких ЗЗ [13]) за бази випробувань $2 \cdot 10^6$ cycles. Відсутність тріщин втоми після напруження контролювали візуально методом газової проби. Після напруження $2 \cdot 10^6$ cycles зразків III та IV здійснювали одночасні корозійні випробування зразків всіх серій для забезпечення однакових умов. Корозійні пошкодження у ЗЗ, які можуть утворюватися під час експлуатації в умовах морського клімату України, моделювали у камері нейтрального соляного туману КСТ-1 за температури $(35 \pm 2)^\circ\text{C}$, розпорошуючи розчин хлориду натрію 15 min через кожні 45 min досліджень. Концентрація хлориду натрію в розчині 50 ± 5 g/dm³, рН 6,5...7,2, густина 1,03 g/cm³. Електропровідність дистильованої води для розчину не перевищувала 20 $\mu\Omega$ /cm. Тривалість перебування ЗЗ у камері КСТ-1 становила 1200 h.

Обробляли ВМУ зразки II та IV на українському устаткуванні USTREAT-1.0, в якому ручний компактний ударний інструмент з п'єзокерамічним перетворювачем з'єднаний з ультразвуковим генератором вихідної потужності 500 W. Зміцнювали вузьку зону переходу МШ до металу ЗТВ, тобто лінію сплавлення. Пристрій для зміцнення – однорядна насадка з чотирма бойками $\varnothing 3$ mm. Амплітуда коливань торця хвилеводу становила 25 μm . Швидкість ВМУ (продуктивність технології) під час обробки стикових ЗЗ досягала 2 mm/s.

Структурні зміни у поверхневому шарі металу вздовж лінії сплавлення у вихідному і зміцненому методом ВМУ станах до та після корозійних випробувань вивчали на оптичному мікроскопі НЕОРНОТ 32, цифрові зображення структури отримали за допомогою цифрової камери Olympus C5050.

Результати досліджень. Зовнішній вигляд поверхні зразків стикових ЗЗ зі сталі 15ХСНД, зміцнених ВМУ, до та після корозійних випробувань наведено на рис. 3. Після витримування зразків у нейтральному соляному тумані на поверхні ЗЗ утворився суцільний шар продуктів корозії товщиною $\sim 1...2$ mm. Тому візуально виявити зону, оброблену за технологією ВМУ, після тривалих корозійних

випроб неможливо (рис. 3а). Оскільки втомні тріщини зазвичай утворюються вздовж лінії сплавлення ЗЗ, то досліджували зону переходу від МШ до ОМ. За результатами металографічних випробувань на поверхневих шарах металу ЗЗ виявили корозійні плями та виразки. Для подальших втомних випроб з ділянок зразків під захвати механічним способом видаляли продукти корозії. Проте під час зберігання зразків та їх втомних випроб основна частина продуктів корозії відшарувалася (рис. 3б).

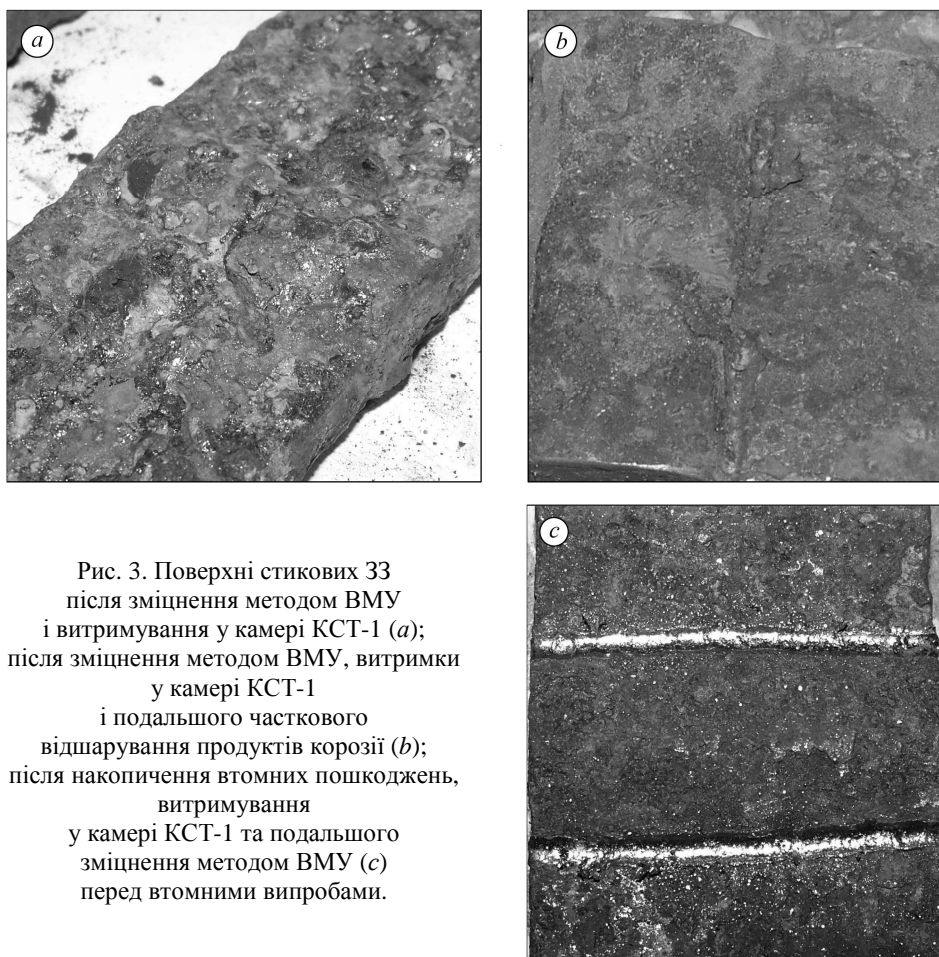


Рис. 3. Поверхні стикових ЗЗ після зміцнення методом ВМУ і витримання у камері КСТ-1 (а); після зміцнення методом ВМУ, витримки у камері КСТ-1 і подальшого часткового відшарування продуктів корозії (б); після накопичення втомних пошкоджень, витримання у камері КСТ-1 та подальшого зміцнення методом ВМУ (с) перед втомними випробами.

Fig. 3. Surfaces of the butt welded joints after strengthening by high-frequency mechanical impact (HFMI) method and holding in KCT-1 chamber (a); after strengthening by HFMI in KCT-1 chamber and further partial detachment of corrosion products (b); after fatigue damages accumulation, holding in KCT-1 chamber with further strengthening by HFMI method (c) before fatigue tests.

Особливості мікроструктури поверхнього шару металу вздовж лінії сплавлення ЗЗ у вихідному стані та після ВМУ обговорювали раніше [13]. Відмічали, що зміцнення методом ВМУ призводить до змін структури металу під поверхнею обробки на глибину 260...325 μm (рис. 3с). У поверхневих шарах металу після ВМУ спостерігали інтенсивну деформацію (витягування) зерен фериту та бейніту під кутом до поверхні на дні канавки. Коефіцієнт форми зерна $K_f = a/b$ (a і b – відповідно середні значення довжини і ширини витягнутих зерен) змінювався в діапазоні 8...20 та знижувався із заглибленням від поверхні.

Після витримки зразків у нейтральному соляному тумані глибина виразок у поверхневих шарах МШ та металу ЗТВ стикових ЗЗ у вихідному стані становила 0,104...0,39 mm (рис. 4a, b). Ступінь ураження корозійними пошкодженнями МШ і металу ЗТВ відповідно 53,7% та 100% (див. таблицю). Після витримки оброблених методом ВМУ зразків ЗЗ у нейтральному соляному тумані зміцненого шару металу не спостерігали (рис. 4c, d), що свідчить про його повне корозійне розчинення. Глибина виразок у поверхневих шарах МШ становила 0,039...0,195 mm, а в металі ЗТВ – 0,39...0,62 mm. Ступінь ураження поверхні корозією МШ і металу ЗТВ відповідно 19,9% та 100%. Отже, зміцнення методом ВМУ не зупинило корозійне руйнування поверхні, зокрема лінії сплавлення, в умовах тривалого (1200 h) впливу нейтрального соляного туману.

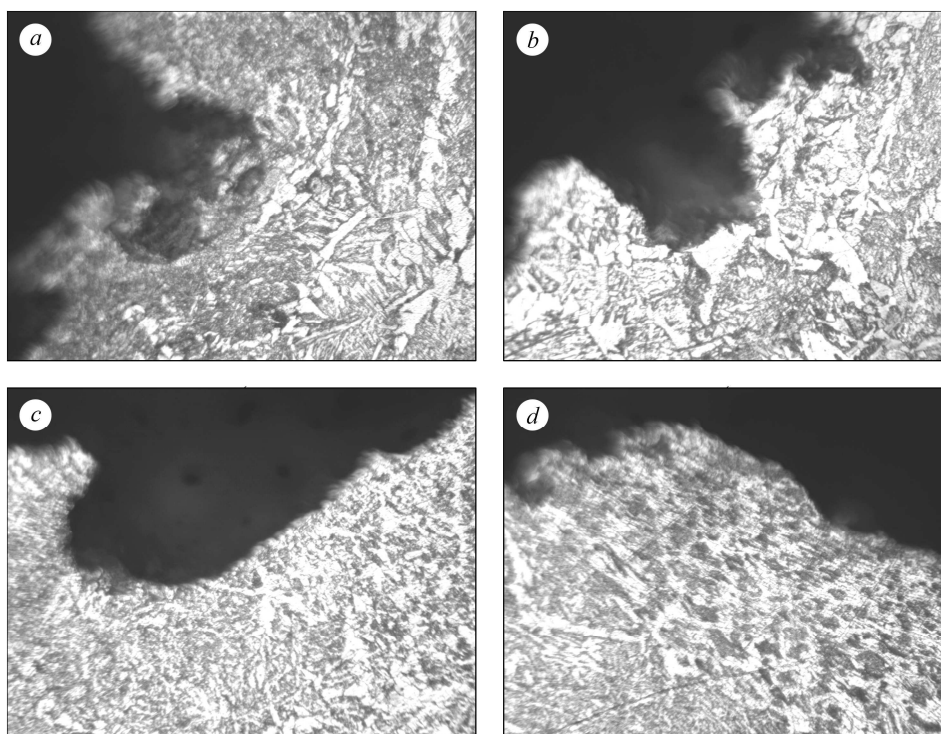


Рис. 4. Мікроструктура поверхневого шару металу ЗТВ без (a, b) та після обробки методом ВМУ (c, d) стикового ЗЗ після корозійних випроб за впливу нейтрального соляного туману впродовж 1200 h.

Fig. 4. Microstructure of the surface layer of the HAZ metal untreated (a, b) and treated by HFMI (c, d) of the butt welded joint after corrosion tests under influence of neutral salt fog for 1200 h.

Розміри корозійних пошкоджень на поверхні металу в межах МШ і ЗТВ стикових ЗЗ сталі 15ХСНД після витримання у нейтральному соляному тумані впродовж 1200 h

Стан зразків	У межах МШ		У межах ЗТВ	
	Глибина, mm	Ступінь ураження, %	Глибина, mm	Ступінь ураження, %
У вихідному стані	0,104...0,390	53,7	0,104...0,390	100
Після обробки ВМУ	0,039...0,195	19,9	0,390...0,620	100

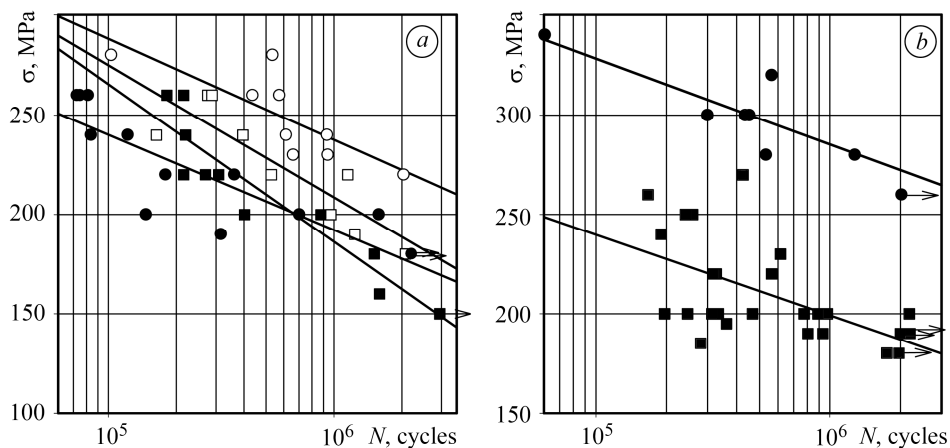


Рис. 5. Ділянки кривих втоми σ - N зразків 33 I (■) і II (●) зі сталі 15XCHD, отримані після витримування у нейтральному соляному тумані впродовж 1200 h (a) і повітрі [10] (b), та після циклічного напрацювання $2 \cdot 10^6$ cycles з подальшим витримуванням за дії нейтрального соляного туману (1200 h) без (III - □) та з (IV - ○) подальшим зміцненням методом ВМУ.

Fig. 5. Parts of fatigue curves σ - N for specimens with butt welded joints I (■) and II (●) of 15XCHD steel, obtained after holding in neutral salt fog for 1200 h (a) and in air [10] (b) and after specimens cycling $2 \cdot 10^6$ cycles with following holding in neutral salt fog (1200 h) without (III - □) and with (IV - ○) further strengthening by the HFMI method .

Результати втомних випробувань зразків всіх серій зі стиковими 33 після витримування у нейтральному соляному тумані наведені на рис. 5a. Для порівняння на рис. 5b наведені також результати випробувань відповідних 33 у повітрі [10]. Витримування зразків I у нейтральному соляному тумані впродовж 1200 h призвело до зниження границі обмеженої витривалості на базі $2 \cdot 10^6$ cycles на $\approx 13\%$ (від 187 до 163 МПа) і до зменшення циклічної довговічності у діапазоні $7 \cdot 10^5 \dots 2 \cdot 10^6$ cycles в ~ 2 рази (рис. 5a, ■) порівняно з 33 у повітрі (рис. 5b, ■). Вплив корозивного середовища сприяв зниженню границі витривалості 33 II на $\approx 35\%$ (від 273 до 178 МПа) і зменшенню довговічності в 10 разів (рис. 5a, ●) порівняно з 33 у повітрі (рис. 5b, ●). Отримані результати на зразках II вказують на недоцільність застосування технології ВМУ до стикових 33 на стадії виготовлення металоконструкцій, оскільки після такого оброблення границя обмеженої витривалості на базі $2 \cdot 10^6$ cycles підвищилася лише на 9% (від 163 до 178 МПа). Стикові 33 I та II зруйнувалися вздовж лінії сплавлення. Експериментальні значення характеристик опору втоми зміцнених ВМУ з'єднань підтверджують металографічні дослідження, за результатами яких встановлено, що попереднє витримування з'єднань впродовж 1200 h в умовах нейтрального соляного туману призвела практично до повного корозійного розчинення пластично-деформованого шару металу в зоні проковування, що знижує характеристики опору втоми зміцнених ВМУ 33 до значень, характерних незміцненим 33. Зародження і розвиток тріщин втоми вздовж лінії сплавлення підтверджує результати металографічних досліджень (див. таблицю) – метал ЗТВ зміцнених зварних з'єднань має найнижчу корозійну тривкість порівняно з ОМ та металом шва.

Характеристики опору втоми зразків III виявилися вищими, ніж зразків I: їх границя обмеженої витривалості підвищилася на $\approx 16\%$ (від 163 до 190 МПа), а циклічна довговічність збільшилася ~ 2 рази (рис. 5a, □). Таке поліпшення характеристик опору втоми пов'язане з частковою релаксацією залишкових зва-

ривальних напружень розтягу під час $2 \cdot 10^6$ cycles напрацювання перед корозійними випробами. Зразки III руйнувалися вздовж лінії сплавлення. Характеристики опору втомі зразків IV виявилися також вищими, ніж зразків II: границя обмеженої витривалості підвищилася на $\approx 25\%$ (від 178 до 222 МПа), а циклічна довговічність у діапазоні $10^5 \dots 2 \cdot 10^6$ cycles збільшилася \sim в 10 разів. Таке поліпшення характеристик опору втомі стикових ЗЗ після циклічного напрацювання (рис. 5а, ○) порівняно із ЗЗ без напрацювання (рис. 5а, ●) пов'язане з відсутністю корозійних пошкоджень у поверхневому шарі металу, пластично-деформованому методом ВМУ, який призвів до механічного усунення поверхневих корозійних дефектів (див. рис. 3с). Тому зразки IV руйнувалися по ОМ на відстані 15...60 mm від ЗЗ. Фрактографічний аналіз зламів підтвердив значну кількість поверхневих корозійних пошкоджень у ОМ, які призводять до зародження тріщин втомі і руйнування зразків IV по ОМ (рис. 6). Отримані результати вказують на доцільність застосування технології ВМУ для зміцнення стикових ЗЗ металоконструкцій після їх тривалої експлуатації, оскільки границя обмеженої витривалості підвищується на $\approx 17\%$ (від 190 до 222 МПа), а циклічна довговічність збільшується у 2–3 рази.

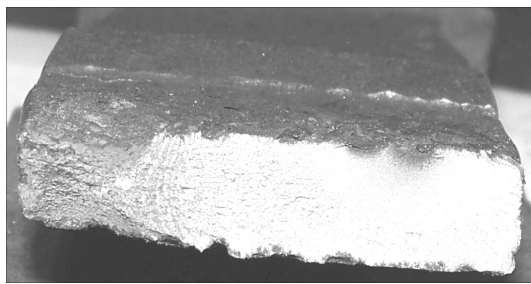


Рис. 6. Втомний злам стикового ЗЗ сталі 15XCHD після $2 \cdot 10^6$ cycles корозійних випробувань та зміцнення ВМУ. Тріщина втомі утворилась в основному металі на відстані 15 mm від ЗЗ внаслідок корозійних пошкоджень.

Fig. 6. Fatigue fracture surface of the butt welded joints of 15XCHD steel after cycling $2 \cdot 10^6$ cycles of corrosion tests and strengthening by the HFMI method. Fatigue crack initiated in the base metal at a distance of 15 mm from the welded joint due to corrosion damage.

Аналіз результатів експериментальних досліджень та праць [10, 13] свідчить про високу ефективність зміцнення технологією ВМУ стикових ЗЗ металоконструкцій, які зазнають впливу змінних навантажень, як на стадії виготовлення, так і після тривалої експлуатації. Проте треба захистити шар металу, зміцненого ВМУ, від атмосферного впливу, особливо у зоні морського клімату України, наприклад, використовуючи лакофарбові покриття, щоб запобігти його руйнуванню.

ВИСНОВКИ

Досліджено ефективність зміцнення технологією ВМУ стикових ЗЗ сталі 15XCHD на стадії виготовлення металоконструкцій, які під час експлуатації зазнаватимуть одночасного впливу змінних навантажень та морського клімату. Експериментально встановлено, що границя обмеженої витривалості на базі $2 \cdot 10^6$ cycles ЗЗ після оброблення ВМУ та витримки у нейтральному соляному тумані впродовж 1200 h підвищується лише на 9%, що пояснюємо повним корозійним розчиненням поверхнього пластично-деформованого шару металу, сформованого ВМУ. Корозійними випробуваннями підтверджено, що обробка ЗЗ технологією ВМУ не підвищує їх корозійну тривкість. Експериментально обґрунтовано доцільність застосування технології ВМУ для поліпшення характеристик опору втомі ЗЗ тривало експлуатованих металоконструкцій з накопиченими втомними та корозійними пошкодженнями внаслідок одночасного впливу змін-

ного навантаження та морського клімату. Зміцнення технологією ВМУ стикових 33 сталі 15XCHД після попереднього циклічного напрацювання ($2 \cdot 10^6$ cycles) з витримкою у нейтральному соляному тумані впродовж 1200 h призводить до збільшення їх циклічної довговічності до 10 разів. Границя обмеженої витривалості цих 33 підвищується на 25% завдяки методу ВМУ, який механічно усуває поверхневі корозійні дефекти у зоні оброблення та формує поверхневий пластично-деформований шар металу.

РЕЗЮМЕ. Исследована ефективність применения технологии высокочастотного механического удара (ВМУ) для повышения характеристик сопротивления усталости стыковых сварных соединений на стадии изготовления металлоконструкций и после их длительной эксплуатации в условиях атмосферы морского климата. Коррозионные повреждения в сварных соединениях моделировали в камере нейтрального соляного тумана КСТ-1 в течение 1200 h при температуре $35 \pm 2^\circ\text{C}$, распыляя раствор хлорида натрия 15 min через каждые 45 min. Концентрация хлорида натрия в растворе составляла $50 \pm 5 \text{ g/dm}^3$, pH 6,5...7,2. Усталостные испытания проводили на четырех сериях образцов стыковых сварных соединений стали 15XCHД: в исходном и упрочненном ВМУ состояниях после выдержки в камере КСТ-1; после наработки $2 \cdot 10^6$ cycles перемен напряжений и выдержки в камере КСТ-1; после наработки $2 \cdot 10^6$ cycles, выдержки в камере КСТ-1 и последующего упрочнения ВМУ. Экспериментально установлено, что обработка линии сплавления технологией ВМУ существенно увеличивает циклическую долговечность стыковых сварных соединений металлоконструкций в условиях морского климата и переменных нагружений.

Ключевые слова: *стыковое сварное соединение, высокочастотный механический удар, коррозионная среда, коррозионная стойкость, усталость, циклическая долговечность.*

SUMMARY. The effectiveness of high-frequency mechanical impact (HFMI) technology to increase the resistance of fatigue butt welded joints at the stage of production of steel structures or after their long-term exploitation in marine climate conditions was established. Corrosion damages in the welded joints, which could be formed during operation in the marine climate conditions, were simulated in a neutral salt fog chamber KCT-1 for 1200 h at a temperature of $35 \pm 2^\circ\text{C}$ with dispersion of a sodium chloride solution for 15 min after every 45 min of testing. The concentration of sodium chloride in the solution was $50 \pm 5 \text{ g/dm}^3$, pH 6.5...7.2. Fatigue tests were carried out on four series of butt welded joints of 15XCHД steel: as-welded and treated by the HFMI method after holding in the KCT-1 chamber; after cycling $2 \cdot 10^6$ cycles and holding in the KCT-1 chamber; after cycling $2 \cdot 10^6$ cycles, holding in the KCT-1 chamber and subsequent strengthening by the HFMI. It was experimentally established that the use of the HFMI technology significantly increased the fatigue life of welded joints of steel structures in the conditions of marine climate and alternating loading.

Keywords: *butt welded joint, high-frequency mechanical impact, corrosion environment, corrosion resistance, fatigue, fatigue life.*

1. *Fikri Bashar Yalchiner and Zuheir Barsoum.* Life extension of welded structures using HFMI Techniques – potential application to offshore structures // *Procedia Structural Integrity.* – 2017. – **5**. – P. 377–384.
2. *Fisher J. W., Statnikov E., and Tehini L.* Fatigue strength improvement of bridge girders by ultrasonic impact treatment (UIT) // *Welding in the World.* – 2002. – **46**, Is. 9–10. – P. 34–40.
3. *Walbridge S. and Nussbaumer A.* Probabilistic fatigue analysis of shop and field treated tubular truss bridges // *J. of Construction Steel Research.* – 2008. – **64**, Is. 2. – P. 156–166.
4. *Experimental study of transverse attachment joints with 40 and 60 mm thick main plates, improved by high-frequency mechanical impact treatment (HFMI) / Poja Shams-Hakimi, Farshid Zamiri, Mohammad Al-Emrani, Zuheir Barsoum // Engng. Structures.* – 2018. – **155**. – P. 251–266.
5. *Abston S.* The technology and applications of ultrasonic impact technology // *Australasian Welding J.* – 2010. – **55**. – P. 20–21.
6. *Fatigue strength improvement for ship structures by ultrasonic peening / Takanori Deluchi, Masashi Mouri, Junya Hara, Daichi Kano, Taichiro Shimoda, Fumihide Inamura, Tetsuji*

- Fukuoka, Keisuke Koshio // *J. of Marine Science and Technology*. – 2012. – **17**, Is. 3. – P. 360–369.
7. *Wei Demin and Wang Peng*. Investigation on corrosion of welded joint of prestressed high-strength concrete pipe piles // *Procedia Engng*. – 2017. – **210**. – P. 79–86.
 8. *Daavari M. and Sadough Vanini S. A.* Corrosion fatigue enhancement of welded steel pipes by ultrasonic impact treatment // *Mater. Letters*. – 2015. – **139**. – P. 462–466.
 9. *Fereidooni B., Morovvati M. R., Sadough-Vanini S. A.* Influence of severe plastic deformation on fatigue life applied by ultrasonic peening in welded pipe 316 stainless steel joints in corrosive environment // *Ultrasonics*. – 2018. – **88**. – P. 137–147.
 10. *Влияние высокочастотной проковки на сопротивление коррозионной усталости сварных соединений и коррозионную стойкость* / В. В. Кныш, С. А. Соловей, А. А. Кадышев, Л. И. Ныркова, С. А. Осадчук, А. А. Рыбаков // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2017. – **53**, № 1. – С. 12–17.
(*Influence of high-frequency peening on the corrosion fatigue of welded joints* / V. V. Knysh, S. A. Solovei, A. A. Kadyshch, L. I. Nyrkova, S. A. Osadchuk // *Material Science*. – 2017. – **53**, № 1. – P. 7–13.)
 11. *Beeharry P. and Surnam B. Y. R.* Atmospheric Corrosion of Welded Mild Steel // *Materials Today: Proceedings*. – 2018. – **5**, Is. 2, Part 2. – P. 7476–7485.
 12. *Han Q. H., Wang X., and Lu Y.* Experimental investigation on the corrosion behavior of G20Mn5QT cast steel and butt weld with Q345D steel // *Corrosion Science*. – 2018. – **132**. – P. 194–203.
 13. *Вплив зміцнення високочастотним механічним ударом зварних стикових з'єднань зі сталі 15ХСНД на їх атмосферну корозію та опір втомному руйнуванню* / В. В. Кныш, С. О. Соловей, С. О. Осадчук, Л. І. Ниркова // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2018. – **54**, № 3. – С. 120–127.
(*Influence of hardening by high-frequency mechanical impacts of butt welded joints made of 15KhSND steel on their atmospheric corrosion and fatigue fracture resistance* / V. V. Knysh, S. O. Solovei, S. O. Osadchuk, L. I. Nyrkova // *Material Science*. – 2018. – **54**, № 3. – P. 421–429.)

Одержано 20.08.2018