

ВПЛИВ ЗМІЦНЕННЯ ВИСОКОЧАСТОТНИМ МЕХАНІЧНИМ УДАРОМ ЗВАРНИХ СТИКОВИХ З'ЄДНАНЬ ЗІ СТАЛІ 15ХСНД НА ЇХ АТМОСФЕРНУ КОРОЗІЮ ТА ОПІР ВТОМНОМУ РУЙНУВАННЮ

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

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

Обґрунтовано ефективність технології високочастотного механічного удару (ВМУ) для підвищення характеристик опору втомі стикових зварних з'єднань (ЗЗ) на стадії виготовлення металоконструкцій або після їх тривалої експлуатації в зоні помірного клімату. Атмосферний вплив змодельовано витримуванням зразків у камері з контрольованою вологістю Г4 при 40°C і вологістю повітря 98% впродовж 1200 h. На втому випробувано чотири серії зразків ЗЗ сталі: у вихідному і зміцненому ВМУ станах після витримування у камері Г4; після напрацювання $2 \cdot 10^6$ циклів навантаження та витримки у камері Г4; після циклічного напрацювання $2 \cdot 10^6$ циклів, витримування у камері Г4 та подальшого зміцнення ВМУ. Встановлено, що технологією ВМУ можна суттєво підвищити циклічну довговічність стикових ЗЗ металоконструкцій, які під час експлуатації зазнають впливу змінних навантажень і атмосферних перепадів зони помірного клімату.

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

Довговічність зварних металоконструкцій (мостів, морських стаціонарних платформ, щогл антен, кранів, рам візків залізничних локомотивів, екскаваторів, сільськогосподарських машин тощо) залежить від опору втомі зварних з'єднань (ЗЗ), характеристики яких нижчі, ніж основного металу (ОМ) [1]. Під час тривалої експлуатації на такі металоконструкції впливають чинники довкілля (підвищені вологість та температура), що спричиняє їх корозійне пошкодження (рис. 1) та скорочує час експлуатації. Для подальшого їх безпечного функціонування (особливо за наближення до терміну служби, призначеного на етапі проектування) недостатньо усунути продукти корозії та відновити лакофарбові покриття. Тому під час ремонтно-відновлювальних робіт застосовують різні методи поверхневого пластичного деформування, які поліпшують фізико-механічні властивості поверхневих шарів металу, послаблюють вплив концентраторів напружень, сприяють перерозподілу зварювальних залишкових напружень, створюють напруження стиску в околі концентраторів [2–8]. У низці досліджень обґрунтовано ефективність для обробки ЗЗ економічно привабливого і простого в реалізації на виробництві і в польових умовах способу високочастотного механічного удару (ВМУ), в якому частоту ударів бойків забезпечують, використовуючи енергію ультразвуку (в літературі його часом називають методом ультразвукового ударного оброблення). Водночас відомі дотепер результати про його ефективність для підвищення втомної довговічності ЗЗ отримано без урахування впливу корозивних середовищ [9, 10]. Характеристики опору корозійній втомі зразків із ЗЗ, зміцнених ВМУ у вихідному стані, визначені лише за тривалості випробувань від 10 до 200 h [10–13], під час яких суттєвих корозійних пошкоджень у зміцненому шарі металу не відбувається.

Останнім часом з'явилася інформація про рівень наведених залишкових напружень та характеристики опору втомі за тривалого впливу корозивних середовищ на ЗЗ, зміцнені за технологією ВМУ [14, 15]. Виявили, що після ВМУ в поверхневих шарах металу ЗЗ з поздовжнім ребром жорсткості виникають залишкові напруження стиску на глибину понад 1 mm [14]. Витримування у синтетичній морській воді впродовж часу, еквівалентного 7,5 рокам експлуатації, викликало корозійно-механічне руйнування зміцненого поверхневого шару металу на глибину до ~ 1 mm, через що залишкові напруження стиску знизились на поверхні, а по глибині практично не змінювалися. Оцінюючи характеристики опору втомі стикових ЗЗ залізничних рейок у вихідному стані та після ВМУ з подальшим витримуванням 450 h у синтетичній морській воді ($105 \text{ g/l NaCl} + 12,7 \text{ MgCl}_2 + 7,7 \text{ MgSO}_4 \cdot 7 \text{ H}_2\text{O} + 12,15 \text{ CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + 0,5 \text{ g/l CaCO}_3$), виявили, що границя їх обмеженої витривалості на базі $2 \cdot 10^5$ циклів у вихідному стані становила 256 МПа, після ВМУ – 314 МПа, а після ВМУ з витримуванням у корозивному середовищі – 290 МПа [15]. Припустили, що підвищення характеристик опору втомі, у тому числі і після витримування у корозивному середовищі, обумовлено нанорозмірним подрібненням структури поверхневого шару металу.

Оскільки корозивні середовища спричиняють руйнування пластично деформованого ВМУ шару, то актуально оцінити ефективність цієї технології для поліпшення властивостей опору втомі зварних елементів конструкцій, які впродовж тривалої експлуатації зазнають атмосферних впливів, характерних для зони помірного клімату України. Для цього треба визначити корозійну тривкість (за швидкістю втрати металу, видом та розмірами корозійних дефектів тощо) металу ЗЗ за підвищених вологості повітря і температури.

Нижче проаналізовано ефективність технології ВМУ для підвищення характеристик опору втомі стикових ЗЗ після їх виготовлення та тривалої експлуатації в зоні помірного клімату.

Матеріал і методика. Досліджували зразки зі стиковими ЗЗ з низьколегованої сталі 15ХСНД (0,142 mass% C; 0,466 Si; 0,63 Mn; 0,02 S; 0,013 P; 0,31 Ni; 0,66 Cr; 0,34 mass% Cu) підвищеної міцності ($\sigma_{0,2} = 400 \text{ МПа}$, $\sigma_B = 565 \text{ МПа}$), з якої виготовляють прогони залізничних мостів. Вона добре зварюється, стійка до атмосферних впливів і роботоздатна в діапазоні температур від -70 до $+45^\circ\text{C}$.

Заготовки для ЗЗ розміром $600 \times 175 \text{ mm}$ вирізали з гарячевальцьованого листового прокату $6000 \times 2000 \text{ mm}$ завтовшки 12 mm. Стикові ЗЗ на пластинах формували без оброблених крайок зі зазором між ними $0 \dots 1,0 \text{ mm}$, використовуючи двостороннє одностороннє автоматичне зварювання під флюсом ОР 192 (фірми Oerlikon) дротом Св-08Г1НМА діаметром 4 mm. Зварювали за зворотної полярності від електричного випрямляча ВСЖ-1600. Режим зварювання першого шва: $U = 55 \text{ V}$, $I = 650 \dots 700 \text{ A}$, $V = 26,7 \text{ m/h}$, другого (з протилежного боку): $U = 57 \text{ V}$, $I = 760 \dots 780 \text{ A}$, $V = 26,7 \text{ m/h}$. Другий шов формували після повного охолодження першого.



Рис. 1. Корозійні пошкодження головної балки моста через р. Дніпро (Київ).

Fig. 1. Corrosion damage of the main beam of the bridge across the Dnipro River (Kyiv).

З кожної звареної пластини розміром 600×350 mm виготовляли вісім зразків.

Зразки на циклічно розтягували машині УРС-20 з асиметрією циклу $R_{\sigma} = 0$ і частотою навантаження 5 Hz. Випроби завершували після їх руйнування або перевищення бази випроб 2·10⁶ циклів. Досліджували чотири серії зразків: у вихідному стані без ВМУ – серія 1 та у зміцненому ВМУ стані після впливу на них корозивного середовища – серія 2; після циклічного напрацювання без попередньої обробки ВМУ з подальшим впливом корозивного середовища – серія 3 та після додаткового зміцнення ВМУ зразків третьої серії – серія 4. Криві втоми таких ЗЗ у вихідному та у зміцненому станах у повітрі отримані раніше [13].

Попереднє циклічне напрацювання зразків третьої та четвертої серій здійснили на гідравлічних машинах ZDM-10 pu за максимальних напружень у віднульовому циклі 150 МПа (в околі границі обмеженої витривалості таких ЗЗ [13]) за бази випробувань 2·10⁶ циклів. Відсутність тріщин втоми контролювали методом газової проби. Корозійні випроби зразків всіх серій виконували в камері Г4 за температури 40°C і вологості повітря 98% впродовж 1200 h.

Зміцнювали ЗЗ на українському устаткуванні USTREAT-1.0, в якому ручний компактний ударний інструмент з п'єзокерамічним перетворювачем з'єднаний з ультразвуковим генератором вихідної потужності 500 V. Зміцнювали вузьку зону переходу металу шва (МШ) до зони термічного впливу (ЗТВ), тобто лінію сплавлення. Для цього застосовували однорядну чотирибойкову насадку з бойками діаметром 3 mm. Амплітуда коливань торця хвилеводу 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 ВМУ станах до та після корозійних випроб вивчали на оптичному мікроскопі НЕОРНОТ 32, а цифрові зображення структури отримали за допомогою цифрової камери Olympus C5050.

Результати досліджень. Зовнішній вигляд зразків стикових ЗЗ у вихідному і зміцненому ВМУ станах перед та після корозійних випроб ілюструє рис. 2. Після їх витримування за підвищених вологості повітря і температури на поверхні обох варіантів ЗЗ утворився нерівномірний шар продуктів корозії. Оскільки втомні тріщини, як правило, утворюються вздовж лінії сплавлення ЗЗ, то досліджували зону переходу від МШ до ОМ. Згідно з ГОСТ 9.908 корозію поверхні ідентифікували як суцільну і нерівномірну, а основними видами уражень поверхневих шарів металу в ЗТВ були корозійні плями і різні за розмірами виразки. Для подальших втомних випробувань з поверхні зразків (лише на ділянках під захопи) механічним способом усували продукти корозії. Проте під час зберігання зразків впродовж випроб основна частина продуктів корозії відшарувалася.

Металографічними дослідженнями встановили, що розмір зерна, ширина і мікроструктура ЗТВ швів першої і другої серій практично однакові. Відрізнялися лише їх розміри безпосередньо біля поверхні і в глибині зразків. Біля поверхні ЗЗ у зоні завширшки ~ 0,8 mm з крупними зернами (ЗКЗ) виявили зерна № 5 (рідше – № 4 і 6); у зоні завширшки ~ 1,3 mm з дрібними зернами (ЗДЗ) – № 7–10 (рис. 3a). У ЗКЗ біля поверхні зразків зафіксували також зерна фериту зі щільно розподіленою в них МАК-фазою (за типом верхнього і нижнього бейніту), вздовж меж яких спостерігали виділення полігонального фериту у вигляді ширших прошарків або ланцюжків з окремих зерен, а також окремі зерна фериту № 7–8 (рис. 3b). На глибині близько 2 mm від поверхні ширина ЗКЗ збільшилася до ~ 2 mm, а розмір зерен змінився на № 3–4. Структура металу в глибших шарах цієї зони феритна зі щільно розподіленими виділеннями МАК-фази у вигляді впорядкованих пластинкових виділень за типом верхнього бейніту з окремими пластинками завдовжки ~ 108 μm наскрізь всього зерна; виявили також хаотично

розподілені досить великі зернисті часточки. Межі зерен окреслені відносно широкими (до 5...8 μm) прошарками полігонального фериту (рис. 3b). У великих зернах зафіксували також ознаки їх фрагментації з МАК-фазою різних морфологій та орієнтації.

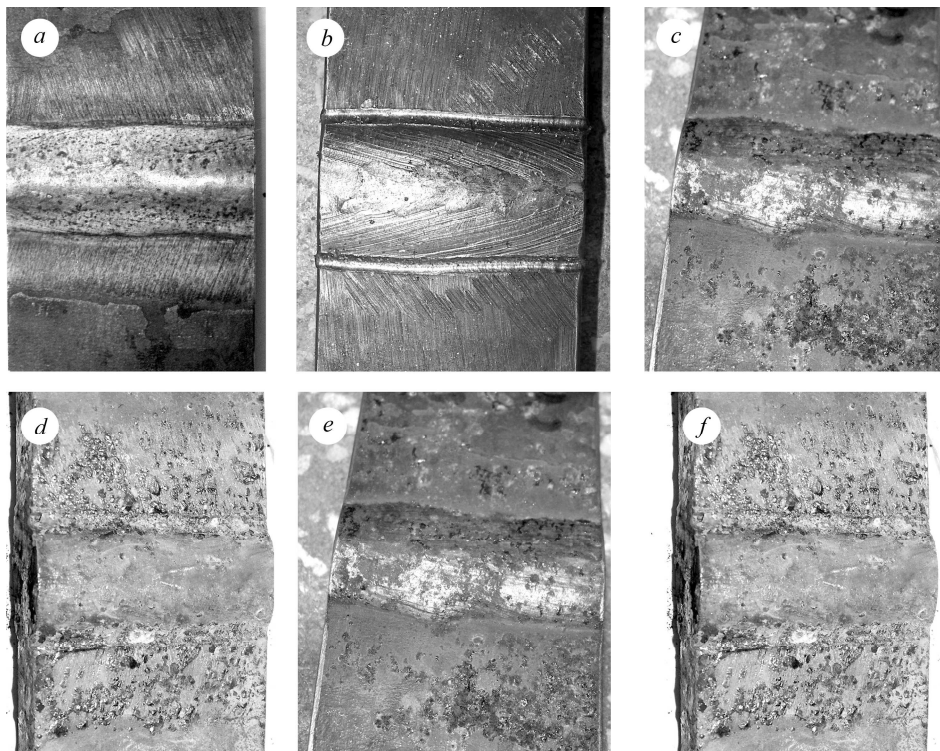


Рис. 2. Поверхні стикових ЗЗ у вихідному стані (a), після зміцнення способом ВМУ (b) та зразків першої (c), другої (d), третьої (e) і четвертої (f) серій перед втомними випробами.

Fig. 2. Surfaces of the butt welded joints as-welded (a), treated by high-frequency mechanical impact (HFMI) (b) and specimens of the first (c), the second (d), the third (e) and the fourth (f) series before the fatigue tests.

Після ВМУ вздовж лінії сплавлення сформувалися практично однакові за розмірами канавки шириною 3,0...3,5 mm та глибиною 280...340 μm (рис. 3b). Під їх поверхнею у МШ і в ЗТВ утворилися пластично деформовані шари завширшки 1,7...1,82 і 1,3...1,7 mm відповідно. Їх глибина в обох зонах ЗЗ становила 260...325 μm (рис. 3c) і обумовлена очевидними змінами структури металу під поверхнею канавок. 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 зі заглибленням від поверхні.

Після експонування зразків за підвищених вологості повітря і температури глибина виразок у поверхневих шарах МШ стикових ЗЗ у вихідному стані становила 0,039...1,04 mm, а після оброблення ВМУ – 0,039...0,091 mm (див. таблицю). Глибина таких виразок у ЗТВ стикових ЗЗ у вихідному стані 0,026...1,30 mm, а після ВМУ зменшилась практично до нуля і не виходила за межі похибки вимірювання. Отже, оброблення лінії сплавлення способом ВМУ сприяло підвищенню корозійної тривкості (за глибиною корозійних дефектів) лише металу ЗТВ і майже не вплинуло на цю характеристику МШ. Після корозійних випроб зразків

ЗЗ у вихідному стані і після зміцнення ВМУ, окрім корозійних виразок у зоні сплавлення, зафіксували крізьзеренні тріщини (рис. 3*b, d*). Щоб з'ясувати причини їх виникнення, необхідні додаткові дослідження.

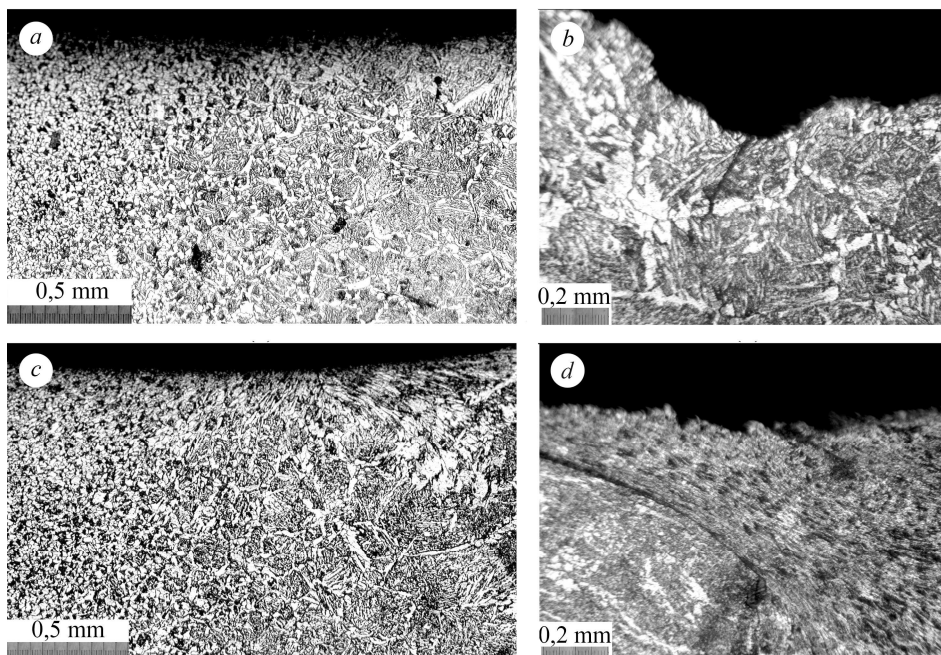


Рис. 3. Мікροструктура поверхнього шару металу ЗТВ без (*a, b*) та після оброблення способом ВМУ (*c, d*) стикового ЗЗ перед (*a, c*) та після корозійних випроб за вологості повітря 98% та температури 40°C впродовж 1200 h (*b, d*).

Fig. 3. Microstructure of the surface layer of the metal HAZ untreated (*a, b*) and treated by HFMI (*c, d*) of the butt welded joint before (*a, c*) and after corrosion tests for humidity air 98% and temperature 40°C for 1200 h (*b, d*).

Розміри корозійних пошкоджень на поверхні металу в межах МШ і ЗТВ стикових ЗЗ сталі 15ХСНД після експонування впродовж 1200 h за підвищених вологості повітря і температури

Стан зразків	У межах МШ		У межах ЗТВ	
	глибина, mm	ступінь ураження, %	глибина, mm	ступінь ураження, %
У вихідному стані	0,039...0,104	19	0,026...0,130	100
Після обробки ВМУ	0,039...0,091	6,3	У межах похибки вимірювання	

Результати втомних випробувань зразків всіх серій зі стиковими ЗЗ після експонування за підвищених вологості повітря і температури наведені на рис. 4*a*. Для порівняння на рис. 4*b* подано також результати випробувань відповідних ЗЗ у повітрі [13]. Витримування зразків ЗЗ без зміцнення за підвищених вологості повітря і температури впродовж 1200 h призвело до зниження границі обмеженої витривалості на базі $2 \cdot 10^6$ циклів на $\approx 16\%$ (від 187 до 157 МПа) і до зменшення циклічної довговічності у діапазоні $4 \cdot 10^5 \dots 2 \cdot 10^6$ циклів до 2,5 рази (крива 1, рис. 4*a*). Внаслідок корозійного впливу також на $\approx 20\%$ (від 273 до 219 МПа) знизилась границя витривалості зміцнених ЗЗ. Водночас, отримані результати вказу-

ють на доцільність застосування ВМУ до стикових ЗЗ на стадії виготовлення металоконструкцій, оскільки границя їх обмеженої витривалості на базі $2 \cdot 10^6$ циклів підвищилася на 39% (від 157 до 219 МПа), а циклічна довговічність зросла до 7 разів (крива 2, рис. 4а). Незміцнені стикові ЗЗ руйнувалися уздовж лінії сплавлення, а зміцнені, випробувані після експонування за підвищеної вологості, – по ЗТВ або ОМ на відстані 15...60 мм від лінії сплавлення ЗЗ. Границя обмеженої витривалості (на базі $2 \cdot 10^6$ циклів) зміцнених ЗЗ навіть після витримування у камері Г4 впродовж 1200 h на 17% вища, ніж незміцнених, випробуваних у повітрі.

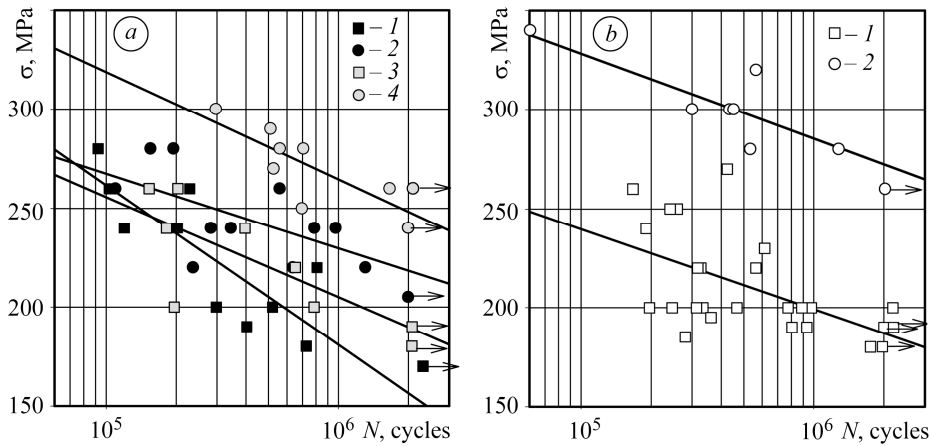


Рис. 4. Ділянки кривих втоми σ - N зразків зі стиковими ЗЗ сталі 15XCHD у вихідному (1) і зміцненому ВМУ (2) станах, отримані після експонування за вологості повітря 98% і температури 40°C впродовж 1200 h (а) та у повітрі [13] (b), та зразків після циклічного напрацювання $2 \cdot 10^6$ циклів з подальшим експонуванням за підвищених вологості повітря і температури 1200 h без (3) та зі зміцненням методом ВМУ (4).

Fig. 4. Parts of fatigue σ - N curves of the specimens with butt welded joints of 15XCHD steel in virgin state (1) and treated by HFMI method (2), obtained after corrosion tests in air for humidity 98% and temperature 40°C for 1200 h (a) and in air [13] (b), and also for the specimens after cycling of $2 \cdot 10^6$ cycles and following corrosion tests at high air humidity and temperature for 1200 h without hardening (3) and after following treatment by HFMI method (4).

Характеристики опору втомі зразків третьої серії зі стиковими ЗЗ без зміцнення після циклічного напрацювання ($2 \cdot 10^6$ циклів) та подальшого витримування за підвищених вологості повітря і температури впродовж 1200 h виявилися вищими, ніж зразків першої серії без напрацювання: їх границя обмеженої витривалості підвищилася на $\approx 21\%$ (від 157 до 190 МПа), а циклічна довговічність у діапазоні $5 \cdot 10^5 \dots 2 \cdot 10^6$ циклів збільшилася майже вдвічі (крива 3, рис. 4а). Це можна пояснити частковою релаксацією залишкових зварювальних напружень розтягу під час $2 \cdot 10^6$ циклів напрацювання перед випробами. Зразки третьої серії руйнувалися вздовж лінії сплавлення. Характеристики опору втомі зразків четвертої серії після напрацювання $2 \cdot 10^6$ циклів навантаження, подальшого витримування за підвищених вологості повітря і температури 1200 h та зміцнення виявилися також вищими, ніж другої серії без напрацювання: границя обмеженої витривалості на базі $2 \cdot 10^6$ циклів підвищилася на $\approx 13\%$ (від 219 до 248 МПа), а циклічна довговічність у діапазоні $10^5 \dots 2 \cdot 10^6$ циклів збільшилася до 6 разів (крива 4, рис. 4а). Таке підвищення характеристик опору втомі стикових ЗЗ після циклічного напрацювання (див. рис. 2e) порівняно зі ЗЗ без нього (рис. 2d) пов'язане з відсутністю корозійних пошкоджень у поверхневому шарі пластично деформованого ВМУ металу. Використовуючи ВМУ після корозійних випробувань, вдається повністю усунути корозійні пошкодження у зоні оброблення (рис. 2e).

Зразки четвертої серії руйнувалися по ОМ на деякій віддалі від лінії сплавлення ЗЗ. Отже, технологія ВМУ доцільна для зміцнення стикових ЗЗ металоконструкцій навіть після їх тривалої експлуатації, оскільки границя обмеженої витривалості на базі $2 \cdot 10^6$ циклів таких ЗЗ підвищується на 30% (від 190 до 248 МПа), а циклічна довговічність збільшується більш ніж у 10 разів.

Таким чином, результати експериментальних досліджень вказують на високу ефективність зміцнення ВМУ стикових ЗЗ металоконструкцій, які під час експлуатації зазнають впливу змінних навантажень і атмосфери, властивої зоні помірного клімату. Обробляти ЗЗ доцільно і на стадії виготовлення, і після тривалої експлуатації. Захист зміцненого ВМУ шару металу від атмосферного впливу за використання лакофарбових покривів дасть змогу наблизитись до характеристик опору втомі ЗЗ, отриманих за випробування в повітрі (крива 2, рис. 4b).

ВИСНОВКИ

Методом металографії встановлено, що під час застосування ВМУ для зміцнення стикових ЗЗ сталі 15ХСНД уздовж лінії сплавлення виникає інтенсивна деформація (витягування) зерен в МШ та ЗТВ. При цьому глибина пластично деформованого шару металу зі суттєвими змінами форми зерен (коефіцієнт форми зерна $K_f = 8 \dots 20$) досягає 260...325 мкм. Виявлено, що зміцнення ЗЗ перед експонуванням за підвищених вологості повітря і температури сприяє суттєвому збільшенню корозійної тривкості металу ЗТВ (за глибиною корозійних дефектів), але практично не впливає на тривкість МШ. Технологія ВМУ ефективна для підвищення характеристик опору втомі ЗЗ металоконструкцій на стадії їх виготовлення, які під час експлуатації зазнаватимуть одночасного впливу змінних навантажень та атмосфери помірного клімату. Зміцнення стикових ЗЗ перед експонуванням за підвищених вологості повітря (98%) і температури (40°C) впродовж 1200 h призводить до зростання їх циклічної довговічності до 7 разів (залежно від рівня напружень) та границі обмеженої витривалості на базі $2 \cdot 10^6$ циклів – на ~ 39%.

Експериментально обґрунтована доцільність способу ВМУ для підвищення характеристик опору втомі ЗЗ тривало експлуатованих металоконструкцій з корозійно-втомними пошкодженнями, що виникли за одночасного впливу змінного навантаження та атмосферних чинників зони помірного клімату. Зміцнення стикових ЗЗ після попереднього циклічного напруження ($2 \cdot 10^6$ циклів) та експонування за підвищених вологості повітря і температури 1200 h сприяє збільшенню їх циклічної довговічності більш ніж у 10 разів. Границя обмеженої витривалості цих ЗЗ на базі $2 \cdot 10^6$ циклів підвищується на 30%.

РЕЗЮМЕ. Обоснована эффективность технологии высокочастотного механического удара (ВМУ) для повышения характеристик сопротивления усталости стыковых сварных соединений (СС) на стадии изготовления металлоконструкций и после их длительной эксплуатации в условиях атмосферы умеренного климата. Длительное влияние атмосферы смоделировано выдержкой в камере Г4 с повышенной влажностью воздуха 98% при 40°C в течение 1200 h. На усталость испытаны четыре серии образцов СС стали 15ХСНД: в исходном и упрочненном ВМУ состояниях после выдержки в камере Г4; после наработки $2 \cdot 10^6$ циклов напряжений и выдержки в камере Г4; после наработки $2 \cdot 10^6$ циклов нагружения, выдержки в камере Г4 и последующего упрочнения ВМУ. Установлено, что обработка линии сплавления технологией ВМУ дает возможность существенно увеличить циклическую долговечность стыковых СС металлоконструкций, которые при эксплуатации подвергаются влиянию атмосферы умеренного климата и переменных нагрузок.

SUMMARY. The effectiveness of the high-frequency mechanical impact (HFMI) technology to increase the resistance characteristics of fatigue butt welded joints at the stage of production of steel structures or after their long-time exploitation in moderate temperate climate was established. The long-term influence of the atmosphere of moderate climate was simulated by exposing the samples to a moisture chamber of G4 at a temperature of 40°C and air humidity of

98% for 1200 h. Fatigue tests were carried out on four series of butt welded joints of 15XCHД steel: in the initial and treated by HFMI states after exposing to the moisture chamber G4; after accumulation $2 \cdot 10^6$ cycles and exposure in the moisture chamber G4; after accumulation $2 \cdot 10^6$ cycles, exposure to the moisture chamber G4 and subsequent treatment by HFMI. It was experimentally established that the use of HFMI technology could significantly increase the fatigue life of welded joints of steel structures, which during the operation underwent the influence of the variable loads and moderate climate.

1. *Vuherer T., Maruschak P., and Samardžić I.* Behaviour of coarse grain heat affected zone (HAZ) during cycle loading // *Metalurgija*. – 2012. – **51**, № 3. – P. 301–304.
2. *Kulekci M. K. and Esme U.* Critical analysis of processes and apparatus for industrial surface peening technologies // *Int. J. Adv. Manufact. Techn.* – 2014. – **74**, № 9. – P. 1551–1565.
3. *Rehabilitation and repair of welded elements and structures by ultrasonic peening / Y. Kudryavtsev, J. Kleiman, A. Lugovskoy, L. Lobanov, V. Knysh, O. Voitenko, and G. Prokopenko // Welding in the Word.* – 2007. – **51**, № 7–8. – P. 47–53.
4. *Abston S.* The technology and applications of ultrasonic impact technology // *Australasian Welding J.* – 2010. – **55**. – P. 20–21.
5. *Madox S. J., Dore M. J., and Smith S. D.* A case study of the use of ultrasonic peening for upgrading a welded steel structure // *Welding in the Word.* – 2011. – **55**, № 9. – P. 56–67.
6. *Abdullah A., Malaki M., and Eskandari A.* Strength enhancement of the welded structures by ultrasonic peening // *Materials & Design*. – 2012. – **38**. – P. 7–18.
7. *Yalchiner F. B. and Barsoum Z.* Life Extension of welded structures using HFMI techniques – potential application to offshore structures // *Procedia Structural Integrity*. – 2017. – **5**. – P. 377–384.
8. *HFMI: understanding the mechanisms for fatigue life improvement and repair of welded structures / F. Lefebvre, C. Peyrac, G. Elbel, C. Revilla-Gomez, C. Verdu, and J-Y. Buffiere // Welding in the Word.* – 2017. – **61**, № 4. – P. 789–799.
9. *Improvement of fatigue resistance of welded joints in metal structures by high-frequency mechanical peening (Review) / L. M. Lobanov, V. I. Kirian, V. V. Knysh, and G. I. Prokopenko // The Paton Welding J.* – 2006. – № 9. – C. 2–8.
10. *Malaki M. and Ding H.* A review of ultrasonic peening treatment // *Materials and Design*. – 2015. – **87**. – P. 1072–1086.
11. *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.
12. *Enhancement of the fatigue strength of underwater wet welds by grinding and ultrasonic impact treatment / W. Gao, D. Wang, F. Cheng, C. Deng, Y. Liu, and W. Xu // J. Mater. Proc. Techn.* – 2015. – **223**. – P. 305–312.
13. *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. Осодчук, 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. Kadyshev, L. I. Nyrkova, S. A. Osadchuk // Material Science.* – 2017. – **53**, № 1. – P. 7–13.)
14. *Ahmad B. and Fitzpatrick M. E.* Effect of ultrasonic peening and accelerated corrosion exposure on residual stress distribution in welded marine steel // *Metallurgical and Mat. Transact. A.* – 2015. – **46**. – P. 1214–1226.
15. *Fan Y., Zhao X., and Liu Y.* Research on fatigue behavior of the flash welded joint enhanced by ultrasonic peening treatment // *Materials & Design*. – 2016. – **94**. – P. 515–522.

Одержано 21.11.2017