

## ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ПРОКОВКИ НА КОРРОЗИОННУЮ УСТАЛОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

В. В. КНЫШ, С. А. СОЛОВЕЙ, А. А. КАДЫШЕВ,  
Л. И. НЫРКОВА, С. А. ОСАДЧУК

*Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев*

Обоснована ефективність високочастотної механічної проковки (ВМП) для підвищення характеристик корозійної усталості зварних з'єдинень і оцінено її вплив на корозійну стійкість основного металу. Досліджено циклічна довговічність стыкових і таврових зварних з'єдинень сталі 15ХСНД в вихідному і упрочненому ВМП станах на повітрі і в корозійній середі (3% NaCl) при частоті 5 Гц. Використані зразки основного металу після шліфування і після шліфування з наступним упрочненням ВМП. Встановлено, що обробка ВМП суттєво підвищує усталостні характеристики зварних з'єдинень як на повітрі, так і в 3% NaCl. Виявлено її вплив на швидкість загальної корозії поверхні зразків основного металу після випробувань 1300; 2200; 4700 і 8760 год в дистильованій воді і 3% NaCl.

**Ключевые слова:** *атмосферостійка сталь, зварне з'єдинення, високочастотна механічна проковка, корозійна усталість, корозійна стійкість.*

Для підвищення корозійної усталості і стійкості зварних з'єдинень металоконструкцій тривалої експлуатації застосовують різні методи поверхневого пластичного деформування металу, направлені на зміну структури його поверхневого шару, підвищення мікротвердості, зняття залишкових напружень розтягнення і наведення залишкових напружень стиснення, зменшення концентрації напружень вздовж лінії переходу металу шва в зону термічного впливу (ЗТВ) [1–5]. Ефективним для упрочнення зварних конструкцій, що працюють в умовах змінного навантаження, є один з методів поверхневого пластичного деформування (ППД) – високочастотна механічна проковка (ВМП), відома також як ультразвукова ударна обробка (УУО). Її застосування на етапі виготовлення конструкцій достатньо добре вивчено: встановлено основні закономірності підвищення циклічної довговічності і межових вимогливості зварних з'єдинень в залежності від класу міцності сталі, типу з'єдинення, характеристик циклу змінного навантаження; визначено її переваги порівняно з іншими способами ППД металу [6, 7]. Оцінено ефективність упрочнення зварних вузлів і елементів металоконструкцій технологією ВМП з метою підвищення їх корозійної усталості і стійкості [8–13]. Так, в роботі [8] досліджували цілісність ВМП і лазерної обробки для підвищення опору корозійній усталості стыкових зварних з'єдинень з сталі 15Г2ФБ. Упрочненню ВМП піддали лінію сплавлення і ЗТВ шириною 10...15 мм. Встановили, що межа обмеженої вимогливості зварних з'єдинень на базі  $10^7$  циклів навантаження внаслідок ВМП збільшується на 20% (с 140 до 170 МПа) на повітрі і на 25% (с 80 до 100 МПа) – в синтетичній морській воді. Виявлено [9], що після упрочнення лінії переходу металу шва на метал ЗТВ таврових звар-

ных соединений предел их ограниченной выносливости на базе  $2 \cdot 10^6$  циклов нагружения повышается на 111% (с 123 до 260 МПа) на воздухе и на 73% (с 107 до 185 МПа) – в 3% NaCl. Выявлена [10] перспективность комбинированных обработок, например ВМП и электроискрового легирования (ЭИЛ), для повышения коррозионной усталости тавровых сварных соединений. Установлено, что наиболее оптимальный вариант – ВМП + ЭИЛ хромом + ВМП. Вследствие УУО ферритно-мартенситной реакторной стали (с содержанием хрома 12%) в тонком поверхностном слое металла происходит измельчение структуры до наноразмеров, увеличивается микротвердость и формируется неравномерная обогащенная хромом оксидная пленка, что способствует существенному росту коррозионной стойкости металла при температуре окружающей среды 500°C [11].

Выявлена [12] высокая эффективность обработки ВМП сварных соединений, работающих при нагрузках до 85...95% предела текучести материала в коррозионной среде (стыковое соединение труб). С помощью такой технологии удалось повысить циклическую долговечность сварных соединений труб стали А106-В в диапазоне максимальных напряжений (от 305 до 345 МПа) в 2,0–2,5 раза. Эффективность шлифования и ВМП для улучшения характеристик сопротивления усталости тавровых сварных соединений низколегированной стали ДНЗ6 исследовали ранее [13]. Шлифовали и (или) упрочняли УУО под водой, однако, на усталость испытывали на воздухе. Установили, что предел ограниченной выносливости сварных соединений на базе  $2 \cdot 10^6$  циклов нагружения после обработки линии сплавления шлифованием повышается на 20%, после УУО – на 35%, а после шлифования с последующей УУО – на 61%. Важным фактором, способствующим увеличению характеристик сопротивления коррозионной усталости, может оказаться также повышение коррозионной стойкости после ВМП.

Цель настоящей работы – оценить эффективность ВМП для улучшения характеристик сопротивления коррозионной усталости стыковых и тавровых сварных соединений стали 15ХСНД (0,142% С, 0,466 Si, 0,63 Mn, 0,02 S, 0,013 P, 0,31 Ni, 0,66 Cr, 0,34% Cu) и установить влияние этой технологии на ее коррозионную стойкость.

**Материал и методика.** Испытывали образцы стыковых и тавровых сварных соединениях низколегированной стали 15ХСНД ( $\sigma_T = 400$  МПа,  $\sigma_B = 565$  МПа), которая широко применяется для изготовления элементов металлоконструкций длительной эксплуатации (например, в пролетных строениях железнодорожных мостов), имеет повышенную прочность, хорошо сваривается, устойчива к атмосферным воздействиям и работоспособна в диапазоне температур от минус 70°C до плюс 45°C. Заготовки образцов вырезали из горячекатаного листового проката толщиной 12 mm двенадцатой категории. Размеры заготовок под стыковые соединения 600×180 mm, под тавровые – 350×70 mm. Двухстороннюю автоматическую сварку стыковых соединений выполняли под флюсом ОР 192 (Oerlikon) без разделки кромок проволокой Св-08Г1НМА диаметром 4 mm. Режим сварки первого шва:  $U = 55$  V,  $I = 650...700$  А,  $V = 26,7$  m/h; второго (с противоположной стороны):  $U = 57$  V,  $I = 760...780$  А,  $V = 26,7$  m/h. После сварки из каждой пластины изготавливали по восемь образцов. Тавровые сварные соединения получали путем приварки ручной дуговой сваркой электродами марки УОНИ 13/55 поперечных ребер жесткости (из стали 15ХСНД) с двух сторон пластины угловыми швами. Корень проваривали электродами диаметром 3 mm, шов формировали электродами диаметром 4 mm. Форма и геометрические размеры образцов сварных соединений приведены на рис. 1. Толщина образца обусловлена применимостью в инженерных сварных металлоконструкциях проката толщиной 12 mm, а ширина их рабочей части ограничена мощностью испытательного оборудования.

Испытывали на машине УРС-20 при циклическом растяжении (асимметрия

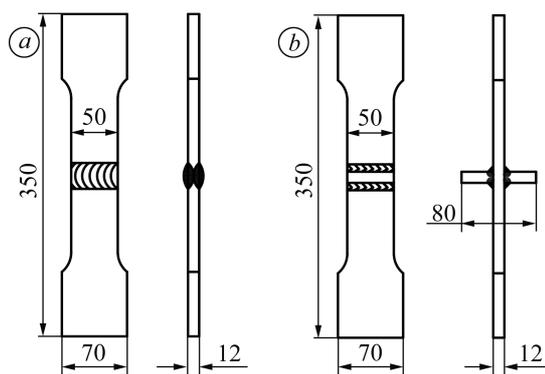


Рис. 1. Форма и геометрические размеры стыкового (*a*) и таврового (*b*) образцов сварных соединений.

Fig. 1. Geometry sizes of the butt (*a*) and T-shaped (*b*) welded joints.

цикла  $R_\sigma = 0$ , частота нагружения 5 Hz). Критерием завершения исследования служило полное разрушение образцов или превышение базы испытаний  $2 \cdot 10^6$  циклов нагружения.

Использовали по четыре серии образцов стыковых и тавровых сварных соединений: в исходном состоянии на воздухе (первая серия); упрочненные ВМП по линии сплавления на воздухе (вторая); в исходном состоянии в коррозионной среде (третья); упрочненные ВМП по линии сплавления в коррозионной среде (четвертая).

Для упрочнения технологией ВМП использовали оборудование USTREAT-1.0, в котором ручной компактный ударный инструмент с пьезокерамическим преобразователем соединен с ультразвуковым генератором выходной мощностью 500 W. Поверхностному пластическому деформированию подвергали узкую зону перехода металла шва (МШ) на ЗТВ, т. е. деформировали по линии сплавления. Как упрочнитель применяли однорядную четырехбойковую насадку с диаметром бойков 3 mm. Скорость ВМП при обработке тавровых сварных соединений 1 mm/s, а стыковых 2 mm/s. Амплитуда колебаний торца волновода ручного ударного инструмента 25  $\mu$ m.

В качестве коррозионной среды использовали 3% NaCl. Съёмную емкость из стали 12X18H10T объемом 1,2 l заполняли раствором после ее монтажа на образце в ненагруженном состоянии. Зазор между захватной частью образца и емкостью уплотняли резиновой прокладкой и заливали силиконом, что исключало их контактирование. Конструкция емкости обеспечивала постоянный контакт сварного шва, ЗТВ и части основного металла (ОМ) с рабочим раствором в процессе испытаний.

Коррозионную стойкость упрочненного технологией ВМП поверхностного слоя стали 15XCHД оценивали на образцах ОМ размером 70×50×10 mm. Одну их часть шлифовали, а вторую – шлифовали и обрабатывали ВМП. Упрочняли поверхность многорядной семибойковой насадкой с диаметром бойков 5 mm, скорость ВМП 35  $\text{cm}^2/\text{min}$ . Коррозионную стойкость оценивали [14] по потерям массы образцов при их полном погружении в 3% NaCl или дистиллированную воду при комнатной температуре. Измеряли через 1300; 2200; 4700 и 8760 h. Перед взвешиванием образцы обезжировали оксидом магния, промывали в проточной водопроводной воде, затем – в дистиллированной воде, вытирали фильтровальной бумагой и сушили в тепловой камере при  $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$  в течение 1 h.

**Результаты исследований.** По экспериментальным данным построили кривые усталости стыковых сварных соединений на воздухе и в коррозионной среде в исходном и упрочненном технологией ВМП состояниях (рис. 2*a*). Выявили, что после ВМП вблизи наиболее вероятных мест локализации усталостных повреждений циклическая их долговечность на воздухе увеличивается более чем в 10 раз, а предел ограниченной выносливости на базе  $2 \cdot 10^6$  циклов – на  $\approx 45\%$  (с 185 до 270 МПа). При испытаниях в коррозионной среде предел ограниченной выносливости сварных соединений в исходном состоянии снижается на  $\approx 30\%$  (с 185 до 130 МПа). Установили, что ВМП существенно улучшает их характеристики

сопротивления коррозионной усталости: циклическая долговечность увеличивается в 2–6 раз (в зависимости от прикладываемых напряжений), а предел ограниченной выносливости на базе  $2 \cdot 10^6$  циклов – на  $\approx 70\%$  (с 130 до 220 МПа).

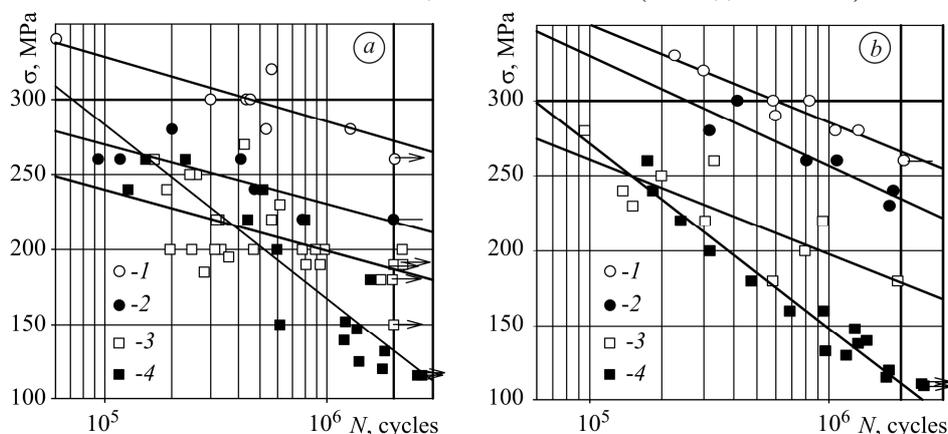


Рис. 2. Кривые усталости стыковых (а) и тавровых (б) сварных соединений стали 15XCHD: 1, 2 – в упрочненном ВМП состоянии на воздухе и в 3% NaCl; 3, 4 – в исходном состоянии на воздухе и в 3% NaCl.  $R_\sigma = 0, f = 5$  Hz.

Fig. 2.  $S-N$  curves of the butt (a) and T-shaped (b) 15XCHD steel welded joints: 1, 2 – for treated by high-frequency mechanical peening (HFMP) in air and in the 3% NaCl; 3, 4 – for as-welded joints in air and in the 3% NaCl.  $R_\sigma = 0, f = 5$  Hz.

Выявили, что ВМП увеличивает циклическую долговечность тавровых сварных соединений на воздухе более чем в 10 раз, а предел ограниченной выносливости на базе  $2 \cdot 10^6$  циклов – на  $\approx 47\%$  (с 180 до 265 МПа) (рис. 2б). При этом следует отметить, что после такого упрочнения существенно уменьшился разброс экспериментальных данных (кривые 1 и 3). В коррозионной среде предел ограниченной выносливости неупрочненных соединений снижается на  $\approx 39\%$  (с 180 до 110 МПа). ВМП увеличила их циклическую долговечность в коррозионной среде в 4–10 раз (в зависимости от прикладываемых напряжений), а предел ограниченной выносливости на базе  $2 \cdot 10^6$  циклов – на  $\approx 114\%$  (с 110 до 235 МПа), что подтверждает высокую эффективность технологии.

Результаты изменения скорости коррозии стали 15XCHD в дистиллированной воде и 3% NaCl во времени приведены в таблице. После выдержки 8760 h в этих средах образовались продукты коррозии черного цвета, равномерно покрывающие всю поверхность образцов. После их удаления поверхность оставалась гладкой, локальных повреждений в упрочненном слое не наблюдали.

Установили, что упрочнение ВМП поверхности образцов ОМ не изменяет скорости коррозии при выдержке 1300 h. В частности, скорость потери металла в дистиллированной воде 0,0322 и 0,0338 mm/year, а в 3% NaCl – 0,0290 и 0,0289 mm/year, соответственно, без и с обработкой поверхности ВМП. С увеличением времени выдержки в среде скорость коррозии исходных (после шлифования) и упрочненных образцов уменьшилась. Отметим, что после выдержки 8760 h она практически не зависит от коррозионной среды, а только от состояния поверхности (шлифованная или упрочненная). В частности, для шлифованных образцов скорость потери металла в дистиллированной воде и в 3% NaCl составила, соответственно, 0,0252 и 0,0257 mm/year, а для упрочненных – 0,0295 и 0,0285 mm/year. Таким образом, при выдержке 8760 h скорость общей коррозии ОМ после упрочнения технологией ВМП несколько выше, чем после шлифования. Следовательно, возрастание характеристик сопротивления коррозионной усталости вследствие ВМП не вызвано коррозионной стойкостью.

**Скорость коррозии образцов стали 15ХСНД в дистиллированной воде и 3% NaCl в течение разного времени, определенная методом массометрии**

Способ подготовки поверхности образцов	Скорость коррозии, mm/year	
	дистиллированная вода	3% NaCl
1300 h		
Шлифованная	0,0322	0,0290
Шлифованная + ВМП	0,0338	0,0289
2200 h		
Шлифованная	0,0272	0,0305
Шлифованная + ВМП	0,0318	0,0321
4700 h		
Шлифованная	0,0251	0,0268
Шлифованная + ВМП	0,0223	0,0259
8760 h		
Шлифованная	0,0252	0,0257
Шлифованная + ВМП	0,0295	0,0285

Как известно, скорость коррозии ОМ после упрочнения методами ППД может как повышаться, так и понижаться по сравнению с необработанным (в зависимости от технологических параметров обработки, которые влияют на размер пластически деформированного слоя металла, размер зерна, микротвердость, уровень наведенных остаточных напряжений сжатия, шероховатость поверхности и т. д.). Выявлено [15], что потенциал коррозии упрочненных образцов может и повышаться, и понижаться в сравнении с исходным состоянием в зависимости от времени ВМП. Для повышения коррозионной стойкости рекомендуют [16] шлифовать поверхность образцов на 10...15  $\mu\text{m}$  после упрочнения дробеструйной обработкой, поскольку с увеличением шероховатости возрастает эффективная площадь поверхности. Следовательно, для результативного использования технологии ВМП целесообразно уточнять ее оптимальные параметры.

### **ВЫВОДЫ**

Технология ВМП существенно повышает характеристики сопротивления усталости сварных соединений на воздухе. В частности, циклическая долговечность стыковых и тавровых сварных соединений стали 15ХСНД увеличивается более чем в 10 раз, а пределы ограниченной выносливости на базе  $2 \cdot 10^6$  циклов – соответственно, на 45 и 47%. Она также эффективно улучшает характеристики коррозионной усталости. Способствует увеличению циклической долговечности стыковых сварных соединений стали 15ХСНД в 3% NaCl в 2–6 раз, а тавровых – в 4–10 раз (в зависимости от прикладываемых напряжений). При этом пределы ограниченной выносливости на базе  $2 \cdot 10^6$  циклов нагружения повышаются, соответственно, на 70 и 114%. Выявлено, что улучшение характеристик сопротивления коррозионной усталости вследствие ВМП не связано с коррозионной стойкостью. В частности, при выдержке 8760 h скорость коррозии металла шлифованных образцов в дистиллированной воде и в 3% NaCl, соответственно, составила 0,0252 и 0,0257 mm/year, а упрочненных ВМП – 0,0295 и 0,0285 mm/year.

*РЕЗЮМЕ.* Обґрунтовано ефективність високочастотного механічного проковування (ВМП) для підвищення характеристик корозійної втоми зварних з'єднань і оцінено його вплив на корозійну тривкість основного металу. Досліджена циклічна довговічність стыкових і таврових зварних з'єднань сталі 15ХСНД у вихідному і зміцненому ВМП станах у повітрі і корозивному середовищі (3% NaCl) за частоти 5 Hz. Використано зразки основного металу після шліфування і після шліфування з подальшим зміцненням ВМП. Вста-

новлено, що обробка ВМП суттєво підвищує втомні характеристики зварних з'єднань у повітрі і в 3% NaCl. Виявлено її вплив на швидкість загальної корозії поверхні зразків основного металу після випробувань 1300; 2200; 4700 і 8760 h у дистильованій воді і 3% NaCl.

*SUMMARY.* The effectiveness of high-frequency mechanical peening (HFMP) for improving the resistance to corrosion fatigue of welded joints and corrosion resistance of base metal is substantiated. Fatigue life of as-welded and treated by HFMP joints of weatherproof 15XCHД steel joints in air and in corrosive environment (3% NaCl solution) was investigated. Fatigue testing was carried out on the butt and T-shared welded joints with frequency 5 Hz. Corrosion resistance behavior of base metal was investigated after polishing and after polishing with consequent applying HFMP in the distilled water and 3% solution NaCl. It was experimentally established that the HFMP considerably improves fatigue life of welded joints both in air and in the 3% NaCl solution. The influence of HFMP on the corrosion speed of the base metal sample surfaces after 1300, 2200, 4700 and 8760 h in the distilled water and in the 3% NaCl solution was investigated.

1. Горбач В. Д., Михайлов В. С. Поверхностное упрочнение сварных соединений с целью повышения коррозионно-усталостной долговечности судовых конструкций // Судостроение. – 2000. – № 4. – С. 45–48.
2. Baptista R., Infante V., and Branco C. M. Study of the fatigue behavior in welded joints of stainless steels treated by weld toe grinding and subjected to salt water corrosion // Int. J. of Fatigue. – 2008. – 30. – P. 453–462.
3. Коломийцев Е. В. Коррозионно-усталостная прочность тавровых соединений стали 12X18H10T и методы ее повышения // Автомат. сварка. – 2012. – № 12. – С. 41–43.
4. Effect of high energy shot peening pressure on the stress corrosion cracking of the weld joint of 304 austenitic stainless steel / L. Zhiming, S. Laimin, Z. Shenjin, T. Zhidong, J. Yazhou // Mater. Sci. and Engng. A. – 2015. – 637. – P. 170–174.
5. Nasitowska B., Bogdanowicz Z., and Wojucki M. Shot peening effect on 904 L welds corrosion resistance // J. of Construct. Steel Research. – 2015. – 115. – P. 276–282.
6. 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, G. I. Prokopenko // The Paton welding j. – 2006. – № 9. – С. 2–8.
7. Malaki M. and Ding H. A review of ultrasonic peening treatment // Mater. and Design. – 2015. – 87. – P. 1072–1086.
8. Коломийцев Е. В., Серенко А. Н. Влияние ультразвуковой и лазерной обработок на сопротивление усталости стыковых сварных соединений в воздушной и коррозионных средах // Автомат. сварка. – 1990. – № 11. – С. 13–15.
9. Сопротивление коррозионной усталости сварных соединений, упрочненных высокочастотной механической проковкой / В. В. Кныш, А. З. Кузьменко, И. И. Вальтерис, С. А. Соловей // Автомат. сварка. – 2008. – № 4. – С. 5–8.
10. Повышение сопротивления усталости и коррозионной стойкости сварных соединений ультразвуковой ударной обработкой и электроискровым легированием / Г. И. Прокопенко, Б. Н. Мордюк, В. В. Кныш, С. А. Соловей, Т. В. Попова // Техн. диагностика и неразр. контроль. – 2014. – № 3. – С. 34–40.
11. Effect of ultrasonic impact peening on the corrosion of ferritic-martensitic steels in supercritical water / Z. Dong, Z. Liu, M. Li, J-L. Luo, W. Zeng, D. Guzonas // J. of nuclear mater. – 2015. – 457. – P. 266–272.
12. Daavary M. and Sadough Vanini S. A. Corrosion fatigue enhancement of welded steel pipes by ultrasonic impact treatment // Mater. Letter. – 2015. – 139. – P. 462–466.
13. Enhancement of the fatigue strength of underwater wet welds by grinding and ultrasonic impact treatment / Wenbin Gao, Dongpo Wang, Fangjie Cheng, Caiyan Deng, Yang Liu, Wei Xu // J. of Mater. Proc. Technol. – 2015. – 223. – P. 305–312.
14. ГОСТ 9.908-85. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости. Введ. 01.01.87.
15. Effect of structure evolution induced by ultrasonic peening on the corrosion behavior of AISI-321 stainless steel / B. N. Mordyuk, G. I. Prokopenko, M. A. Vasylyev, M. O. Lefimov // Mater. Sci. and Engng. A. – 2007. – 458. – P. 253–261.
16. Influence of peening on the corrosion properties of AISI 304 stainless steel / Hang-sang Lee, Doo-soo Kim, June-sung Jung, Young-shik Pyoun, Keesam Shin // Corr. Sci. – 2009. – 51. – P. 2826–2830.

Получено 18.01.2016