

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 сварних з'єднань і оцінено її вплив на корозійну стійкість основного металу. Досліджено циклічна довговічність стыкових і таврових сварних з'єднань 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 сварних з'єднань 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, сварне з'єднання, високочастотна механічна проковка, корозійна усталість, корозійна стійкість.*

Для підвищення корозійної усталості і стійкості сварних з'єднань 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 сварних 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: встановлені основні закономірності підвищення циклічної довговічності і межових вимогливості сварних з'єднань в залежності від класу міцності сталі, типу з'єднання, характеристик циклу змінного навантаження; визначені її переваги порівняно з іншими способами ППД металу [6, 7]. Оцінено ефективність упрочнення сварних 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 сварних з'єднань зі сталі 15Г2ФБ. Упрочненню ВМП піддали лінію сплавлення і ЗТВ шириною 10...15 мм. Встановили, що межа обмеженої вимогливості сварних з'єднань 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. Обнаружено [9], що після упрочнення лінії переходу металу шва на метал ЗТВ таврових свар-

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, $V = 26,7$ м/ч; второго (с противоположной стороны): $U = 57$ V, $I = 760...780$ А, $V = 26,7$ м/ч. 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

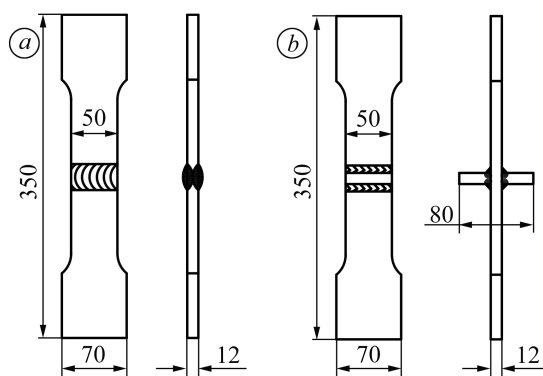


Рис. 1. Форма и геометрические размеры стыкового (*a*) и таврового (*b*) образцов сварных соединений.

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 μ 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 cm^2/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 обезжиривали 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).

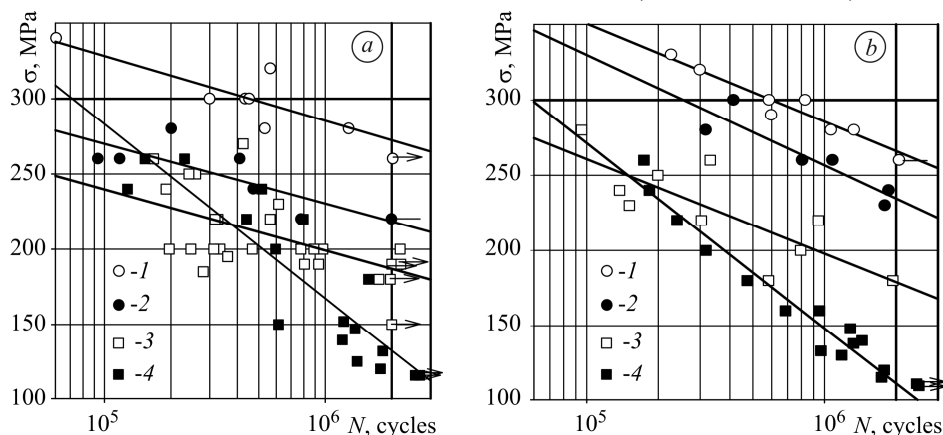


Рис. 2. Кривые усталости стыковых (а) и тавровых (б) сварных соединений стали 15XCHD: 1, 2 – в упрочненном ВМП состоянии на воздухе и в 3% NaCl; 3, 4 – в исходном состоянии на воздухе и в 3% NaCl. $R_\sigma = 0, f = 5$ Hz.

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 μm 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 височастотного 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 высоко-частотной 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