

Повышение сопротивления коррозионной усталости сварных соединений высокочастотной механической проковкой

В. В. Кныш¹, С. А. Соловей, В. И. Кирьян, В. Н. Булаш

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

¹ 2052382@gmail.com

Исследована циклическая долговечность стыковых и тавровых сварных соединений в исходном после сварки состоянии и после упрочнения высокочастотной механической проковкой. Образцы сварных соединений изготавливали из листового проката толщиной 12 мм широко распространенных атмосферостойких сталей 10ХСНД и 15ХСНД. Испытания на усталость проводили на воздухе и в коррозионной среде (в 3%-ном растворе NaCl) при отнулевом переменном растяжении с частотой 5 Гц. Установлено, что применение высокочастотной механической проковки в качестве способа поверхностного пластического деформирования металла соединений вблизи мест локализации усталостных повреждений приводит к увеличению циклической долговечности сварных соединений на воздухе более чем в 10 раз. Подтверждено, что при испытаниях в коррозионной среде пределы ограниченной выносливости сварных соединений как в исходном, так и в упрочненном состоянии уменьшаются. Показано, что в результате упрочнения высокочастотной проковкой существенно повышаются характеристики сопротивления коррозионной усталости стыковых сварных соединений стали 15ХСНД: циклическая долговечность в 4...10 раз в зависимости от уровня прикладываемых напряжений, предел ограниченной выносливости на базе $2 \cdot 10^6$ цикл на 85%. Экспериментально установлено, что упрочнение в 3%-ном растворе NaCl приводит к увеличению циклической долговечности тавровых сварных соединений сталей 15ХСНД и 10ХСНД в 4...10 раз и в 3,5...4 раза соответственно. При этом пределы ограниченной выносливости повышаются на 114 и 80% соответственно. Разрушение большей части упрочненных образцов произошло по основному металлу вдали от линии сплавления, неупрочненные образцы разрушались только в области перехода металла шва на основной металл.

Ключевые слова: сварное соединение, коррозионная среда, усталость, высокочастотная механическая проковка, повышение сопротивления коррозионной усталости.

Введение. Для повышения коррозионной усталости сварных соединений применяются различные послесварочные обработки, позволяющие изменить структуру поверхностного слоя металла, снять остаточные напряжения растяжения и навести остаточные напряжения сжатия, а также уменьшить концентрацию напряжений в месте перехода металла шва на основной металл [1–4]. Известны многочисленные работы, посвященные исследованию эффективности применения высокочастотной механической проковки (ВМП) ударными элементами с использованием энергии ультразвука [5–9]. Показано, что существенное повышение коррозионной стойкости исследуемого сплава Zr–1%Nb после обработки поверхности ВМП обусловлено реализацией всех вышеперечисленных факторов [5]. Установлено, что такая обработка реакторных сталей способствует образованию защитной оксидной пленки на поверхности металла, что приводит к повышению их коррозионной стойкости при температуре окружающей среды 500°C [6]. В [7] показана высокая эффективность обработки сварных соединений, работающих при нагрузках до 85...95% предела текучести материала, в условиях коррозионной среды. Использование ВМП для упрочнения стыкового соединения труб позволило увеличить циклическую долговечность сварных соединений в диапазоне максимальных напряжений 305...345 МПа в 2,0...2,5 раза. Возможность применения ВМП с последующим электроискровым

легированием зоны шва исследована в [8]. Настоящая работа посвящена оценке эффективности применения ВМП для повышения сопротивления коррозионной усталости сварных соединений широко распространенных низколегированных сталей 10ХСНД и 15ХСНД.

Материал и методика исследований. Экспериментальные исследования проводили на образцах стыковых и тавровых сварных соединений низколегированных сталей 10ХСНД ($\sigma_T = 390$ МПа, $\sigma_B = 530$ МПа) и 15ХСНД ($\sigma_T = 400$ МПа, $\sigma_B = 565$ МПа) толщиной 12 мм. Заготовки размерами 600×180 мм (стыковые соединения) и 350×70 мм (тавровые) вырезали из горячекатаного листового проката 12-й категории. Двухстороннюю автоматическую сварку стыковых соединений под флюсом ОР 192 (Oerlikon) осуществляли без разделки кромок проволокой Св-08Г1НМА диаметром 4 мм. После сварки с каждой пластины вырезали по восемь образцов стыковых сварных соединений. Тавровые сварные соединения получали путем приварки ручной дуговой сваркой штучными электродами марки УОНИ 13/55 поперечных ребер жесткости с двух сторон пластины угловыми швами. Корень шва проваривали электродами диаметром 3 мм, шов формировали электродами диаметром 4 мм. Форма и геометрические размеры образцов стыковых и тавровых сварных соединений приведены на рис. 1. Толщина образца обусловлена широкой применимостью в сварных конструкциях проката толщиной 12 мм, ширина его рабочей части выбиралась исходя из мощности испытательного оборудования.

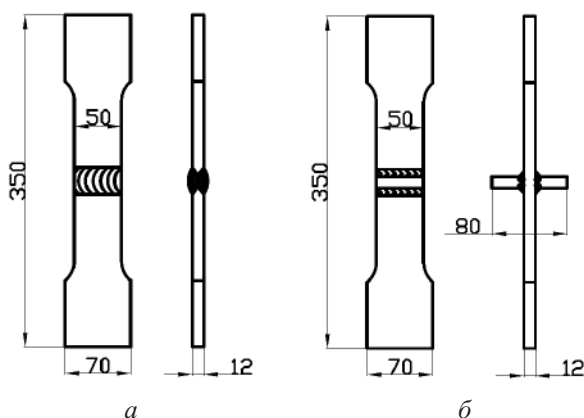


Рис. 1. Форма и геометрические размеры образцов стыковых (а) и тавровых (б) сварных соединений.

Усталостные испытания образцов проводили на машине УРС-20 при одноосном переменном растяжении с асимметрией цикла $R_\sigma = 0$. В качестве критериев завершения испытаний принималось полное разрушение образца и превышение базы испытаний $2 \cdot 10^6$ цикл перемен напряжений.

Испытывали три партии образцов: стыковые сварные соединения стали 15ХСНД; тавровые сварные соединения сталей 10ХСНД и 15ХСНД. В каждую партию входило четыре серии образцов: в исходном состоянии на воздухе; после ВМП на воздухе; в исходном состоянии в коррозионной среде; после ВМП в коррозионной среде.

Упрочнение сварных соединений стали 15ХСНД проводили с помощью компактного ручного оборудования USTREAT-1.0, которое представляет собой ручной ударный инструмент с пьезокерамическим преобразователем, соединенный с ультразвуковым генератором с выходной мощностью 500 Вт. Упрочнение сварных соединений стали 10ХСНД проводили ударным инструментом с магнитострикционным преобразователем мощностью 1,2 кВт. В качестве упрочнителя использовали одно-

рядную четырехбойковую насадку с диаметром бойков 3 мм. Скорость ВМП составляла 1...2 мм/с. При упрочнении соединений ВМП поверхностному пластическому деформированию подвергали узкую область перехода металла шва на основной металл.

В качестве коррозионной среды использовали 3%-ный раствор NaCl, который заливали в специально изготовленную из стали 12Х18Н10Т съемную емкость объемом 1,2 литра после ее монтажа на образец. Данную конструкцию монтировали на образец в ненагруженном состоянии через специальное отверстие в дне приспособления. В дальнейшем зазор между поверхностью образца и емкостью уплотняли резиновой прокладкой специальной конструкции и заливали силиконом, что исключало соприкосновение металла образца с металлом емкости. Внешний вид закрепленной на образце емкости с коррозионной средой представлен на рис 2.

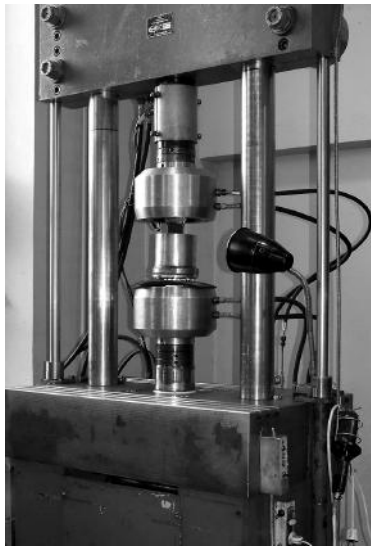


Рис. 2. Образец сварного соединения в машине УРС-20 при испытаниях на коррозионную усталость.

Данная конструкция обеспечивает постоянное нахождение зоны сварного шва и зоны термического влияния в коррозионной среде в процессе приложения нагрузки. Размер рабочей части образца в растворе NaCl составлял 100 мм. После испытания каждого образца коррозионный раствор обновляли.

Результаты исследований и их обсуждение. Результаты усталостных испытаний всех четырех серий образцов стыкового сварного соединения стали 15ХСНД представлены на рис. 3. Анализ кривых усталости 1 и 3 показывает, что применение ВМП в качестве способа поверхностного пластического деформирования металла соединений вблизи мест локализации усталостных повреждений приводит к увеличению циклической долговечности стыковых сварных соединений на воздухе более чем в 10 раз, при этом предел ограниченной выносливости на базе $2 \cdot 10^6$ цикл повышается на 50%. При испытаниях в 3%-ном растворе NaCl предел ограниченной выносливости на базе $2 \cdot 10^6$ цикл необработанных сварных соединений снижается на 30% (с 185 до 130 МПа). Установлено, что в результате упрочнения ВМП существенно повышаются характеристики сопротивления коррозионной усталости стыковых сварных соединений: циклическая долговечность в 4...10 раз в зависимости от уровня прикладываемых напряжений, предел ограниченной выносливости на 85% (с 130 до 240 МПа).

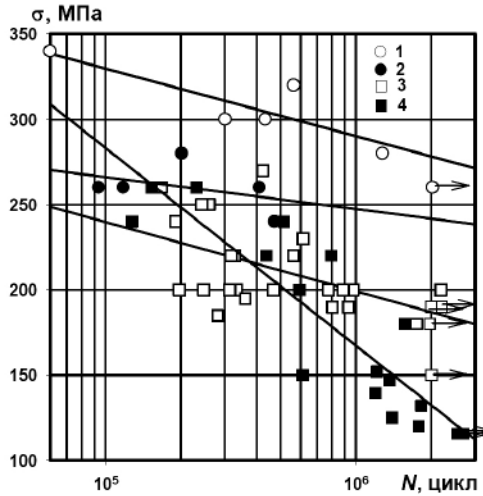


Рис. 3. Кривые усталости стыковых сварных соединений стали 15XCHD. (Здесь и на рис. 4: 1, 2 – упрочнение ВМП на воздухе и в 3%-ном растворе NaCl соответственно; 3, 4 – исходное состояние на воздухе и в 3%-ном растворе NaCl соответственно.)

Результаты усталостных испытаний образцов таврового сварного соединения стали 15XCHD представлены на рис. 4,а. При упрочнении ВМП узкой области перехода металла шва на основной металл повышаются характеристики сопротивления усталости на воздухе: предел ограниченной выносливости на 45%, циклическая долговечность более чем в 10 раз. При испытаниях в 3%-ном растворе NaCl предел ограниченной выносливости необработанных сварных соединений снижается на 40% (с 185 до 110 МПа). Показано, что упрочнение ВМП также значительно (в 4...10 раз) увеличивает циклическую долговечность в коррозионной среде в зависимости от уровня прикладываемых напряжений, при этом предел ограниченной выносливости повышается на 114% (с 110 до 235 МПа). Разрушение большей части упрочненных образцов в коррозионной среде произошло по основному металлу вдали от линии сплавления.

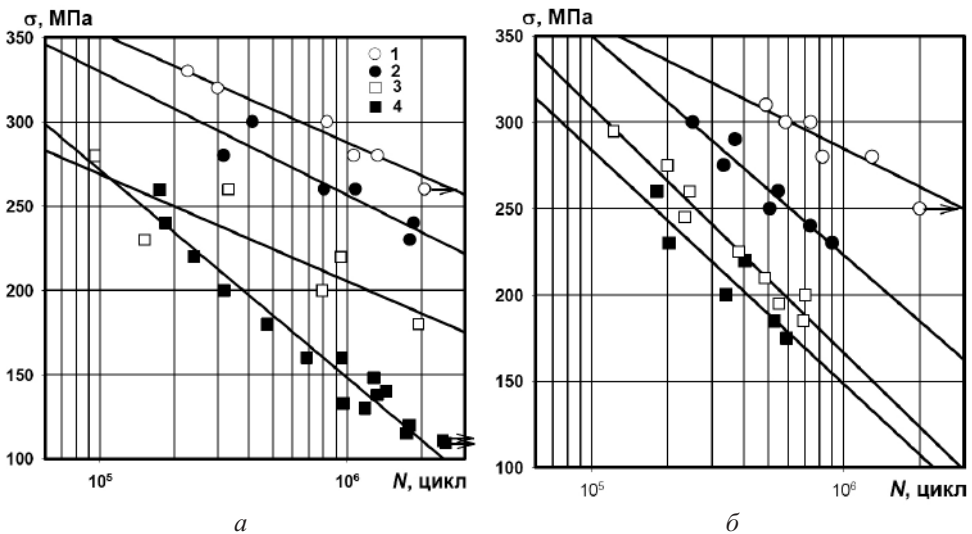


Рис. 4. Кривые усталости тавровых сварных соединений сталей 15XCHD (а) и 10XCHD (б).

Результаты усталостных испытаний образцов таврового сварного соединения стали 10ХСНД представлены на рис. 4,б. Обработка ВМП привела к увеличению их циклической долговечности на воздухе в 8...10 раз, при этом предел ограниченной выносливости повысился на 108% (с 125 до 260 МПа). При испытаниях в 3%-ном растворе NaCl предел ограниченной выносливости необработанных сварных соединений снизился на 15%. Упрочнение ВМП существенно повышает характеристики сопротивления коррозионной усталости: циклическую долговечность в 3,5...4 раза в зависимости от уровня прикладываемых напряжений, предел ограниченной выносливости на 80% (с 105 до 185 МПа). Упрочненные образцы в коррозионной среде разрушались по основному металлу вдали от линии сплавления (рис. 5).

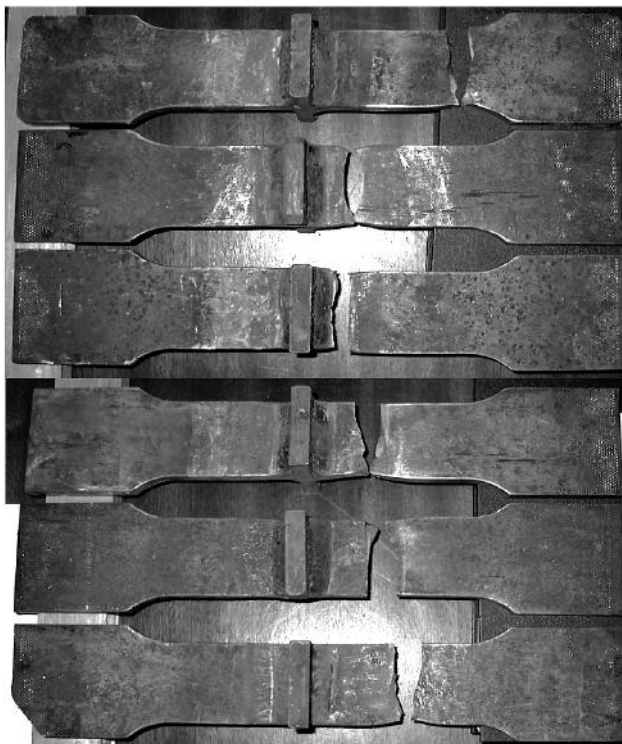


Рис. 5. Общий вид разрушенных образцов таврового сварного соединения стали 10ХСНД после испытаний на усталость в коррозионной среде.

Основываясь на анализе известных данных, такое повышение предела ограниченной выносливости сварных соединений после обработки ВМП обусловлено наведением напряжений сжатия и изменением структуры в поверхностном слое металла, что способствует увеличению долговечности до зарождения трещины усталости, а также торможению развития зародившихся микроскопических трещин.

Таким образом, экспериментально полученные кривые усталости стыковых и тавровых сварных соединений низколегированных сталей свидетельствуют о высокой эффективности поверхностного упрочнения ВМП зон концентраторов напряжений с целью повышения характеристик сопротивления коррозионной усталости.

Выводы

1. Установлено, что упрочнение ВМП существенно повышает характеристики сопротивления усталости сварных соединений низколегированных сталей на воздухе.

Циклическая долговечность стыковых сварных соединений стали 15ХСНД и тавровых сварных соединений сталей 15ХСНД и 10ХСНД увеличивается в 8...10 раз, пределы ограниченной выносливости на базе $2 \cdot 10^6$ цикл – на 50, 45 и 108% соответственно.

2. Показана высокая эффективность применения ВМП с целью повышения сопротивления коррозионной усталости в 3%-ном растворе NaCl. Упрочнение ВМП приводит к увеличению циклической долговечности стыковых и тавровых сварных соединений стали 15ХСНД в 4...10 раз в зависимости от уровня прикладываемых напряжений, а тавровых сварных соединений стали 10ХСНД – в 3,5...4 раза, при этом пределы ограниченной выносливости повышаются на 85, 114 и 80% соответственно.

Резюме

Досліджено циклічну довговічність стикових і таврових зварних з'єднань у вихідному після зварювання стані та після зміцнення високочастотним механічним проковуванням. Зразки зварних з'єднань виготовляли з листового прокату товщиною 12 мм широко розповсюджених атмосферостійких сталей 10ХСНД і 15ХСНД. Випробування на утому проводили на повітрі та в корозійному середовищі (у 3%-ному розчині NaCl) при віднульовому змінному розтязі з частотою 5 Гц. Установлено, що використання високочастотного механічного проковування як способу поверхневого пластичного деформування металу з'єднань поблизу місць локалізації утомних пошкоджень призводить до збільшення циклічної довговічності зварних з'єднань на повітрі більш ніж у 10 разів. Підтверджено, що при випробуваннях у 3%-ному розчині NaCl границя обмеженої витривалості зварних з'єднань як у вихідному, так і у зміцненому стані зменшується. Показано, що в результаті зміцнення високочастотним проковуванням суттєво підвищуються характеристики опору корозійній утомі стикових зварних з'єднань сталі 15ХСНД: циклічна довговічність в 4...10 разів залежно від рівня прикладених напружень, границя обмеженої витривалості на базі $2 \cdot 10^6$ цикл на 85%. Експериментально встановлено, що зміцнення в 3%-ному розчині NaCl призводить до збільшення циклічної довговічності таврових зварних з'єднань сталей 15ХСНД і 10ХСНД в 4...10 разів та в 3,5...4 рази відповідно. При цьому границя обмеженої витривалості підвищується на 114 і 80% відповідно. Руйнування більшої частини зміцнених зразків відбулося по основному металу віддалік від лінії сплавлення, а незміцнені зразки руйнувалися лише в області переходу металу шва на основний метал.

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. Коломийцев Е. В. Коррозионно-усталостная прочность тавровых соединений стали 12X18H10T и методы ее повышения. *Автомат. сварка*. 2012. № 12. С. 41–43.
3. 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. Fatigue*. 2008. **30**, No. 3. P. 453–462.
4. Mhaede M. Influence of surface treatments on surface layer properties, fatigue and corrosion performance of AA7075 T73. *Mater. Design*. 2012. **41**. P. 61–66.
5. Mordyuk B. N., Karasevskaya O. P., Prokopenko G. I., and Khripta N. I. Ultrafine-grained textured surface layer on Zr–1%Nb alloy produced by ultrasonic impact peening for enhanced corrosion resistance. *Surf. Coat. Tech.* 2012. **210**. P. 54–61.

6. Dong Z., Liu Z., Li M., et al. Effect of ultrasonic impact peening on the corrosion of ferritic-martensitic steels in supercritical water. *J. Nucl. Mater.* 2015. **457**. P. 266–272.
7. Daavary M. and Sadough Vanini S. A. Corrosion fatigue enhancement of welded steel pipes by ultrasonic impact treatment. *Mater. Lett.* 2015. **139**. P. 462–466.
8. Прокопенко Г. И., Мордюк Б. Н., Кныш В. В. и др. Повышение сопротивления усталости и коррозионной стойкости сварных соединений ультразвуковой ударной обработкой и электроискровым легированием. *Техн. диагностика и неразрушающий контроль*. 2014. № 3. С. 34–40.
9. Degtyarev V. A. Procedure of evaluation of endurance limit for welded joints with different width after high-frequency mechanical peening. *Strength Mater.* 2015. **47**, No. 4. P. 595–601.

Поступила 06. 04. 2016