

## СОПРОТИВЛЕНИЕ КОРРОЗИОННОЙ УСТАЛОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, УПРОЧНЕННЫХ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОКОВКОЙ

В. В. КНЫШ, канд. физ.-мат. наук, И. И. ВАЛЬТЕРИС, А. З. КУЗЬМЕНКО, С. А. СОЛОВЕЙ, инженеры  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Приведены результаты исследования влияния коррозионной среды на снижение сопротивления усталости неупрочненных и упрочненных высокочастотной механической проковкой (ВМП) тавровых сварных соединений стали 10ХСНД. Экспериментально установлена высокая эффективность применения технологии ВМП в качестве способа поверхностного пластического деформирования металла вблизи мест локализации усталостных повреждений с целью повышения коррозионной усталости. Так, применение технологии ВМП в 3,5 раза повышает циклическую долговечность тавровых сварных соединений в коррозионной среде и на 80 % предел выносливости.

*Ключевые слова:* дуговая сварка, металлоконструкции, сварные соединения, коррозионная среда, циклическая нагрузка, усталость, высокочастотная механическая проковка, повышение долговечности

Коррозия является наиболее распространенным типом повреждений сварных соединений в таких металлоконструкциях, как мосты, морские стационарные платформы, корпуса судов и др. [1, 2]. В то же время эти конструкции эксплуатируются в условиях воздействия переменных нагрузок, поэтому основным механизмом их эксплуатационных повреждений является коррозионная усталость. Совместное влияние в условиях переменного нагружения таких повреждающих факторов, как коррозионная среда, высокие уровни концентрации напряжений и растягивающих остаточных сварочных напряжений в локальных зонах соединений [1], приводит к тому, что коррозионно-усталостный механизм повреждений является наиболее опасным и существенно повышающим скорость разрушения сварных элементов конструкции. Для обеспечения требуемой долговечности соединений, эксплуатируемых в условиях коррозионной усталости, как правило, применяются дополнительные послесварочные обработки [3–5], направленные на перераспределение растягивающих остаточных напряжений, снижение коэффициента концентрации напряжений, наведение благоприятных остаточных напряжений сжатия, устранение поверхностных микротрещин в зонах сварных швов. Однако приведенные в работах [3, 4] экспериментальные данные не дают однозначного ответа относительно эффективности предлагаемых обработок. Так, в работе [3] экспериментально установлено, что упрочнение металла взрывом в местах геометрических концентраторов несущественно влияет на

циклическую долговечность сварных образцов в морской воде. В то же время авторы работы [3], используя усталостные испытания на воздухе, подтверждающие высокую эффективность обработки взрывом, и коэффициент снижения циклической долговечности в морской воде в 1,6...1,8 раза, представляют данную обработку как достаточно перспективную технологию повышения эксплуатационной надежности гидротехнических сооружений. В работе [4] для снижения остаточных напряжений с целью повышения сопротивления коррозионной усталости сварных конструкций используют низкочастотную виброобработку. При этом указывается и главный недостаток данной технологии — одновременное снижение циклической долговечности конструкции, имеющей оставшиеся незамеченными при контроле внутренние дефекты. В работе [5] при испытании на усталость тавровых сварных соединений в морской воде показано, что при дробеструйном поверхностном упрочнении в зонах концентраторов коррозионно-усталостная долговечность соединений повышается в 2...3 раза. Усталостные трещины в образцах как в исходном состоянии, так и после упрочнения возникали в зоне перехода наплавленного металла в основной. Установленные в работе [5] показатели повышения коррозионно-усталостной долговечности соединений указывают на высокую эффективность применения способов поверхностного пластического деформирования металла соединений вблизи мест локализации усталостных повреждений для повышения ресурса металлоконструкций.

В последние годы с целью повышения циклической долговечности сварных элементов широкое применение находит технология высокочастотной механической проковки (ВМП) металла

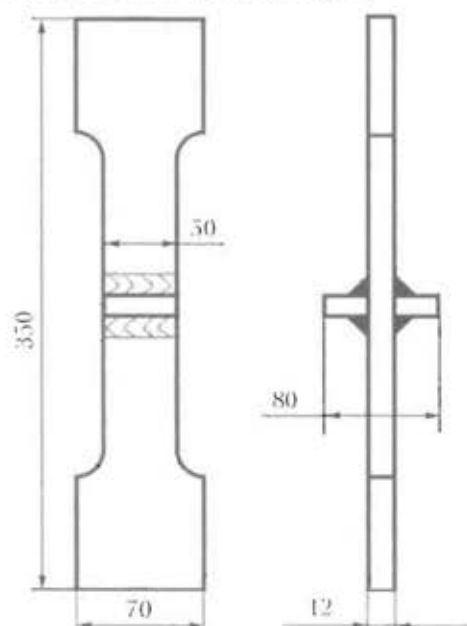


Рис. 1. Схема образца таврового соединения стали 10ХСНД сварного соединения в зонах концентраторов напряжений, которая использует энергию ультразвука [6–8]. Можно ожидать, что ультразвуковая технология ВМП в сравнении с другими известными способами поверхностного пластического деформирования металла (обработка взрывом, пневмопроковка, обкатка роликом, наклеп дробью и пр.) окажется наиболее эффективной для повышения сопротивления коррозионной усталости сварных



Рис. 2. Образец таврового сварного соединения стали 10ХСНД в процессе испытания в коррозионной среде

соединений. Это предположение основано на том, что при использовании ультразвуковой технологии ВМП для упрочнения зоны перехода угловых швов к основному металлу в тавровых соединениях стали Ст.3сп на глубине до 10...20 мкм в зоне обработки образуются вытянутые в одном направлении зерна, поперечный размер которых составляет 100 нм и менее. При этом электронная дифракция подчеркивает кристаллический характер структуры [9]. Следовательно, в зоне наклепа ультразвуковой технологией ВМП на глубине до 20 мкм формируется наноструктура металла, что может оказать существенное влияние на повышение сопротивления коррозионной усталости упрочненных соединений.

В данной работе исследовано влияние коррозионной среды на снижение сопротивления усталости неупрочненных и упрочненных технологией ВМП сварных соединений с угловыми швами.

Оценку влияния коррозионной среды проводили на образцах тавровых соединений стали 10ХСНД ( $\sigma_r = 390$  МПа,  $\sigma_b = 530$  МПа) (рис. 1). Призматические образцы из этой стали размерами 350×70×12 мм вырезали из листового проката таким образом, чтобы длинная сторона была ориентирована вдоль проката. Поперечные ребра приваривали угловыми швами с двух сторон ручной электродуговой сваркой. При упрочнении соединений технологией ВМП поверхностному пластическому деформированию подвергалась узкая зона перехода металла шва к основному металлу. Усталостные испытания четырех серий образцов проводили на испытательной машине УРС 20 при одноосном переменном растяжении с асимметрией цикла  $R_\sigma = 0$ . Образцы первой и второй серий испытывали в исходном состоянии после сварки соответственно на воздухе и в коррозионной среде, образцы третьей и четвертой серий после сварки подвергали ВМП и испытывали также на воздухе и в коррозионной среде. Все образцы испытывали до полного разрушения.

В качестве коррозионной среды использовали 3%-й раствор NaCl, который заливали в специально оборудованную на головке для зажима образца смкость, представляющую собой пластмассовую ванну объемом 4 л. Внешний вид закрепленной на образце ванночки в процессе испытаний представлен на рис. 2. Данная конструкция обеспечивала постоянство пребывания всех четырех с угловыми швами и ЗТВ соединений в коррозионной среде в процессе приложения нагрузки. Длина средней части погруженного в раствор NaCl образца составляла 120 мм. Монтаж данной конструкции осуществляли на образец в ненагруженном состоянии через специальное отверстие в дне приспособления. В дальнейшем зазор между поверхностью образца и ванночки уплотняли составной фторопластовой прокладкой специальной



Рис. 3. Усталостные изломы неупрочненного (а) и упрочненного (б) образцов таврового сварного соединения стали 10XCHD, испытанных в коррозионной среде

конструкции и заливали клеем, что не допускало механического повреждения образцов и утечки коррозионного раствора. После испытания каждого образца коррозионный раствор обновляли.

Характер усталостных разрушений необработанных и упрочненных технологией ВМП соединений оказался различным. В необработанных соединениях трещины зарождались в местах перехода шва на основной металл в зоне максимальных растягивающих напряжений (по центру образца) (рис. 3, а). В коррозионной среде в упрочненных технологией ВМП соединениях трещины зарождались вдали от зоны сплавления у кромок рабочей части образца (рис. 3, б, рис. 4). Аналогичный характер разрушений наблюдался и в упрочненных образцах, испытанных на воздухе.

Результаты усталостных испытаний всех четырех серий образцов представлены на рис. 5. Из кривых усталости 1 и 3 следует, что применение ультразвуковой технологии ВМП в качестве способа поверхностного пластического деформирования металла соединений вблизи мест локализации усталостных повреждений в 3,5 раза повышает коррозионную долговечность. При этом коррозионная долговечность упрочненных соединений увеличивается в 2,5 раза по сравнению с неупрочненными соединениями, испытанными на воздухе (кривые 2 и 4). Предел выносливости упрочненных соединений, отвечающий базе  $2 \cdot 10^6$  циклов в коррозионной среде, повышается на 80 % по сравнению с неупрочненными соединениями. Это может быть вызвано тем, что напряжения сжатия, наводимые в поверхностном слое при упрочнении, не только увеличивают стадию образования усталостных трещин, но и способствуют закрытию зародившихся микроскопических трещин и выдавливанию из них корро-

зионного раствора. Последний снижает циклическую долговечность упрочненных соединений в 2...4 раза в зависимости от уровня приложенных напряжений, а предел выносливости на базе  $2 \cdot 10^6$  циклов — на 30 % (кривые 3 и 4). Циклическая долговечность образцов в исходном состоянии после сварки, испытанных в коррозионной среде, уменьшается в 1,4 раза, а предел выносливости — на 15 % (кривые 1 и 2). Такое различие неупрочненных и упрочненных соединений, испытанных на воздухе и в коррозионной среде, объясняется тем, что все упрочненные образцы разрушились вдали от зоны сплавления по основному металлу. В этом случае экспериментальные данные (кривые 3, 4 на рис. 5) фактически пред-

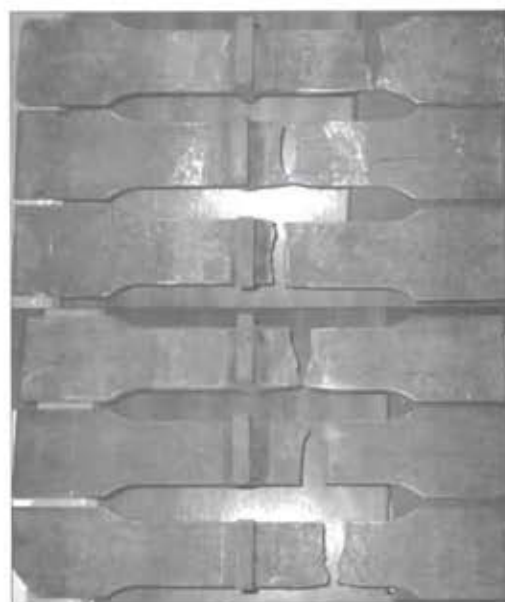


Рис. 4. Общий вид упрочненных образцов таврового сварного соединения стали 10XCHD, разрушенных после испытаний на усталость в коррозионной среде

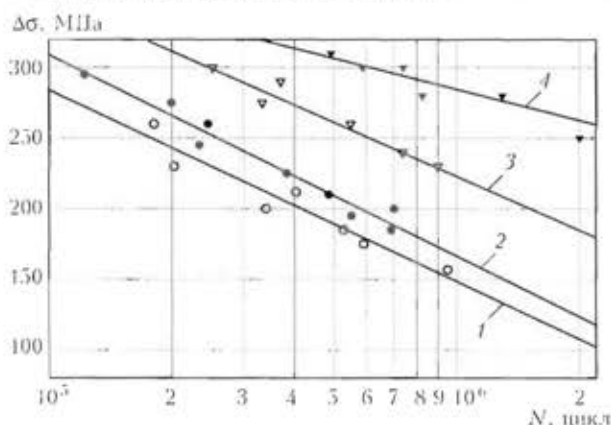


Рис. 5. Кривые усталости тавровых сварных соединений низколегированной стали 10ХСНД: 1, 2 — в исходном состоянии после сварки соответственно в коррозионной среде и на воздухе; 3, 4 — после упрочнения технологией ВМП соответственно в коррозионной среде и на воздухе

тавляют собой кривые усталости основного металла (сталь 10ХСНД) на воздухе и в коррозионной среде.

Таким образом, экспериментально установленные кривые усталости соединений подтверждают высокую эффективность применения поверхностного упрочнения ультразвуковой технологией ВМП зон концентраторов напряжений для повышения коррозионной усталости тавровых сварных соединений.

**Выводы**

1. Ультразвуковая технология ВМП повышает сопротивление усталости тавровых сварных соединений стали 10ХСНД до уровня основного металла как на воздухе, так и в коррозионной среде.
2. Циклическая долговечность образцов тавровых соединений стали 10ХСНД в исходном состоянии после сварки, испытанных в коррозионной среде, уменьшается в 1,4 раза, а предел выносливости на базе  $2 \cdot 10^6$  циклов — на 15 % независимо от уровня приложенных напряжений.
3. Применение ультразвуковой технологии ВМП в качестве способа поверхностного пла-

тического деформирования металла вблизи мест локализации усталостных повреждений в 3,5 раза повышает циклическую долговечность тавровых сварных соединений стали 10ХСНД в коррозионной среде.

4. Коррозионная среда снижает предел выносливости упрочненных ультразвуковой технологией ВМП тавровых соединений стали 10ХСНД на базе  $2 \cdot 10^6$  циклов с 260 до 185 МПа, однако это на 80 % выше предела выносливости соединений в исходном состоянии после сварки, испытанных в коррозионной среде (10<sup>5</sup> МПа).

1. Сварка в машиностроении: Справочник: В 4 т. / Под ред. В. А. Винокурова. — М.: Машиностроение, 1979. — Т. 3. — 567 с.
2. Характерные повреждения сварных металлических конструкций мостов / В. А. Ковтуненко, А. Г. Синюк, А. М. Герасименко, В. А. Задорожный // Автомат. сварка. — 2005. — № 10. — С. 29–34.
3. Титов В. А., Петушков В. Г. Влияние обработки взрывом на коррозионно-механическую прочность сварных соединений // Там же. — 2001. — № 2. — С. 55–57.
4. Зимницкий Ю. А., Хвалынский В. И. Экспериментальная проверка влияния низкочастотной виброобработки на эксплуатационную надежность корпусных конструкций // Судостроение. — 2004. — № 1. — С. 50–52.
5. Горбач В. Д., Михайлов В. С. Поверхностное упрочнение сварных соединений с целью повышения коррозионно-усталостной долговечности судовых конструкций // Там же. — 2000. — № 4. — С. 45–48.
6. Пат. України 60390. Спосіб обробки зварних з'єднань металоконструкцій високочастотною проковкою / Л. М. Лобанов, П. П. Міхеев, В. В. Книш та ін. — Бюл. № 10; Опубл. 15.10.2003.
7. Повышение сопротивления усталости сварных соединений металлоконструкций высокочастотной механической проковкой (Обзор) / Л. М. Лобанов, В. И. Кирьян, В. В. Книш, Г. И. Прокопенко // Автомат. сварка. — 2006. — № 9. — С. 3–11.
8. Лобанов Л. М., Кир'ян В. І., Книш В. В. Підвищення ресурсу зварних металоконструкцій високочастотною механічною проковкою // Фіз.-хім. механіка матеріалів. — 2006. — № 1. — С. 56–61.
9. Структура переходной зоны сварного соединения обычной углеродистой стали после высокочастотной механической проковки / Г. И. Прокопенко, В. В. Книш, А. З. Кузьменко, О. В. Войтенко // Тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. «Динамика, прочность и ресурс машин и конструкций». — Киев, 2005. — Т. 2. — С. 288–289.

The paper gives the results of investigation of the influence of corroding medium on lowering of fatigue resistance of tee welded joints on 10KhSND steel unstrengthened and strengthened by high-frequency mechanical peening. The high effectiveness of application of HFMP technology as a method of surface plastic deformation of metal near the areas of fatigue damage localization to improve corrosion fatigue was established experimentally. Application of HFMP technology improves the cyclic fatigue life of tee welded joints in a corroding environment 3.5 times and the endurance limit by 80 %.

Поступила в редакцию 13.09.2007