

УДК 621.791.052:[620.193.2:539.43]

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ И СОПРОТИВЛЕНИЯ КОРРОЗИОННОЙ УСТАЛОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ (ОБЗОР)

С. А. СОЛОВЕЙ

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Для повышения надежности эксплуатации изделий и сварных конструкций в условиях влияния коррозионных сред применяются методы поверхностного пластического деформирования металла, которые придают упрочненному слою физико-механические свойства, отличные от основного металла. Технический прогресс способствует не только разработке новых методов поверхностного пластического деформирования (например, оплавление поверхности нанопульсирующим лазером), но и постоянному усовершенствованию традиционных методов (дробеструйная обработка, обработка давлением и др.), эффективность которых доказана на практике. Цель настоящего обзора – оценить современное состояние использования методов поверхностного пластического деформирования для повышения сопротивления коррозионной усталости и стойкости сталей и сварных соединений. Анализ литературных данных показал, что экспериментальные исследования последних лет посвящены преимущественно установлению эффективности упрочнения данными методами нержавеющей сталей и их соединений для последующего применения в таких областях, как медицина (имплантаты), атомная энергетика (реакторы), судостроение. Для обработки сварных металлоконструкций наиболее перспективной является ультразвуковая ударная обработка благодаря компактности и мобильности оборудования, экологичности технологического процесса, высокой эффективности, возможности проводить упрочнение сварных соединений в любых пространственных положениях в полевых условиях. Библиогр. 37, рис. 4.

Ключевые слова: сварное соединение, коррозия, поверхностное пластическое деформирование, ультразвуковая ударная обработка, коррозионная усталость, коррозионная стойкость

Долговечность значительной части сварных металлоконструкций (мосты, путепроводы, морские стационарные платформы, антенно-мачтовые сооружения, краны, рамы тележек подвижного железнодорожного состава и т. п.) определяется сопротивлением усталости их сварных узлов и элементов. Коррозионное воздействие от внешней среды приводит к снижению характеристик сопротивления усталости основного металла и сварных соединений, а, следовательно, способствует преждевременному коррозионно-усталостному разрушению. Для повышения надежности эксплуатации изделий и конструкций внедряются передовые технологии сварки, применяются новые сварочные материалы, используются современные покрытия и т. д. Применение этих мер, как правило, недостаточно для существенного увеличения срока их службы, поэтому на практике для повышения характеристик сопротивления усталости основного металла и сварных соединений при воздействии коррозионных сред применяют различные методы поверхностного пластического деформирования (ППД) металла. Хорошо зарекомендовали себя такие методы ППД, как дробеструйная обработка, обкатка шариками и роликами, обработка пневмомолотом, гидродро-

беструйная обработка, инерционно-динамическое упрочнение, обработка взрывом и др. Несмотря на значительный объем публикаций по установлению эффективности применения методов ППД и опыт их использования на практике [1–4], мировые научные центры продолжают проводить исследования по данной тематике. Это связано с тем, что постоянное усовершенствование технологий (оборудования, расходных материалов) и материалов, которые поддаются упрочнению, расширяет сферы применения методов ППД.

Повышение коррозионной стойкости и сопротивления коррозионной усталости металлов и сплавов методами ППД. Многолетними исследованиями установлено, что методы ППД способствуют изменению структуры поверхностного слоя металла, повышению твердости и износостойкости, наведению остаточных напряжений сжатия, повышению сопротивления коррозионной усталости, изменению шероховатости поверхности. Публикации последних лет посвящены как исследованию эффективности применения традиционных методов ППД (дробеструйная обработка, шлифование и обработка пневмомолотом) в зависимости от технологичных параметров упрочнения поверхности, так и исследованию достаточно новых технологий (например, оплавление поверхности нанопульсирующим лазером или пульсиру-

ющим электронным лучом высокой мощности) [5–17].

В работах [6–9] приведены результаты исследований дробеструйной обработки (ДО) поверхности образцов основного металла из нержавеющей стали для повышения их коррозионной стойкости. Приведены результаты исследований коррозионной стойкости упрочненных образцов в зависимости от технологических параметров обработки: типа дроби (стальная, керамическая) и размера дроби (от 125 до 850 мкм), рабочего давления воздуха, времени обработки, количества обработок поверхности (одна или две) и интенсивности обработки. Установлено, что ДО способствует повышению твердости и износостойкости поверхности образцов, но, как правило, приводит к снижению коррозионной стойкости нержавеющей стали. Это связано с увеличением эффективной площади поверхности коррозионно-механического уноса материала вследствие увеличения шероховатости поверхности после ДО. С целью повышения коррозионной стойкости основного металла предлагается применять дополнительные меры для пассивации поверхности: нанесение тонкой гидроксиапатитной пленки, азотирование, шлифование на глубину 10...15 мкм. Показано, что применение ДО приводит к повышению сопротивления коррозионной усталости. В работе [6] установлено, что граница ограниченной выносливости на базе $2 \cdot 10^7$ циклов перемен напряжений образцов стали AISI316L в растворе Рингера после ДО на 4 % ниже, чем после обжатия (деформирования) в горячем состоянии, но на 55 % выше, чем в исходном состоянии (рис. 1). Нанесение гидроксиапатитной пленки дополнительно повышает границу ограниченной выносливости образцов в растворе Рингера после ДО на 4,4 %, а после деформирования в горячем состоянии — на 6,3 %.

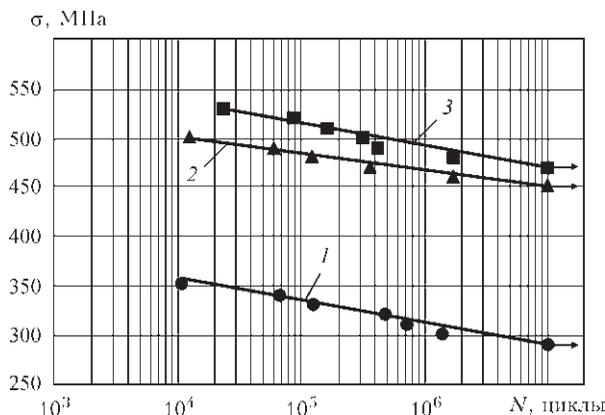


Рис. 1. Кривые усталости образцов стали AISI316L в растворе Рингера: 1 — в исходном состоянии; 2 — после упрочнения дробеструйной обработкой; 3 — после обжатия (деформирования) в горячем состоянии [6]

В работах [9–11] приведены данные коррозионной стойкости образцов нержавеющей стали после применения технологии высокочастотной механической проковки (ВМП), известной в зарубежной литературе как ультразвуковая ударная обработка (УУО). Установлено, что УУО способствует повышению их коррозионной стойкости вследствие структурных изменений поверхностного слоя металла, увеличения микротвердости и формирования равномерной обогащенной хромом оксидной пленки. Показано, что в результате УУО стали AISI321 в тонком поверхностном слое металла происходит измельчение структуры до наноразмеров: по мере углубления до 30 мкм от обрабатываемой поверхности размер зерен постепенно увеличивается с 10 до 60 нм. Отмечается, что несмотря на более существенное увеличение мартенсита после УУО, а, следовательно, и увеличение гальванического эффекта между аустенитом и мартенситом в нержавеющей сталях, сопротивление общей и локализованной коррозии образцов после УУО выше в сравнении с основным металлом и образцами, упрочненными ДО.

В работе [12] исследована эффективность применения поверхностной механической притирки (ПМП) для повышения коррозионной стойкости образцов нержавеющей стали AISI304 в зависимости от таких технологических параметров обработки, как диаметр шариков (2, 5 и 8 мм) и время обработки (15, 30 и 45 мин). Технология ПМП представляет собой механическую обработку поверхности стальными шариками на протяжении заданного времени в специальной вакуумной камере, установленной на вибрирующем столе. Показано, что шероховатость поверхности образцов после ПМП увеличивается с увеличением диаметра применяемых шариков и практически не зависит от времени обработки. Установлено, что только при обработке шариками диаметром 2 мм коррозионная стойкость упрочненных ПМП образцов в растворе NaCl незначительно превышает стойкость неупрочненных образцов.

В работе [13] приведены результаты экспериментальных исследований эффективности применения ударной обработки кварцевой дробью (по сути пескоструйной обработки) и полирования для повышения коррозионной стойкости образцов широко распространенной в медицине нержавеющей стали AISI316LVM. Показано, что более высокую коррозионную стойкость имеют образцы после полирования и пассивации поверхности выдержкой на протяжении 60 мин в 20%-м растворе NH_3 . Установлено, что, несмотря на максимальную шероховатость, коррозионная стойкость образцов после обработки кварцевой дробью на протяжении 120 с и последующей пассивации по-

верхности практически не уступает образцам после полирования и пассивации. Высокая шероховатость и коррозионная стойкость делают данную обработку перспективной для использования в медицине с целью повышения коррозионной стойкости имплантатов из стали AISI316LVM.

В работах [14, 15] исследовано влияние пластического деформирования (обработка давлением) на коррозионную стойкость нержавеющей сталей. Установлено, что с увеличением степени деформирования (уменьшение толщины) проката от 17 до 47 % увеличивается твердость, повышаются предел текучести и коррозионная стойкость. Авторами работы [15] показано, что при изготовлении труб по общепринятой технологии (горячекатаный прокат, степень деформирования 68 %) скорость питтинговой коррозии в 3...4 раза выше, чем после предлагаемой технологии упрочнения (холоднокатаный прокат, степень деформирования 75...78 %). Указано на недостатки нормативного документа ASTM G-48, который регламентирует проведение испытаний на сопротивление питтинговой коррозии при температуре 40 °С. Показано, что повышение температуры с 40 до 50 °С увеличивает скорость коррозии в сотни раз. Отмечается, что последующая пескоструйная обработка не приводит к изменению механических свойств, однако существенно снижает коррозионную стойкость материала вследствие увеличения шероховатости поверхности.

В работе [16] исследована эффективность применения оплавления поверхности стали AISI304L нанопульсирующим лазером. Установлено, что данная обработка приводит к увеличению шероховатости поверхности (из-за выбросов расплавленного металла от пульсирующего лазера), формированию оксидной пленки с высоким содержанием хрома, замещению мартенсита δ -железом и вытравливанию зерен навстречу поверхности обработки. Перечисленные выше изменения в поверхностном слое металла способствуют повышению коррозионной стойкости.

В работе [17] исследовано применение пульсирующего электронного луча высокой мощности (ПЭЛВМ) с целью повышения коррозионной стойкости и износостойкости стали FV520B (содержание хрома 13,0...14,5 %). Параметры оборудования для ПЭЛВМ: напряжение 27 кВ, максимальный ток до 10 кА, время импульса 2,5 мкс. Показано, что с увеличением количества импульсов от 1 до 25 средний размер зерна в поверхностном слое металла не превышает 2 мкм, однако толщина данного слоя всего 4 мкм. После обработки 25-ю импульсами происходит существенное снижение скорости коррозии, а износостойкость повышается до трех раз.

Повышение коррозионной стойкости и сопротивления коррозионной усталости сварных соединений металлоконструкций методами ППД. Применение достаточно новых методов ППД (пульсирующего электронного луча высокой мощности и оплавление поверхности нанопульсирующим лазером) на данном этапе их развития невозможно для обработки сварных соединений инженерных металлоконструкций. При упрочнении конструкций предпочтение отдается методам ППД, которые позволяют обрабатывать сварные элементы сложной геометрической формы, проводить обработку протяженных сварных швов, а также монтажных швов в полевых условиях. Наиболее эффективными из них являются методы, которые обеспечивают максимальное уменьшение концентрации напряжений в местах перехода с металла шва на основной металл, существенную релаксацию остаточных сварочных напряжений растяжения и наведение остаточных напряжений сжатия: шлифование, ДО, обработка пневмомолотом и УУО.

В работах [18, 19] приведены экспериментальные данные по повышению характеристик сопротивления усталости сварных соединений шлифованием линии сплавления на воздухе и под водой, соответственно. Авторами работы [18] установлено, что шлифование линии сплавления повышает предел ограниченной выносливости сварных соединений из нержавеющей сталей на базе 10^7 циклов перемен напряжений на 109 % (с 110 до 230 МПа) и 63 % (с 86 до 140 МПа), соответственно на воздухе и в 3%-м растворе NaCl. При этом циклическая долговечность сварных соединений увеличивается на воздухе до 50 раз, а в коррозионной среде до 10 раз. В работе [19] показано, что предел ограниченной выносливости сварных соединений низколегированной стали на базе $2 \cdot 10^6$ циклов перемен напряжений после обработки линии сплавления шлифованием повышается на 20 %, после УУО — на 35 %, а после шлифования с последующей УУО — на 61 %. Отмечается, что уровень наведенных остаточных напряжений сжатия после УУО в 3 раза выше, чем после шлифования.

В работах [20, 21] рассмотрена эффективность применения ДО для повышения сопротивления стыковых сварных соединений нержавеющей сталей питтинговой коррозии и коррозионному растрескиванию под напряжением, соответственно. В работе [20] сварные соединения изготавливали как электродуговой сваркой (ЭДС), так и лазерной сваркой (ЛС). Испытания на коррозионную стойкость проводили в камере соляного тумана (5%-й раствор NaCl) с периодическим осмотром после 24, 48, 72, 120, 240, 480, 720 и 1000 ч.

Показано, что в соединениях, полученных ЭДС, питтинговая коррозия наиболее интенсивно протекает в зоне термического влияния (ЗТВ), глубина питтингов достигает 20...40 мкм. После упрочнения ДО глубина питтингов не превышает 5...10 мкм. В соединениях, полученных ЛС, питтинги образовывались вдоль линии сплавления, достигая в глубину 30 мкм. После применения ДО питтинги не обнаружены даже при 1000 ч выдержки в 5%-м растворе NaCl, т. е. была достигнута полная защита от коррозии (R_p) по PN-EN ISO 10289:2002. В работе [21] стойкость к коррозионному растрескиванию под напряжением образцов, полученных плазменной сваркой, оценивали по коэффициенту чувствительности сварных соединений к коррозии на основе сопоставления площадей диаграмм растяжения образцов (по значению затраченной работы) на воздухе и в 3,5%-м растворе NaCl. Установлено, что самую высокую стойкость имеют сварные соединения после обработки дробью с давлением воздуха 0,4 МПа. Показано, что с уменьшением или увеличением давления воздуха коррозионная стойкость соединений ухудшается.

В работе [22] предлагается повышать характеристики сопротивления коррозионной усталости тавровых сварных соединений стали 12X18H10T, используя пневмомолот с шарико-стержневым упрочнителем (ШСУ). Установлено, что при упрочнении сварного шва и ЗТВ шириной до 15 мм повышается предел ограниченной выносливости сварных соединений на базе 10^7 циклов перемен напряжений на 25 и 27 %, соответственно на воздухе и в синтетической морской воде. Показано, что морская вода снижает предел ограниченной выносливости сварных соединений на базе 10^7 циклов в сравнении с испытаниями на воздухе на 16,7 и 15,3 %, соответственно в исходном и упрочненном состояниях (рис. 2).

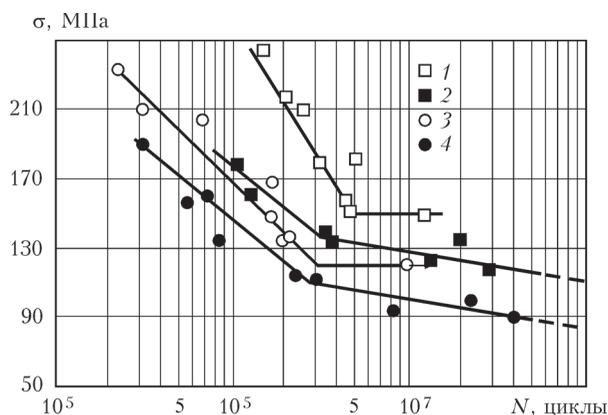


Рис. 2. Кривые усталости тавровых сварных соединений стали 12X18H10T: 1, 2 — после применения ШСУ на воздухе и в синтетической морской воде, соответственно; 3, 4 — в исходном после сварки состоянии на воздухе и в синтетической морской воде, соответственно [22]

В зарубежных и отечественных статьях последних лет все чаще предметом исследований становится влияние УУО на коррозионную стойкость и коррозионную усталость сварных соединений [19, 23–27]. Во-первых, это связано с тем, что многолетними исследованиями уже установлены основные закономерности повышения технологией УУО характеристик сопротивления усталости сварных соединений на воздухе (без влияния коррозионных сред) в зависимости от класса прочности стали, типа сварного соединения, характеристик цикла нагружения и т. п. [28–35]. Во-вторых, этому способствует компактность и мобильность оборудования, экологичность технологического процесса обработки (в сравнении со шлифованием, пескоструйной и дробеструйной обработками), возможность проводить упрочнение сварных соединений в любых пространственных положениях, в полевых условиях, а в некоторых случаях и под водой [19].

Так, в работе [23] приведены результаты усталостных испытаний сварных соединений из трубной стали на воздухе и в коррозионной среде (10%-м растворе NaCl + 10^{-3} ... 10^{-2} М Na₂S₂O₃ в исходном состоянии и после УУО. Показано, что в результате УУО радиус перехода со сварного шва на ЗТВ увеличивается на 1550 %, угол наклона сварного шва уменьшается на 50 %, микротвердость повышается на 33 %, измельчается структура, существенно уменьшается уровень остаточных сварочных напряжений растяжения. Данные факторы способствуют увеличению циклической долговечности сварных соединений в коррозионной среде в 2 раза.

В работе [24] оценена эффективность применения УУО и лазерной обработки для повышения сопротивления коррозионной усталости стыковых сварных соединений стали 15Г2ФБ. Упрочнению УУО подвергали линию сплавления и ЗТВ шириной 10...15 мм. Показано, что морская вода снижает предел ограниченной выносливости на базе $2 \cdot 10^7$ циклов перемен напряжения сварных соединений в исходном состоянии на 42,8 %, а в упрочненном — на 41,2 %. Установлено, что предел ограниченной выносливости сварных соединений на базе $2 \cdot 10^7$ циклов перемен напряжений вследствие УУО на воздухе увеличивается на 20 % (со 140 до 170 МПа), а в синтетической морской воде — на 25 % (с 80 до 100 МПа). Лазерная обработка не привела к повышению характеристик сопротивления усталости сварных соединений. Отмечается, что разрушение упрочненных УУО образцов в морской воде проходило вдали от линии сплавления.

В работе [25] исследовали возможность применения УУО для повышения характеристик со-

противления усталости, микротвердости и коррозионной стойкости образцов стыковых сварных соединений нержавеющей стали 304. Установлено, что предел ограниченной выносливости стыковых сварных соединений на базе $4 \cdot 10^5$ циклов вследствие УУО повышается на 29 % (с 225 до 290 МПа). При этом глубина пластически деформированного слоя металла (видимое изменение зеренной структуры) не превышает 100 мкм. Показано, что упрочнение УУО повышает твердость металла линии сплавления в 2 раза. Установлено, что стойкость к коррозии в растворе 3,5%-го NaCl упрочненных УУО сварных соединениях выше, чем неупрочненных, и находится на уровне основного металла. Скорость коррозии упрочненных УУО соединений (0,0033...0,0061 мм/год) находится на уровне основного металла (0,0038 мм/год), что значительно ниже скорости коррозии сварных соединений в исходном состоянии (0,0118...0,0323 мм/год).

В работе [26] исследована эффективность упрочнения технологией УУО поперечных швов труб диаметром 127 мм из низколегированной стали А106-В, которые эксплуатируются в диапазоне температур 25...300 °С.

Показано, что вследствие УУО микротвердость металла линии сплавления повысилась на 24 %, остаточные сварочные напряжения растяжения снизились на 66 %, а скорость коррозии в 10%-м растворе NaCl + 10^{-3} ... 10^{-2} М Na₂S₂O₃ уменьшилась на 46 %. Уменьшение скорости коррозии металла линии сплавления после УУО в сравнении с основным металлом и металлом шва авторы связывают с бейнитной структурой, улучшением зерна и со снижением остаточных сварочных напряжений. Увеличения циклической долговечности образцов, вырезанных из предварительно упрочненной трубы, не наблюдалось. Это связано с упрочнением сварного соединения лишь с одной (внешней) стороны трубы и перераспределением напряжений вследствие резки.

В работе [27] приведены результаты испытаний тавровых сварных соединений низколегированной стали 10ХСНД ($\sigma_T = 390$ МПа) на воздухе и в коррозионной среде (3%-й раствор NaCl) в исходном состоянии после сварки и после упрочнения УУО. Установлено, что коррозионная среда снижает предел ограниченной выносливости на базе $2 \cdot 10^6$ циклов перемен напряжений сварных соединений в исходном состоянии на 15 % (со 124 до 105 МПа), а в упрочненном УУО — на 29 % (с 260 до 185 МПа). Показано, что применение ВМП целесообразно, поскольку повышает предел ограниченной выносливости сварных соединений в 3%-м растворе NaCl на 76 % (со 105 до 185 МПа) и увеличивает циклическую долговечность в 3,5 раза. Отмечается, что разрушение упрочненных

УУО образцов в коррозионной среде происходит по основному металлу вдали от сплавления.

Все рассмотренные выше литературные данные по эффективности упрочнения методами ППД (в том числе и УУО) сварных соединений, которые поддаются влиянию коррозионных сред, связаны с экспериментальным установлением характеристик коррозионной усталости соединений при их упрочнении в исходном после сварки состоянии. Следует отметить, что при испытаниях на коррозионную усталость в растворах NaCl время пребывания сварных образцов в коррозионной среде составляло от 10 до 200 ч. Появляются работы, посвященные вопросам длительного влияния агрессивных сред на состояние пластически деформированного слоя металла упрочненных УУО сварных соединений, а следовательно, на уровень наведенных остаточных напряжений сжатия и характеристики сопротивления усталости [36, 37].

В работе [36] исследованы поля остаточных напряжений сварных соединений в исходном состоянии, после упрочнения УУО и после упрочнения УУО с последующей выдержкой в коррозионной среде. Образцы сварных соединений изготавливали из судостроительной стали ДН36 путем приварки к пластине толщиной 25 мм с двух сторон продольных ребер жесткости толщиной 15 мм. Выдержка образцов в коррозионной среде (в синтетической морской воде) была эквивалентна 7,5 годам эксплуатации конструкции. Измерение остаточных напряжений в поверхностном слое металла проводили рентгеновским и нейтронным неразрушающими методами, а также путем измерения перемещений после резки образцов электроэрозионным способом. Установлено, что применение технологии УУО приводит к наведению в приповерхностном слое металла остаточных напряжений сжатия на глубину более 1 мм. Показано, что при выдержке в коррозионной среде происходит коррозионно-механический унос поверхностного слоя металла образца. При сравнении металла шва с основным металлом минимальные потери (до 1 мм) после выдержки в коррозионной среде были зафиксированы вдоль упрочненной линии сплавления. Установлено, что несмотря на значительное снижение максимального уровня наведенных напряжений сжатия на поверхности, вследствие частичной потери упрочненного слоя металла, по глубине они практически не изменились (рис. 3).

В работе [37] исследовано влияние длительного воздействия коррозионной среды на эффективность повышения технологией УУО характеристик сопротивления усталости сварных соединений стали 15ХСНД. Показано, что вы-

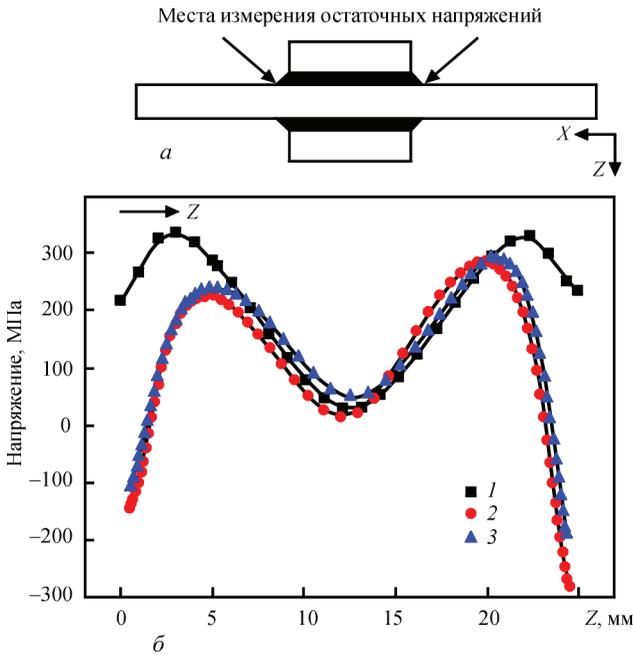


Рис. 3. Схематическое изображение мест измерения (а) и эпюра распределения остаточных напряжений по толщине (б) в сварном образце с приваренными с двух сторон продольными ребрами жесткости: 1 — в исходном после сварки состоянии; 2 — после упрочнения УУО; 3 — после упрочнения УУО и выдержки в коррозионной среде [36]

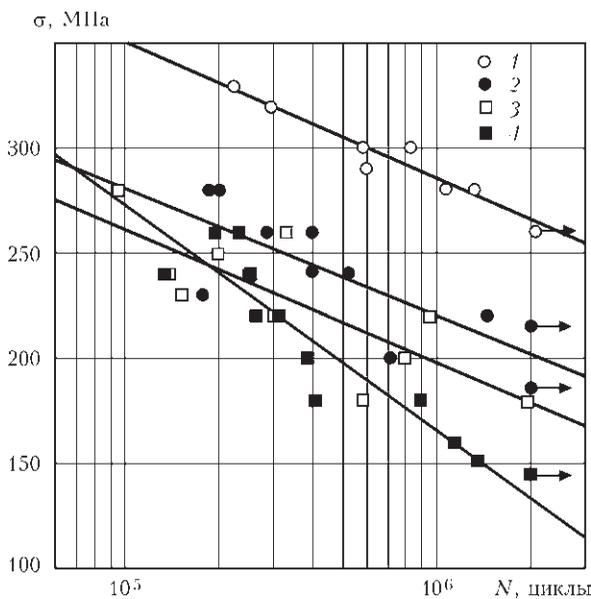


Рис. 4. Кривые усталости тавровых сварных соединений стали 15XCHD: 1, 3 — в упрочненном и неупрочненном технологией ВМП состояниях на воздухе, соответственно; 2, 4 — в упрочненном и неупрочненном технологией ВМП состояниях после влияния нейтрального солевого тумана в течение 1200 ч, соответственно [37]

держка в камере нейтрального солевого тумана на протяжении 1200 ч сварных соединений, упрочненных технологий УУО, приводит к образованию в пластически деформированном слое металла сложных коррозионных повреждений: каверн,

переходящих в питтинги, и коррозионных трещин, переходящих в каверны. Установлено, что несмотря на частичное повреждение упрочненного слоя металла циклическая долговечность соединений увеличивается в 2...5 раз в зависимости от уровней прикладываемых напряжений, а предел ограниченной выносливости на базе $2 \cdot 10^6$ циклов перемен напряжений повышается на 48 % (рис. 4). Разрушение упрочненных УУО образцов происходит по основному металлу вдали от сварного шва и ЗТВ.

Важно отметить, что в данном научном направлении отсутствуют работы, посвященные вопросам установления эффективности применения методов ППД к эксплуатируемым металлоконструкциям, сварные элементы которых имеют определенный уровень коррозионно-усталостных повреждений.

Выводы

1. Экспериментальные исследования последних лет посвящены преимущественно установлению эффективности применения как традиционных (дробеструйная обработка, обработка давлением и т. д.), так и достаточно новых методов поверхностного пластического деформирования металла (пульсирующий электронный луч высокой мощности, оплавление поверхности нанопульсирующим лазером) для повышения сопротивления коррозионной усталости и коррозионной стойкости основного металла и сварных соединений.

2. Практически все методы ППД (за исключением шлифования) повышают шероховатость обрабатываемой поверхности, а, следовательно, и эффективную площадь поверхности, что способствует увеличению скорости коррозии металла. Для повышения коррозионной стойкости поверхностного слоя металла, упрочненного методами ППД, приводящими к увеличению шероховатости поверхности, целесообразно применять дополнительные меры для пассивации поверхности (нанесение тонкой гидроксиапатитной пленки, азотирование, шлифование на глубину 10...15 мкм, выдержка в 20%-м растворе HNO_3 и др.).

3. Методы ППД способствуют повышению коррозионной стойкости сварных соединений, которая изначально ниже основного металла, вследствие изменения структуры металла поверхностного слоя и существенной релаксации остаточных сварочных напряжений растяжения (или наведения остаточных напряжений сжатия). Для обработки сварных металлоконструкций наиболее перспективной является ультразвуковая ударная обработка (УУО) благодаря компактности и мобильности оборудования, экологичности технологического процесса, высокой эффективности,

возможности проводить упрочнение сварных соединений в любых пространственных положениях в полевых условиях.

4. Упрочнение сварных соединений нержавеющей стали технологией УУО, помимо измельчения структуры металла до наноразмеров, увеличения твердости и износостойкости, приводит к образованию на поверхности оксидной пленки с повышенным содержанием хрома. Упрочнение образцов из нержавеющей стали необходимо проводить после предварительного установления оптимальных технологических параметров, поскольку с увеличением времени обработки возрастает количество мартенсита (соответственно увеличивается гальванический эффект между аустенитом и мартенситом), что приводит к снижению коррозионной стойкости.

5. Коррозионная среда снижает эффективность упрочнения сварных соединений методами ППД для повышения характеристик сопротивления усталости по сравнению с испытаниями на воздухе. Однако применение методов ППД целесообразно, поскольку позволяет существенно повысить циклическую долговечность и предел ограниченной выносливости сварных соединений при влиянии коррозионных сред в сравнении с неупрочненными соединениями.

7. При длительном воздействии коррозионных сред на сварные соединения, упрочненные методами ППД, происходит частичный коррозионно-механический унос пластически деформированного поверхностного слоя металла, образование дефектов в виде каверн, питтингов и т. п. Это приводит к значительному снижению максимального уровня наведенных напряжений сжатия на поверхности, но по глубине они практически не изменяются. При этом характеристики сопротивления усталости сварных соединений с поврежденным упрочненным слоем металла остаются выше, чем в исходном состоянии.

8. Отсутствуют работы, посвященные вопросам установления эффективности применения методов ППД к эксплуатируемым металлоконструкциям, сварные элементы которых имеют определенный уровень усталостных и коррозионных повреждений.

1. Чаевский М. И., Шатинский В. Ф. Повышение работоспособности сталей в агрессивных средах при циклическом нагружении. – Киев: Наукова думка, 1970. – 312 с.
2. Похмурский В. И. Коррозионно-усталостная прочность сталей и методы ее повышения. – Киев: Там же, 1974. – 188 с.
3. Коррозионная усталость металлов: Тр. I сов.-анг. семинара; под ред. акад. Я. М. Коротыркина. – Киев: Там же, 1982. – 372 с.
4. Похмурский В. И., Хома М. С. Корозійна втома металів і сплавів. – Львів: СПОЛОМ, 2008. – 304 с.

5. Enhancing plasticity of high-strength titanium alloys VT22 under impact-oscillatory loading / M. Chausov et al. // *Philosophical Magazine*. – 2016. – Vol. 97. – P. 389–399.
6. Effect of surface and bulk plastic deformations on the corrosion resistance and corrosion fatigue performance of AISI316L / Aymen A. Ahmed et al. // *Surface & Coating Technology*. – 2014. – Vol. 259. – P. 448–455.
7. Hashemi B., Rezaee M., Yazdi, Azar V. The wear and corrosion resistance of shot peened-nitrided 316L austenitic stainless steel // *Materials and Design*. – 2011. – № 32. – C. 3287–3292.
8. Effect of shot peening parameters and hydroxyapatite coating on surface properties and corrosion behavior of medical grade AISI316L stainless steel / Aymen A. Ahmed et al. // *Surface & Coating Technology*. – 2015. – Vol. 280. – P. 347–358.
9. Influence of peening on the corrosion properties of AISI304 stainless steel / Hang-sang Lee et al. // *Corrosion Science*. – 2009. – Vol. 51. – P. 2826–2830.
10. Effect of structure evolution induced by ultrasonic peening on the corrosion behavior of AISI321 stainless steel / B. N. Mordiyuk et al. // *Materials Science and Engineering A*. – 2007. – Vol. 458. – P. 253–261
11. Effect of ultrasonic impact peening on the corrosion of ferritic-martensitic steels in supercritical water / Z. Dong et al. // *Journal of Nuclear Materials*. – 2015. – № 457. – C. 266–272.
12. Influence of surface mechanical attrition treatment (SMAT) on the corrosion behaviour of AISI304 stainless steel / T. Balusamy et al. // *Corrosion Science*. – 2013. – Vol. 74. – P. 332–344.
13. Impact of surface treatment on the corrosion resistance of ASTM F138-F139 stainless steel for biomedical applications / M. D. Pereda et al. // *Procedia Materials Science*. – 2012. – Vol.1. – P.446–453.
14. Effect of cold working and sandblasting on the microhardness, tensile strength and corrosion resistance of AISI316L stainless steel / Suyitno et al. // *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. – 2012. – Vol. 19, № 12. – P. 1093–1099.
15. Improving the Corrosion Resistance and Reliability of Austenitic and Austenitic–Ferritic Steel Pipe / G. G. Shepel'a et al. // *Steel in Translation*. – 2009. – Vol. 39. – P. 1107–1110.
16. Pacquentin W., Caron N., Oltra R. Effect of microstructure and chemical composition on localized corrosion resistance of a AISI304L stainless steel after nanopulsed-laser surface melting // *Applied Surface Science*. – 2015. – Vol. 356. – P. 561–573.
17. Improving corrosion and wear resistance of FV520B steel by high current pulsed electron beam surface treatment / S. Hao et al. // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. – 2015. – Vol. 356–357. – P. 12–16.
18. Baptista R., Infante V., Branco C. M. Study of the behavior in welded joints of stainless steels treated by weld toe grinding and subjected to salt water corrosion // *International Journal of Fatigue*. – 2008. – Vol. 30. – P. 453–462.
19. Enhancement of the fatigue strength of underwater wet welds by grinding and ultrasonic impact treatment / Wenbin Gao et al. // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2015. – Vol. 223. – P. 305–312.
20. Nasilowska B., Bogdanowicz Z., Wojucki M. Shot peening effect on 904 L welds corrosion resistance // *Journal of Constructional Steel Research*. – 2015. – Vol. 115. – P. 276–282.
21. Effect of high energy shot peening pressure on the stress corrosion cracking of the weld joint of 304 austenitic stainless steel / L. Zhiming et al. // *Materials Science and Engineering: A*. – 2015. – Vol. 637. – P. 170–174.
22. Коломийцев Е. В. Коррозионно-усталостная прочность тавровых соединений стали 12X18H10T и методы ее повышения // *Автоматическая сварка*. – 2012. – № 12. – С. 41–43.
23. Daavari M., Sadough Vanini S. A. Corrosion fatigue enhancement of welded steel pipes by ultrasonic impact treatment // *Materials Letters*. – 2015. – Vol. 139. – P. 462–466.

24. Коломийцев Е. В., Серенко А. Н. Влияние ультразвуковой и лазерной обработки на сопротивление усталости стыковых сварных соединений в воздушной и коррозионной средах // Автоматическая сварка. – 1990. – № 11. – С. 13–15.
25. Abdulah A., Malaki M., Eskandari A. Strength enhancement of the welded structures by ultrasonic peening // Materials & Design. – 2012. – Vol. 38. – P. 7–18.
26. Daavari M., Sadough Vanini S. A. The effect of ultrasonic peening on service life of the butt-welded high-temperature steel pipes // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2015. – Vol. 24. – P. 3658–3665.
27. Сопротивление коррозионной усталости сварных соединений, упрочненных высокочастотной механической проковкой / В. В. Кныш и др. // Автоматическая сварка. – 2008. – № 4. – С. 5–8.
28. Zhao X., Wang D., Huo L. Analysis of the S-N curves of welded joints enhanced by ultrasonic peening treatment // Materials & Design. – 2011. – Vol. 32. – № 1. – P. 88–96.
29. Abston S. The technology and applications of ultrasonic impact technology // Australasian Welding Journal. – 2010. – Vol. 55. – P. 20–21.
30. The effects of ultrasonic peening treatment on the ultra-long life fatigue behavior of welded joints / D. Yin et al. // Materials & Design. – 2010. – Vol. 31, № 7. – P. 3299–3307.
31. Marquis G. Failure modes and fatigue strength of improved HSS welds // Engineering Fracture Mechanics. – 2010. – Vol. 77. – P. 2051–2062.
32. Discussion on fatigue design of welded joints enhanced by ultrasonic peening treatment (UPT) / T. Wang et al. // International Journal of Fatigue. – 2009. – Vol. 31, № 4. – P. 644–650.
33. Rehabilitation and repair of welded elements and structures by ultrasonic peening / Y. Kudryavtsev et al. // Welding in the World. – 2007. – Vol. 51, № 7-8. – P. 47–53.
34. Verlängerung der lebensdauer von schweißkonstruktion aus höher festen baustählen durch Anwendung der UIT-technologie / U. Kuhlmann et al. // Schweißen und Schneiden. – 2005. – Vol. 57, № 8. – P. 384–391.
35. Yang X., Ling X., Zhou J. Optimization of the fatigue resistance of AISI304 stainless steel by ultrasonic impact treatment // International Journal of Fatigue. – 2014. – Vol. 61, № 4. – P. 28–38.
36. Ahmad B., Fitzpatrick M. E. Effect of ultrasonic peening and accelerated corrosion exposure on residual stress distribution in welded marine steel // Metallurgical and materials transactions A. – 2015. – Vol. 46. – P. 1214–1226.
37. Влияние коррозионных повреждений на циклическую долговечность тавровых сварных соединений, обрабо-

танных высокочастотной механической проковкой / В. В. Кныш и др. // Автоматическая сварка. – 2016. – № 9. – С. 46–51.

С. О. Соловей

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.
03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.
E-mail: office@paton.kiev.ua

СУЧАСНИЙ СТАН МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ КОРОЗІЙНОЇ СТІЙКОСТІ ТА ОПОРУ КОРОЗІЙНИЙ ВТОМІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ (ОГЛЯД)

Для підвищення надійності експлуатації виробів і зварних конструкцій в умовах впливу корозійних середовищ застосовуються методи поверхневого пластичного деформування металу, які надають зміцненню шару фізико-механічні властивості, відмінні від основного металу. Технічний прогрес сприяє не тільки розробці нових методів поверхневого пластичного деформування (наприклад, оплавлення поверхні нанопульсуючим лазером), але і постійному вдосконаленню традиційних методів (дробоструминна обробка, обробка тиском та ін.), ефективність яких доведена на практиці. Мета цього огляду — оцінити сучасний стан використання методів поверхневого пластичного деформування для підвищення опору корозійній втомі і стійкості сталей та зварних з'єднань. Аналіз літературних даних показав, що експериментальні дослідження останніх років присвячені переважно встановленню ефективності зміцнення даними методами нержавіючих сталей і їх з'єднань для подальшого застосування в таких областях, як медицина (імпланти), атомна енергетика (реактори), суднобудування. Для обробки зварних металоконструкцій найбільш перспективною є ультразвукова ударна обробка завдяки компактності і мобільності обладнання, екологічності технологічного процесу, високій ефективності, можливості проводити зміцнення зварних з'єднань в будь-яких просторових положеннях в польових умовах. Бібліогр. 37, рис. 4.

Ключові слова: зварне з'єднання, корозія, поверхневе пластичне деформування, ультразвукова ударна обробка, корозійна втома, корозійна стійкість

Поступила в редакцію 01.02.2017

Ассоциация «Электрод»
Институт электросварки им. Е. О. Патона НАНУ
ООО «Новооскольский электродный завод»
ООО «Керамглас»

Международный научно-практический семинар «Совершенствование сварочных материалов и технологий их производства под прогнозируемые требования»

г. Белгород, отель «АМАКС Конгресс»
5–8 июня 2017 г.

Контакты:

ООО «Керамглас», пер. Харьковский, 36д,
г. Белгород, Россия, 308012,
тел./факс: +74722240010, моб. тел.: +79030246944.
E-mail: ban@keramglass.ru

Контактное лицо:

Бондаренко Андрей Николаевич

