

ПОВЫШЕНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ТАВРОВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ПОВЫШЕННОЙ ВЛАЖНОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОКОВКОЙ

В.В. КНЫШ, С.А. СОЛОВЕЙ, Л.И. НЫРКОВА, Л.Г. ШИТОВА, А.А. РЫБАКОВ

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

В работе экспериментально установлена эффективность применения высокочастотной механической проковки (ВМП) для повышения характеристик сопротивления усталости тавровых сварных соединений металлоконструкций, которые эксплуатируются в условиях умеренного климата. Коррозионные повреждения, характерные для таких конструкций после длительной эксплуатации, получали выдержкой сварных соединений в камере влаги Г4 при повышенной влажности и температуре на протяжении 1200 ч. Проведены металлографические исследования зоны сварного шва и зоны термического влияния сварных соединений в исходном (неупрочненном) и упрочненном технологией ВМП состояниях до и после воздействия коррозионной среды. Установлено, что в результате упрочнения ВМП стойкость соединений к воздействию повышенной влажности и температуры возрастает. Проведены испытания на усталость сварных соединений в исходном и упрочненном состояниях до и после выдержки в камере влаги. Установлено, что упрочнение технологией ВМП до коррозионного воздействия позволяет повысить предел ограниченной выносливости на базе $2 \cdot 10^6$ циклов тавровых сварных соединений на 48 % и увеличить циклическую долговечность в 6...8 раз. Библиогр. 12, табл. 1, рис. 7.

Ключевые слова: тавровое сварное соединение, коррозионная среда, усталость, высокочастотная механическая проковка, ультразвуковая ударная обработка, повышение сопротивления коррозионной усталости

Инженерные металлоконструкции в процессе длительной эксплуатации могут подвергаться одновременному воздействию внешнего переменного нагружения и коррозионно-агрессивных сред. Срок службы таких конструкций определяется сопротивлением коррозионной усталости их наиболее нагруженных соединений и узлов. Для повышения характеристик сопротивления усталости узлов и элементов конструкций на практике широко применяются различные методы поверхностного пластического деформирования (ППД) металла. Обзор основных методов ППД представлен в работе [1]. В последние годы активно проводятся исследования по установлению эффективности применения методов ППД для повышения коррозионной усталости и коррозионной стойкости металлов и их сварных соединений [2–12]. Некоторые работы по данной тематике посвящены эффективности применения такого метода ППД, как высокочастотная механическая проковка (ВМП), известная в зарубежной литературе под названием «ультразвуковая ударная обработка» [3, 7, 9, 11, 12]. Так, в работе [9] установлено, что в зависимости от технологических параметров выполнения ВМП коррозионная стойкость упрочненного поверхностного слоя материала, определенная по потенциалу коррозии, может как повышаться, так и понижаться относительно основного материала. Экспериментальными исследованиями коррози-

онной усталости сварных соединений низколегированных сталей в растворе NaCl установлено, что упрочнение технологией ВМП позволяет существенно увеличить их циклическую долговечность [3, 7, 11]. В работе [12] показана перспективность применения комбинированного упрочнения сварных соединений электроискровым легированием и ВМП для повышения сопротивления коррозионной усталости в сравнении с упрочнением лишь ВМП. Следует отметить, что в данных работах при проведении испытаний на коррозионную усталость время пребывания образцов в коррозионной среде составляло от 10 до 200 ч. При таком времени пребывания образцов в коррозионной среде, как правило, не происходит существенных коррозионных повреждений упрочненного ВМП слоя металла, что может приводить к получению завышенных характеристик сопротивления коррозионной усталости сварных соединений, необходимых при расчете конструкций длительной эксплуатации. Коррозионные повреждения, характерные эксплуатируемым металлоконструкциям, можно получить предварительной выдержкой сварных соединений в коррозионно-агрессивных средах.

Цель настоящей работы — оценить эффективность применения технологии ВМП для повышения характеристик сопротивления усталости тавровых сварных соединений на стадии изготов-

ления металлоконструкций, длительная эксплуатация которых будет происходить в условиях повышенной влажности и температуры.

Материал и методика исследований. Экспериментальные исследования на коррозионную усталость проводили на образцах тавровых сварных соединений 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 и автомобильных мостов), имеет повышенную прочность, хорошо сваривается, устойчива в атмосферных условиях и работоспособна в диапазоне температур от -70 °С до 45 °С. Химический состав стали 15ХСНД следующий, мас. %: 0,142 С; 0,466 Si; 0,63 Mn; 0,020 S; 0,013 P; 0,31 Ni; 0,66 Cr; 0,34 Cu.

Заготовки под образцы сварных соединений вырезали из горячекатаного листового проката толщиной 12 мм 12 категории. Размер заготовок под тавровые соединения составлял 350×70 мм. Тавровые сварные соединения получали путем приварки ручной дуговой сваркой электродами марки УОНИ 13/55 поперечных ребер жесткости (также из стали 15ХСНД) с двух сторон пластины угловыми швами. Корень (первый слой) проваривали электродами диаметром 3 мм, шов (второй слой) формировали электродами диаметром 4 мм. Форма и геометрические размеры образцов тавровых сварных соединений приведены на рис. 1. Толщина образца обусловлена широкой применимостью в инженерных сварных металлоконструкциях проката толщиной 12 мм, а ширину рабочей части 50 мм выбирали исходя из мощности испытательного оборудования.

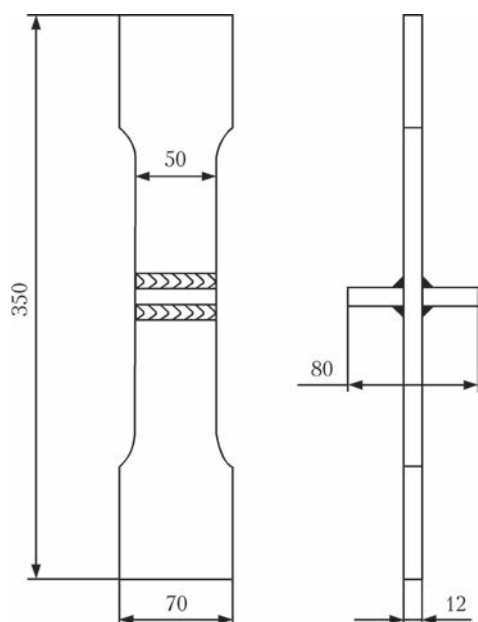


Рис. 1. Форма и геометрические размеры образца таврового сварного соединения

Экспериментальные исследования проводили на сервогидравлической машине УРС-20 при переменном растяжении с асимметрией цикла $R_\sigma = 0$ и частотой 5 Гц при регулярном нагружении. Критерием завершения испытаний служило полное разрушение образцов или превышение базы испытаний $2 \cdot 10^6$ циклов перемен напряжений.

Испытывали 4 серии образцов тавровых сварных соединений:

- образцы в исходном (неупрочненном) после сварки состоянии (первая серия),
- образцы, упрочненные технологией ВМП (вторая серия),
- образцы в неупрочненном состоянии после выдержки в коррозионной среде (третья серия);
- образцы, упрочненные ВМП, после выдержки в коррозионной среде (четвертая серия).

Упрочнение сварных соединений технологией ВМП проводили оборудованием USTREAT-1.0, в котором ручной компактный ударный инструмент с пьезокерамическим преобразователем соединен с ультразвуковым генератором выходной мощностью 500 Вт. При упрочнении сварных соединений технологией ВМП поверхностному пластическому деформированию подвергали узкую зону перехода металла шва на ЗТВ (по линии сплавления). В качестве упрочнителя использовали однорядную четырехбойковую насадку с диаметром бойков 3 мм. Скорость выполнения ВМП при обработке тавровых сварных соединений составляла 1 мм/с. Амплитуду колебаний торца волновода ручного ударного инструмента задавали 25 мкм.

Для получения предварительных коррозионных повреждений сварные образцы третьей и четвертой серий помещали в камеру Г4, в которой при повышенной влажности (95 %) и температуре (40 °С) выдерживали на протяжении 1200 ч.

Металлографические исследования поверхностного слоя металла шва и ЗТВ тавровых сварных соединений в исходном (неупрочненном) и упрочненном технологией ВМП состояниях проводили до и после выдержки в камере при повышенной влажности и температуре.

Результаты исследований. Металлографическими исследованиями основного металла и сварного соединения установлено следующее. Микроструктура основного металла проката стали 15ХСНД ферритно-перлитная с объемной частью перлитной составляющей около 30...35 %, полосчатость 3-4 балл ряда Б по ГОСТ 5640. Величина зерна соответствует № 7-9 шкалы 1 по ГОСТ 5639.

Перед исследованиями микроструктуры сварных соединений определяли размеры швов и ЗТВ. Ширина угловых швов составляла 12,8...14,3 мм, высота 9,5...12,0 мм. При этом высота первого слоя шва 4,5...6,5 мм, второго 6,8...8,3 мм. ЗТВ,

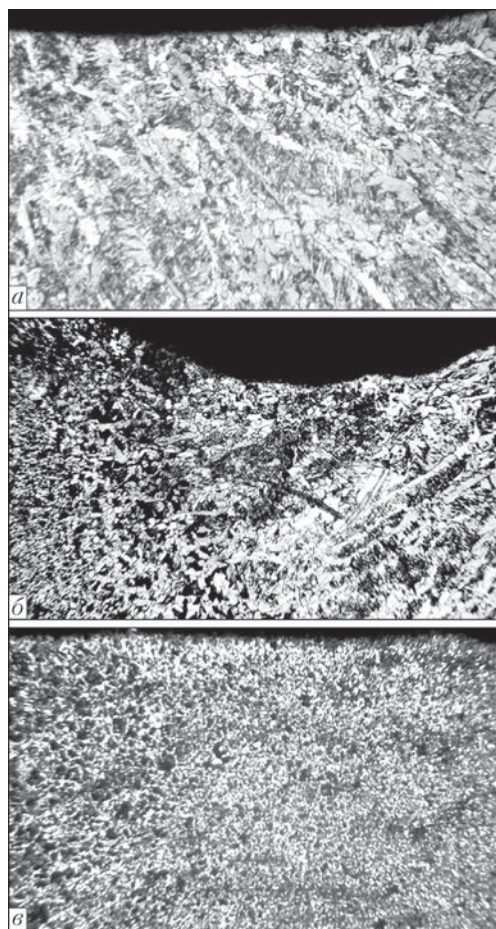


Рис. 2. Микроструктура ($\times 100$) поверхностного слоя металла шва (а), металла ЗКЗ (б) и металла ЗТВ таврового сварного соединения в исходном состоянии

обусловленная видимыми изменениями структуры металла в поверхностных слоях проката, составляла 1,04...2,00 мм, а в удаленных от поверхности слоях металла 3,0...3,8 мм.

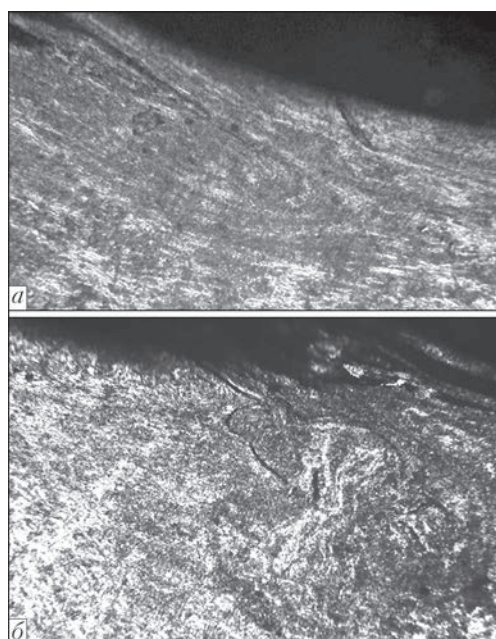


Рис. 3. Микроструктура ($\times 250$) металла шва (а) и металла ЗТВ (б) после упрочнения технологией ВМП

Микроструктура первого слоя металла шва представляет собой ячеистую ферритно-перлитную структуру с величиной зерна № 6–8 по ГОСТ 5639 шкала 1. Также выявлены зерна феррита с мелкодисперстными выделениями МАК-фазы зернистого типа и зерен, свободных от выделений. Перлитные образования имеют вид узких областей по границам зерен феррита. Микроструктура второго слоя металла шва имеет достаточно однородную дендритную ферритно-перлитную структуру. Ферритная составляющая содержит зерна с пластинчатыми выделениями МАК-фазы по типу верхнего бейнита, мелкодисперсные частицы зернового типа (по типу нижнего бейнита), а также зерна достаточно крупноогольчатого феррита.

Микроструктура металла ЗТВ следующая. Непосредственно около поверхности размер зерен зоны крупного зерна (ЗКЗ) отвечает № 3-4 по ГОСТ 5639, а ее протяженность 0,52 мм (2...3 зерна). На расстоянии около 3 мм от поверхности размер ЗКЗ увеличивается до 1,04...1,2 мм, но размер зерен остается на уровне № 3-4. Величина перлитно-ферритных зерен зоны мелкого зерна (ЗМЗ), размер которой составляет около 1 мм, составляет № 7–10. В металле ЗКЗ первого шва сформировалась в основном смесь ферритно-перлитных зерен № 5–8 протяженностью до 0,91 мм. Структура ЗКЗ второго сварного шва состоит из феррита с плотно распределенными в его матрице выделениями МАК-фазы с хаотичными дисперсными частицами зернистого типа, реже — с упорядоченными частицами пластинчатого типа (по нижнему и верхнему бейниту). В зернах наблюдается фрагментация — деление зерен на отдельные фрагменты с МАК-фазой разной морфологии и ориентации. Границы зерен оконтурены ферритом в виде прослоек шириной 1...3 мкм и цепей удлиненных зерен № 8-9. Твердость первого слоя металла шва находится в диапазоне $HV_{0,98}$ — 232...241, второго $HV_{0,98}$ — 292...325. Микроструктура поверхностного слоя металла шва, металла ЗКЗ и металла ЗТВ таврового сварного соединения в исходном состоянии приведены на рис. 2.

После ВМП на границе сплавления шва с основным металлом в поверхностных слоях металла швов и ЗТВ образовались практически одинаковые по размерам характерные канавки. Ширина канавок находится в диапазоне 3,0...3,5 мм, глубина 280...340 мкм. Под канавкой сформировались пластически деформированные слои металла шва шириной 1,7...1,82 мм и металла ЗТВ шириной 1,3...1,7 мм. Глубина пластически деформированного слоя металла шва и ЗТВ, обусловленная видимыми изменениями структуры металла под канавкой, составила 390...650 мкм. ВМП существенно изменило литую структуру метал-

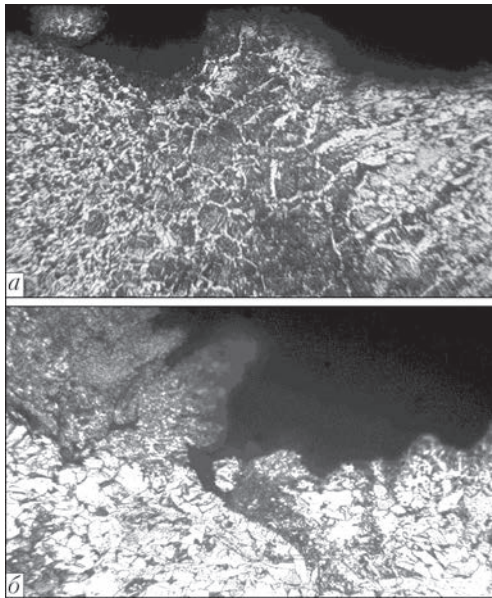


Рис. 4. Коррозионные повреждения в металле ЗТВ таврового сварного соединения в неупрочненном состоянии после испытаний в условиях повышенной влажности и температуры: а — $\times 100$; б — $\times 250$

ла шва (рис. 3, а). В поверхностном слое металла глубиной до 130 мкм образовались вытянутые зерна бейнита с коэффициентом формы зерна $K_{\phi} = 5 \dots 17$ ($K_{\phi} = a/b$, где a и b , соответственно, длина и ширина вытянутого зерна), которые практически параллельны дну канавки, и ниткоподобные прожилки феррита. На расстоянии 260 мкм от дна канавки наблюдаются зерна феррита с $K_{\phi} = 4 \dots 7$ и отдельные зерна бейнита. Выявлены также изменения зеренной структуры металла ЗТВ (рис. 3, б). В поверхностных слоях ЗКЗ глубиной до 280 мкм формируются вытянутые под углом ко дну канавки зерна бейнита и феррита с коэффициентом формы зерна $K_{\phi} = 7 \dots 15$. С дальнейшим удалением от дна канавки и в ЗМЗ наблюдаются мелкие ферритно-перлитные зерна 9–11 номеров. В упрочненном слое металла выявлено несколько отслоений длиной от 40 до 300 мкм. Проведены измерения микротвердости ($HV_{0,20}$) пластически деформированного слоя металла. За счет существенного повышения уровня плотности дислокаций вследствие ВМП микротвердость упрочненного слоя металла ($HV_{0,20} = 344 \dots 445$) на 27 % выше твердости металла ЗКЗ и на 35 % выше твердости металла шва.

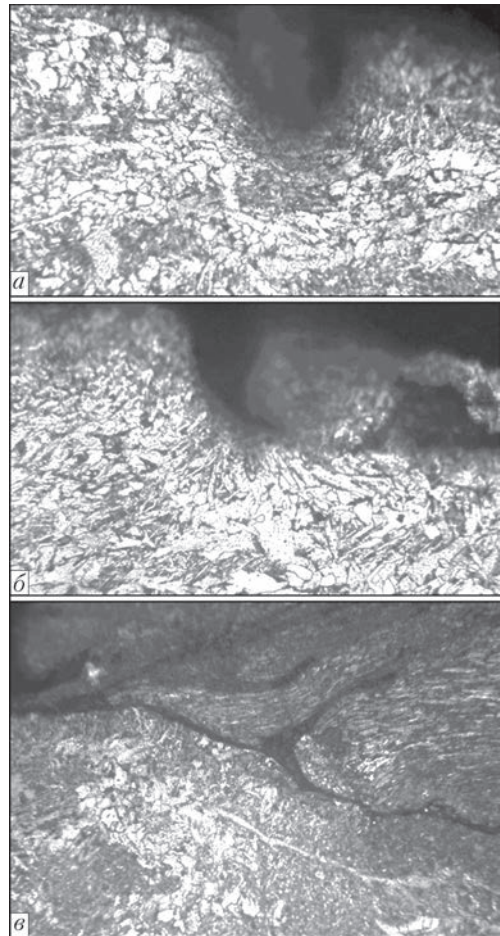


Рис. 5. Коррозионные повреждения в виде пятен (а, б) и трещин (в) в поверхностном слое металла таврового сварного соединения, упрочненного технологией ВМП, после испытаний в условиях повышенной влажности и температуры: а — $\times 100$; б, в — $\times 250$

В поверхностных слоях металла шва и ЗТВ таврового сварного соединения в исходном (неупрочненном) состоянии после выдержки в камере Г4 при повышенной влажности и температуре наблюдаются достаточно глубокие и протяженные коррозионные повреждения в виде пятен размером до $2,8 \times 0,26$ мм, а иногда в виде каверн размером до $1,56 \times 1,17$ мм (рис. 4). В пластически деформированных ВМП поверхностных слоях металла угловых швов и металла ЗТВ после выдержки в камере Г4 выявлены аналогичные виды коррозии (рис. 5, а, б), максимальный размер которых не превышает $1,95 \times 0,16$ мм. Кроме того, в упрочненном слое металла шва наблюдается коррозия в виде игольчатых межкристаллитных тре-

Размеры коррозионных повреждений в поверхностных слоях металла швов и ЗТВ тавровых сварных соединений стали 15ХСНД после выдержки 1200 ч при повышенной влажности и температуре

Состояние образцов	Коррозия пятнами поверхностных слоев металла шва			Коррозия пятнами поверхностных слоев металла ЗТВ		
	Степень поражения, %	Глубина поражения, мм	Суммарный размер проекции площади поражения, мм ²	Степень поражения, %	Глубина поражения, мм	Суммарный размер проекции площади поражения, мм ²
Без упрочнения	31,2	0,091...1,17	17,615	38,5	0,13...0,39	5,85
Упрочненные ВМП	23	0,13...1,17	12,44	29	0,13...0,26	4,42

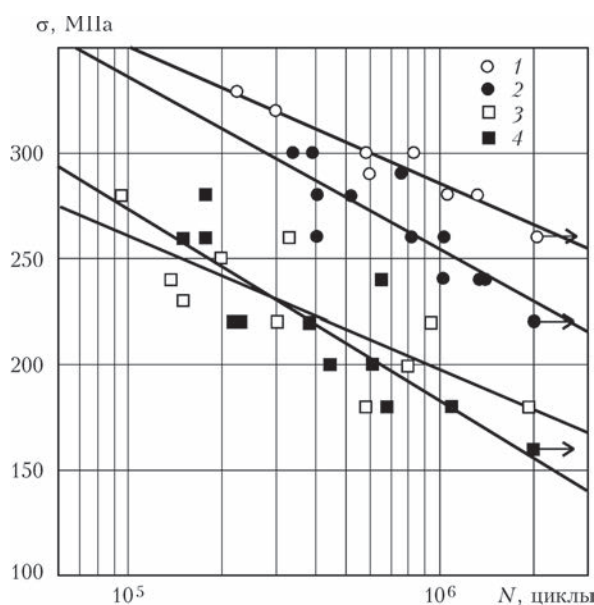


Рис. 6. Кривые усталости тавровых сварных соединений стали 15XCHD: 1, 2 — в упрочненном технологией ВМП состоянии до и после выдержки в камере влаги Г4 на протяжении 1200 ч, соответственно; 3, 4 — в исходном (неупрочненном) состоянии до и после выдержки в камере влаги Г4 на протяжении 1200 ч, соответственно

щин с продуктами коррозии длиной 0,65...1,00 мм и глубиной до 0,65 мм (рис. 5, в). Результаты металлографических исследований с вычисленными значениями степени поражения и суммарными размерами проекций площади поражения, глубины проникновения коррозионных пятен и каверн в поверхностные слои металла угловых швов и ЗТВ тавровых сварных соединений приведены в таблице. Глубина проникновения каверн в поверхностном слое металла ЗТВ не превышает 0,39 мм и 0,26 мм, соответственно для сварных соединений в исходном и упрочненном ВМП состояниях. Коррозионные каверны в поверхностных слоях металла шва сварных соединений как в исход-

ном состоянии, так и в упрочненном ВМП, более глубокие и достигают 1,17 мм. По-видимому, это связано со спецификой формирования второго слоя сварного шва при ручной дуговой сварке. В целом, образцы тавровых сварных соединений, упрочненных технологией ВМП, являются более стойкими к влиянию повышенной влажности и температуры (см. таблицу).

Результаты усталостных испытаний всех четырех серий образцов таврового сварного соединения стали 15XCHD представлены на рис. 6, а внешний вид зоны шва сварного соединения в исходном и упрочненном ВМП состояниях после выдержки в камере влаги на протяжении 1200 ч на рис. 7.

Из приведенных кривых усталости (кривые 1 и 3, рис. 6) следует, что применение технологии ВМП в качестве способа поверхностного пластического деформирования металла соединений вблизи мест локализации усталостных повреждений существенно увеличивает характеристики сопротивления усталости тавровых сварных соединений без коррозионных повреждений. Циклическая долговечность соединений увеличивается более чем в 20 раз, а предел ограниченной выносливости на базе $2 \cdot 10^6$ циклов повышается примерно на 47 % (от 180 до 265 МПа). Выдержка образцов тавровых сварных соединений в камере повышенной влажности и температуры на протяжении 1200 ч приводит к снижению пределов ограниченной выносливости на базе $2 \cdot 10^6$ циклов неупрочненных сварных соединений примерно на 14 % (от 180 до 155 МПа), а упрочненных технологией ВМП — примерно на 13 % (от 265 до 230 МПа). Результаты, полученные на сварных соединениях после коррозионного воздействия (кривые 2 и 4, рис. 6), показывают, что предвари-



Рис. 7. Внешний вид зоны шва таврового сварного соединения в исходном (а) и упрочненном технологией ВМП (б) состояниях после выдержки на протяжении 1200 ч в условиях повышенной влажности и температуры

тельное упрочнение технологией ВМП повышает предел ограниченной выносливости на базе $2 \cdot 10^6$ циклов таких соединений примерно на 48 % (от 155 до 230 МПа), а циклическую долговечность увеличивает в 6...8 раз. Разрушение упрочненных ВМП сварных соединений, испытанных как до, так и после выдержки в камере влаги Г4, происходило в основном вдали от сварного шва и ЗТВ.

Таким образом, экспериментально полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности применения технологии ВМП для повышения характеристик сопротивления усталости тавровых сварных соединений металлоконструкций, эксплуатируемых в условиях умеренного климата при воздействии переменного нагружения (кривые 2 и 4, рис. 6). При этом следует отметить, что защита упрочненного ВМП поверхностного слоя металла от прямого воздействия атмосферных условий, т.е. от коррозионных повреждений (например, за счет использования лакокрасочных покрытий), позволит достичь максимальных характеристик сопротивления усталости таких соединений (кривая 1, рис. 6).

Выводы

1. Проведены металлографические исследования поверхностных слоев металла шва и ЗТВ сварных соединений в исходном (неупрочненном) и упрочненном технологией ВМП состояниях до и после воздействия коррозионной среды. На основе вычислений степени и глубины, а также суммарного размера проекции площади поражений коррозионными пятнами и кавернами поверхностных слоев металла угловых швов и ЗТВ тавровых сварных соединений установлено, что упрочнение технологией ВМП повышает стойкость соединений к воздействию повышенной влажности и температуры.

2. Подтверждено, что упрочнение технологией ВМП существенно повышает характеристики сопротивления усталости сварных соединений низколегированных сталей на воздухе. Циклическая долговечность тавровых сварных соединений стали 15ХСНД после упрочнения технологией ВМП увеличивается более чем в 20 раз, а предел ограниченной выносливости на базе $2 \cdot 10^6$ циклов повышается на 47 %.

3. Установлена высокая эффективность применения технологии ВМП для повышения характеристик сопротивления усталости сварных соединений металлоконструкций, работающих в условиях умеренного климата. Упрочнение технологией ВМП тавровых сварных соединений стали 15ХСНД перед выдержкой в камере повышенной влажности и температуры на протяжении 1200 ч приводит к увеличению циклической долговечности в 6...8 раз в зависимости от уровней прикладываемых напряжений и повышению предела ограниченной выносливости на базе $2 \cdot 10^6$ циклов на 48 %.

1. Kulekci M.K., Esme U. Critical analysis of processes and apparatus for industrial surface peening technologies // The Intern. J. of Advanced Manufacturing Technology. – 2014. – 74, № 9. – P. 1551–1565.
2. Похмурський В.І., Хома М.С. Корозійна втома металів і сплавів. – Львів: СПОЛОМ, 2008. – 304 с.
3. Коломийцев Е.В., Серенко А.Н. Влияние ультразвуковой и лазерной обработки на сопротивление усталости стыковых сварных соединений в воздушной и коррозионной средах // Автомат. сварка. – 1990. – № 11. – С. 13–15.
4. Nasilowska B., Bogdanowicz Z., Wojucki M. Shot peening effect on 904 L welds corrosion resistance // J. of Constructional Steel Research. – 2015. – Vol. 115. – P. 276–282.
5. Effect of surface and bulk plastic deformations on the corrosion resistance and corrosion fatigue performance of AISI 316L / A.A. Ahmed, M. Mhaede, M. Wollmann, L. Wagner // Surface & Coating Technology. – 2014. – Vol. 259. – P. 448–455.
6. Influence of peening on the corrosion properties of AISI 304 stainless steel / Hang-sang Lee, Doo-soo Kim, June-sung Jung et al. // Corrosion Science. – 2009. – Vol. 51. – P. 2826–2830.
7. Спротивлення корозійній усталості сварних з'єднань, упрочнених високочастотною механічною проковкою / В.В. Кныш, А.З. Кузьменко, И.И. Вальтерис, С.А. Соловей // Автомат. сварка. – 2008. – № 4. – С. 5–8.
8. Коломийцев Е.В. Коррозионно-усталостная прочность тавровых соединений стали 12Х18Н10Т и методы ее повышения // Там же. – 2012. – № 12. – С. 41–43.
9. 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 // Materials Sci. and Eng. A. – 2007. – Vol. 458. – P. 253–261.
10. Hashemi B., Rezaee Yazdi M., Azar V. The wear and corrosion resistance of shot peened-nitrided 316L austenitic stainless steel // Materials and Design. – 2011. – № 32. – С. 3287–3292.
11. Daavary M., Sadough Vanini S.A. Corrosion fatigue enhancement of welded steel pipes by ultrasonic impact treatment // Materials Letter. – 2015. – Vol. 139. – P. 462–466.
12. Повышение сопротивления усталости и коррозионной стойкости сварных соединений ультразвуковой ударной обработкой и электроискровым легированием / Г.И. Прокopenko, Б.Н. Мордюк, В.В. Кныш и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2014. – № 3. – С. 34–40.

Поступила в редакцию 02.02.2016