

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ПРОКОВКИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТЫКОВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В УСЛОВИЯХ АТМОСФЕРЫ УМЕРЕННОГО КЛИМАТА

В. В. КНЫШ, С. А. СОЛОВЕЙ, В. И. КИРЬЯН, Л. И. НЫРКОВА, С. А. ОСАДЧУК

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

В работе представлены результаты исследований эффективности применения высокочастотной механической проковки (ВМП) для повышения характеристик сопротивления усталости стыковых сварных соединений металлоконструкций, эксплуатирующихся в условиях атмосферы умеренного климата. Металлографическими исследованиями показано, что обработка технологией ВМП зоны сплавления стыкового сварного соединения стали 15ХСНД перед экспонированием в условиях повышенной влажности способствовала повышению коррозионной стойкости этой зоны: уменьшению глубины коррозионных язв и степени поражения металла ЗТВ от 100 % практически до 0. Проведены испытания на усталость сварных соединений в исходном и упрочненном ВМП состояниях до и после экспонирования в условиях повышенной влажности и температуры. Установлено, что упрочнение технологией ВМП стыковых сварных соединений стали 15ХСНД перед экспонированием позволяет повысить предел ограниченной выносливости на базе $2 \cdot 10^6$ циклов на 39 % и увеличить циклическую долговечность до 9 раз. Библиогр. 16, табл. 2, рис. 5.

Ключевые слова: стыковое сварное соединение, усталость, высокочастотная механическая проковка, повышенная влажность

Сварные металлоконструкции длительной эксплуатации (мосты, мостовые переходы, магистральные трубопроводы и т. п.) — дорогостоящие сооружения, к которым предъявляются высокие требования безопасности. Как показывает статистика, 70...80 % отказов сварных металлоконструкций связано с повреждением сварных соединений, несмотря на то, что их объем составляет около 1,0...1,5 % общего объема конструкции [1]. Одним из наиболее распространенных видов разрушения сварных металлических конструкций, в том числе мостовых, является усталость. Климатические факторы внешней среды существенно снижают характеристики сопротивления усталости сварных соединений из-за вовлечения коррозионной среды в процесс разрушения, вследствие чего образуются коррозионные повреждения (питтинги, каверны и т. п.), являющиеся геометрическими концентраторами напряжений. Для защиты от коррозионно-усталостного разрушения применяются различные методы, в том числе поверхностного пластического деформирования (ППД) металла [1–4].

Среди методов ППД важное место занимает высокочастотная механическая проковка (ВМП), известная в зарубежной литературе как ультразвуковая ударная обработка [5–8]. Установлена высокая эффективность применения данной технологии для повышения коррозионной стойкости и сопротивления усталости сварных соединений

при непосредственном испытании в коррозионно-агрессивных растворах [9–12]. При проведении таких испытаний время контакта образцов с коррозионной средой составляет от 10 до 200 ч. В последние годы появляются работы, посвященные исследованию длительного влияния коррозионных сред на состояние пластически деформированного технологией ВМП слоя металла, а, соответственно, на изменение уровня наведенных остаточных напряжений сжатия и характеристик сопротивления усталости [13–15].

Учитывая климатический район расположения Украины, представляет интерес оценить длительное влияние атмосферы умеренного климата на снижение циклической долговечности сварных соединений в исходном и упрочненном технологией ВМП состояниях. Поскольку к металлоконструкциям, которые эксплуатируются в условиях умеренного климата, предъявляются требования к коррозионной стойкости (скорость уноса металла, размер коррозионных дефектов и др.) при влиянии повышенной влажности и температуры, то характерные повреждения можно получить проведением ускоренных коррозионных испытаний в камере влаги Г4.

Цель настоящей работы — оценить эффективность применения технологии ВМП для повышения характеристик сопротивления усталости стыковых сварных соединений на стадии изготовления металлоконструкций, длительная эксплуа-

тация которых будет происходить в условиях атмосферы умеренного климата.

Материал и методика исследований. Исследования проводили на образцах стыковых сварных соединений конструкционной низколегированной стали 15ХСНД, 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 исследуемой стали, 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 стыковых сварных соединений размером 600×175 мм вырезали из горячекатаного листового проката толщиной 12 мм 12 категории в направлении проката. Стыковые сварные соединения получали двухсторонней односторонней автоматической сваркой пластин без разделки кромок (зазор по стыку — $0 \dots 1,0$ мм) под флюсом ОР 192 (фирмы «Oerlikon») проволокой Св-08Г1НМА диаметром 4 мм. Сварку проводили на обратной полярности от электрического выпрямителя ВСЖ-1600. Режимы сварки первого шва: $U = 55$ В, $I = 650 \dots 700$ А, $v = 26,7$ м/ч; второго (с противоположной стороны): $U = 57$ В, $I = 760 \dots 780$ А, $v = 26,7$ м/ч. Второй шов выполняли после полного охлаждения первого. Из каждой сварной пластины размером 600×350 мм изготавливали по 8 образцов размером 350×70 мм (рис. 1).

Усталостные испытания проводили на сервогидравлической машине УРС-20 при переменном растяжении с асимметрией цикла $R_\sigma = 0$ и частотой 5 Гц. Критерием завершения испытаний

служило полное разрушение образцов или превышение базы испытаний $2 \cdot 10^6$ циклов перемен напряжений.

Испытывали 4 серии образцов стыковых сварных соединений:

- образцы в исходном (неупрочненном) после сварки состоянии (первая серия);
- образцы, упрочненные технологией ВМП (вторая серия);
- образцы в неупрочненном состоянии после экспонирования при повышенной влажности в течение 1200 ч (третья серия);
- образцы, упрочненные ВМП, после экспонирования в условиях повышенной влажности в течение 1200 ч (четвертая серия).

Упрочнение сварных соединений технологией ВМП проводили установкой USTREAT-1.0, в которой ручной компактный ударный инструмент с пьезокерамическим преобразователем соединен с ультразвуковым генератором выходной мощностью 500 Вт. Поверхностному пластическому деформированию подвергали узкую зону перехода металла шва на зону термического влияния (линию сплавления). В качестве устройства для упрочнения использовали однорядную четырехбойковую насадку с диаметром бойков 3 мм. Скорость выполнения ВМП при обработке стыковых сварных соединений составляла 2 мм/с, амплитуда колебаний торца волновода ручного ударного инструмента 25 мкм.

Коррозионные испытания образцов 3 и 4 серии проводили в условиях, моделирующих атмосферу умеренного климата (в камере влаги при температуре 40 °С и влажности воздуха 98 %), в течение 1200 ч, что эквивалентно 12 годам эксплуатации (обоснование длительности испытаний и условия представлены в методике [16]).

После коррозионных испытаний методом оптической микроскопии изучали изменение состояния поверхностного слоя околошовной зоны стыковых сварных соединений в неупрочненном и упрочненном технологией ВМП состояниях. Металлографические шлифы исследовали на микроскопе НЕОРНОТ 32, цифровое изображение структуры получали с помощью цифровой камеры Olympus C5050. Микротвердость измеряли на микротвердомере М-400 фирмы LECO при нагрузке 50 г (0,49 Н).

Результаты исследований. Металлографическими исследованиями установлено следующее. Величина зерна, протяженность и микроструктура ЗТВ первого и второго сварных швов практически одинаковая. Непосредственно около поверхности сварного соединения зона крупного зерна (ЗКЗ) протяженностью около 0,8 мм содержит зерна № 5 (реже № 4 и № 6); величина зерен в зоне мел-

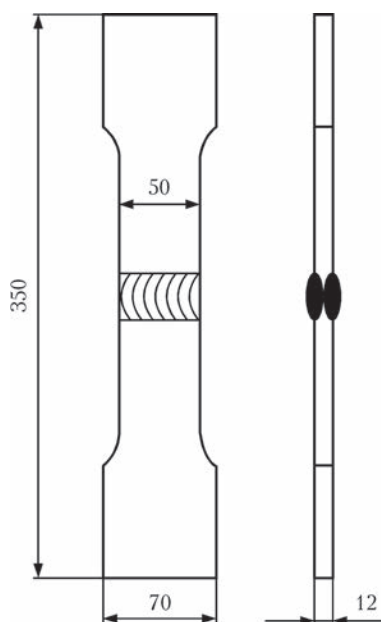


Рис. 1. Форма и геометрические размеры образцов стыкового сварного соединения

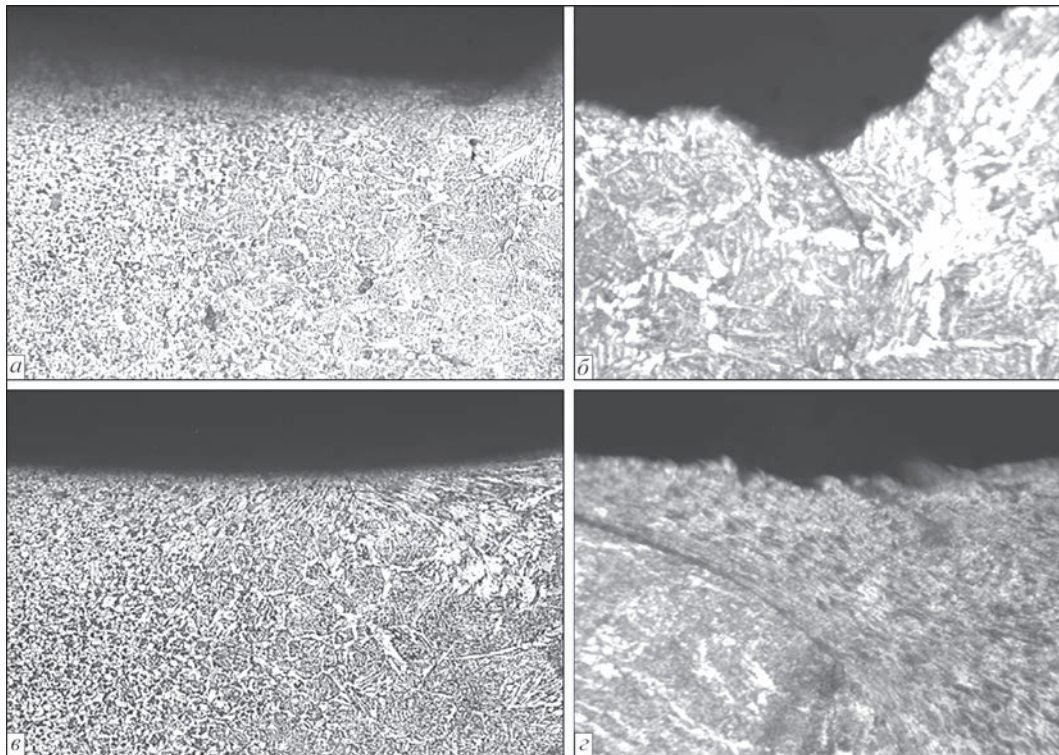


Рис. 2. Микроструктура поверхностного слоя металла ЗТВ неупрочненного (а, б) и упрочненного технологией ВМП (в, г) стыкового сварного соединения в исходном состоянии (а, в) и после коррозионных испытаний в условиях повышенной влажности в течение 1200 ч (б, г): а, в — ×156; б, г — ×400

кого зерна (ЗМЗ), длина которой около 1,3 мм — № 7–10 (рис. 2, а). На расстоянии около 2 мм от поверхности размер ЗКЗ увеличивается до 2 мм, а размер зерен — до № 3-4. Структура металла ЗКЗ в более глубоких от поверхности проката слоях — ферритная с плотно распределенными выделениями МАК-фазы (с упорядоченными пластинчатыми выделениями по типу верхнего бейнита с длиной отдельных пластинок около 108 мкм). Встречаются хаотически распределенные достаточно большие частички зернистого типа. Границы зерен оконтурены относительно широкими, до 5...8 мкм, прослойками межзеренного полигонального феррита. В поверхностных слоях ЗКЗ также наблюдались зерна феррита с плотно распределенной МАК-фазой по типу верхнего и нижнего бейнита, по границам которых расположены выделения полигонального феррита в виде более широких прослоек или цепочек отдельных зерен. Микротвердость металла поверхностных слоев ЗТВ первого и второго швов в исходном состоянии составляет $HV0,49$ — 168...223 (табл. 1).

После ВМП в зоне сплавления шва с основным металлом в поверхностных слоях металла шва и ЗТВ образовались практически одинаковые по размеру канавки, смещенные в ЗТВ или в металл шва. Глубина пластически деформированного слоя металла под канавкой составляла около 260...325 мкм (рис. 2, в). Интенсивная деформация (вытягивание) зерен наблюдалась как в более крупных зернах феррита с выделениями МАК-фазы и зернах феррита ЗТВ, свободных от выделений, так и в литых бейнитно-ферритных зернах шва. Деформированные зерна расположены под углом к поверхности металла по периметру канавки, коэффициент формы зерна равен $K_{\phi} = 8...20$ ($K_{\phi} = a/b$, где a и b , соответственно длина и ширина вытянутого зерна). Микротвердость пластически деформированного металла поверхностных слоев ЗТВ составляет $HV0,49$ — 177...232 (табл. 1), что на 8...10 % превышает микротвердость поверхностного слоя металла ЗТВ в исходном состоянии.

Таблица 1. Распределение микротвердости от поверхности вглубь металла ЗТВ стыковых сварных соединений стали 15ХСНД до и после обработки линии сплавления по технологии ВМП

Характеристика образцов, номер шва		l , мм	Микротвердость $HV0,49$
В исходном состоянии	первый шов	1,73	192; 201; 210; 192; 168; 182; 192; 185; 181
	второй шов		216; 223; 210; 210; 198; 192; 192; 197; 182
После обработки ВМП	первый шов	1,80	210; 210; 210; 210; 221; 208; 181; 183; 177
	второй шов		232; 232; 236; 232; 210; 203; 183; 192; 192

Примечание. l — расстояние от поверхности образца.

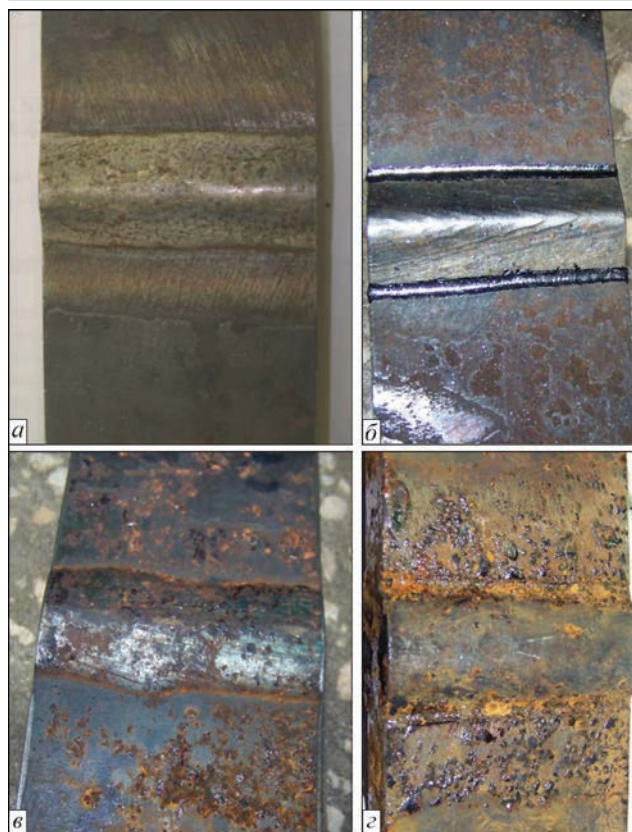


Рис. 3. Внешний вид образцов стыковых сварных соединений из стали 15XCHD в исходном (а, в) и упрочненном технологией ВМП (б, з) состояниях до (а, б) и после (в, з) коррозионных испытаний в условиях повышенной влажности в течение 1200 ч

После экспонирования в условиях повышенной влажности на поверхности как упрочненных, так и неупрочненных образцов образовался неравномерный слой продуктов коррозии (рис. 3). Поскольку усталостные трещины, как правило, образуются по линии сплавления, то исследовали коррозионные повреждения в зоне перехода металла шва на основной металл. В соответствии с ГОСТ 9.908 коррозия идентифицирована как сплошная неравномерная, основные виды коррозии в поверхностных слоях металла ЗТВ — коррозионные пятна и язвы разных размеров. В неупрочненных сварных соединениях глубина коррозионных язв в поверхностных слоях металла ЗТВ изменялась от 0,026 мм до 0,130 мкм, суммарная проекция площади повреждений составляла около 100 % (табл. 2). Кроме коррозионных язв в зоне сплавления выявлены локальные коррозионные повреждения в виде межкристаллитных

трещин (рис. 2, б). После обработки линии сплавления технологией ВМП отмечено уменьшение глубины коррозионных язв в области ЗТВ практически до нуля (табл. 2); выявлены межкристаллитные трещины с выходом на поверхность по линии сплавления шва с основным металлом (рис. 2, з).

Таким образом, обработка линии сплавления технологией ВМП способствовала повышению коррозионной стойкости (по размеру коррозионных дефектов) этой зоны. Уточнение происхождения межкристаллитных трещин в сварных соединениях до и после упрочнения требует дополнительных исследований.

Проведены механические испытания двух образцов стыковых сварных соединений поперечным сечением 25×12 мм на статическое кратковременное растяжение. Разрушение образцов произошло вдали от сварного шва и ЗТВ по основному металлу (рис. 4), полученные значения механических свойств сварных соединений соответствуют значениям для основного металла ($\sigma_T = 400$ МПа, $\sigma_B = 565$ МПа, $\delta_5 = 27$ %).

Результаты усталостных испытаний образцов стыкового сварного соединения стали 15XCHD всех серий представлены на рис. 5.

Большой разброс экспериментальных данных образцов сварных соединений в исходном состоянии (рис. 5, кривая 1), по-видимому, связан с технологией изготовления образцов: поскольку образцы сварных соединений получали резкой пластины 600×350 мм на заготовки под образцы размером 350×70 мм, уровень остаточных напряжений в образцах мог отличаться в зависимости от расположения в пластине (край, середина). Упрочнение сварных соединений технологией ВМП способствовало значительному снижению разброса экспериментальных данных (рис. 5, кривая 2). Циклическая долговечность образцов после упрочнения (вторая серия) увеличилась более чем в 40 раз, а предел ограниченной выносливости на базе $2 \cdot 10^6$ циклов повысился примерно на 46 % (от 187 до 273 МПа). Три упрочненных образца разрушились по основному металлу на расстоянии 15...50 мм от сварного шва, а три — по линии сплавления. Полученные результаты (рис. 5, кривые 1, 2) подтверждают, что применение технологии ВМП в качестве способа ППД металла соединений вблизи мест локализации усталостных повреждений существенно увеличивает ха-

Таблица 2. Размеры коррозионных повреждений поверхностных слоев металла шва и ЗТВ стыковых сварных соединений стали 15XCHD после экспонирования в условиях повышенной влажности в течение 1200 ч

Характеристика образцов	Размеры коррозионных повреждений поверхностных слоев			
	Металл шва		Металл ЗТВ	
	глубина, мм	степень поражения, %	глубина, мм	степень поражения, %
В исходном состоянии	0,039...0,104	19	0,026...0,130	100
После обработки ВМП	0,039...0,091	6,3	В пределах ошибки измерений	

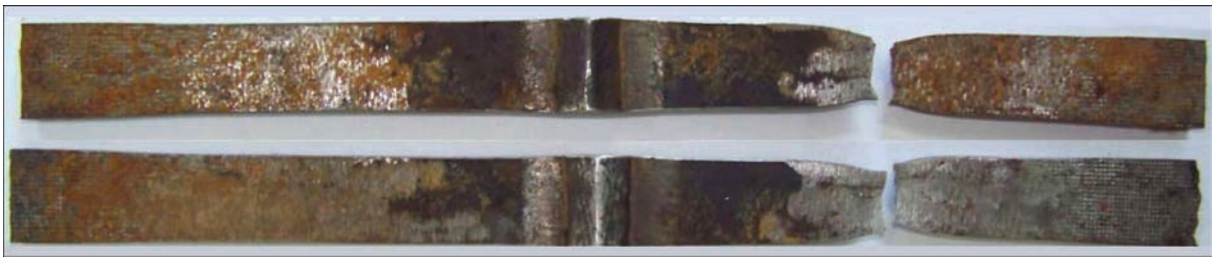


Рис. 4. Внешний вид образцов сварного соединения после испытаний на статическое растяжение

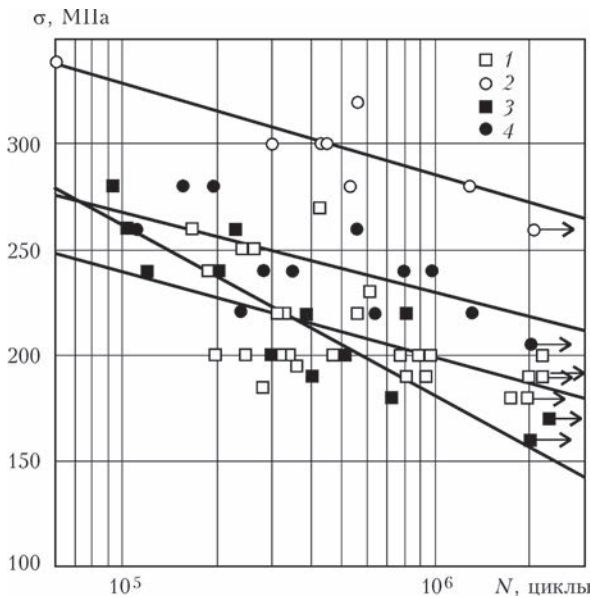


Рис. 5. Кривые усталости стыковых сварных соединений стали 15XCHD: 1, 2 — в исходном состоянии и после упрочнения технологией ВМП на воздухе, соответственно; 3, 4 — в исходном состоянии и после упрочнения технологией ВМП после коррозионных испытаний в условиях повышенной влажности в течение 1200 ч

рактеристики сопротивления усталости стыковых сварных соединений на воздухе (без коррозионных повреждений).

Выдержка неупрочненных образцов стыковых сварных соединений в условиях повышенной влажности на протяжении 1200 ч (третья серия) привела к снижению предела ограниченной выносливости на базе $2 \cdot 10^6$ циклов примерно на 16 % (от 187 до 157 МПа) и уменьшению циклической долговечности в диапазоне $4 \cdot 10^5 \dots 2 \cdot 10^6$ циклов в 2,5 раза (рис. 5, кривая 3). Коррозионное воздействие привело и к снижению предела ограниченной выносливости упрочненных ВМП соединений примерно на 20 % (от 273 до 219 МПа) (рис. 5, кривая 4). Однако полученные экспериментальные данные указывают на целесообразность упрочнения технологией ВМП стыковых сварных соединений металлоконструкций на стадии изготовления, которые в процессе эксплуатации будут подвергаться воздействию переменного нагружения и повышенной влажности, поскольку вследствие ВМП предел ограниченной выносливости на базе $2 \cdot 10^6$ циклов таких соединений по-

вышается на 39 % (со 157 до 219 МПа), а циклическая долговечность увеличивается до 9 раз.

Разрушение упрочненных ВМП сварных соединений, испытанных после экспонирования в условиях повышенной влажности, происходило как по ЗТВ, так и по основному металлу на расстоянии 15...60 мм от сварного шва. Следует отметить, что граница ограниченной выносливости упрочненных ВМП соединений даже после выдержки в камере влаги на протяжении 1200 ч на 17 % выше границы выносливости неупрочненных соединений, испытанных на воздухе.

Таким образом, экспериментально полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности применения технологии ВМП для повышения характеристик сопротивления усталости стыковых сварных соединений металлоконструкций, эксплуатируемых в условиях одновременного воздействия переменного нагружения и атмосферы умеренного климата (рис. 5, кривые 3, 4).

При этом следует отметить, что дополнительная защита упрочненного ВМП поверхностного слоя металла от прямого воздействия атмосферных условий (например, за счет использования лакокрасочных покрытий), возможно, позволит достичь максимальных характеристик сопротивления усталости таких соединений (рис. 5, кривая 2).

Выводы

1. Металлографическими исследованиями показано, что вследствие ВМП линии сплавления стыковых сварных соединений происходит интенсивная деформация (вытягивание) зерен металла шва и металла ЗТВ, при этом глубина пластически деформированного слоя металла под канавкой со значительными изменениями формы зерен (коэффициент формы зерна $K_{\phi} = 8 \dots 20$) составляет около 260...325 мкм. Установлено, что упрочнение технологией ВМП сварных соединений перед экспонированием в условиях повышенной влажности способствует повышению их коррозионной стойкости: уменьшению глубины коррозионных язв и степени поражения металла ЗТВ от 100 % практически до 0.

2. Подтверждено, что упрочнение линии сплавления технологией ВМП существенно повы-

шает характеристики сопротивления усталости сварных соединений стали 15ХСНД на воздухе: циклическая долговечность увеличивается более чем в 40 раз, а предел ограниченной выносливости на базе $2 \cdot 10^6$ циклов повышается на 46 %.

3. Установлена высокая эффективность применения технологии ВМП для повышения характеристик сопротивления усталости сварных соединений металлоконструкций, эксплуатируемых в условиях одновременного воздействия переменного нагружения и атмосферы умеренного климата. Упрочнение технологией ВМП стыковых сварных соединений стали 15ХСНД перед экспонированием в условиях повышенной влажности в течение 1200 ч приводит к увеличению циклической долговечности до 9 раз в зависимости от уровней прикладываемых напряжений и повышению предела ограниченной выносливости на базе $2 \cdot 10^6$ циклов на 39 %.

Список литературы

1. Методы повышения долговечности деталей машин / В. Н. Ткачев и др. – М.: Машиностроение, 1971. – 272 с.
2. Похмурский В. І., Хома М. С. Корозійна втома металів і сплавів. – Львів: СПОЛОМ, 2008. – 304 с.
3. Коломийцев Е. В. Коррозионноусталостная прочность тавровых соединений стали 12Х18Н10Т и методы ее повышения // Автоматическая сварка. – 2012. – № 12. – С. 41–43.
4. Hashemi B., Rezaee Yazdi M., Azar V. The wear and corrosion resistance of shot peened-nitride 316L austenitic stainless steel // Materials and Design. – 2011. – № 32. – P. 3287–3292.
5. Effect of high frequency mechanical impact treatment on fatigue strength of welded 1300 MPa yield strength steel / E. Harati et al. // International Journal of Fatigue. – 2016. – Vol. 92. – P. 96–106.
6. Панин В. Е., Каблов Е. Н., Плешанов В. С. Влияние ультразвуковой ударной обработки на структуру и сопротивление усталости сварных соединений высокопрочной стали ВКС-12 // Физическая мезомеханика. – 2006. – № 2. – С. 85–96.
7. Influence of surface topography and needle size on surface quality of steel plates treated by ultrasonic peening / Y. Feng et al. // Vacuum. – 2016. – Vol. 132. – P. 22–30.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. Enhancement of the fatigue strength of underwater wet welds by grinding and ultrasonic impact treatment / W. Gao et al. // Journal of Materials Processing Technology. – 2015. – Vol. 223. – P. 305–312.
12. Сопротивление коррозионной усталости сварных соединений, упрочненных высокочастотной механической проковкой / В. В. Кныш и др. // Автоматическая сварка. – 2008. – № 4. – С. 5–8.
13. 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.
14. Влияние коррозионных повреждений на циклическую долговечность тавровых сварных соединений, обработанных высокочастотной механической проковкой / В. В. Кныш и др. // Автоматическая сварка. – 2016. – № 9. – С. 46–51.
15. Fan Y., Zhao X., Liu Y. Research on fatigue behavior of the flash welded joint enhanced by ultrasonic peening treatment // Materials and Design. – 2016. – Vol. 94. – P. 515–522.
16. Встановити закономірності підвищення високочастотним проковуванням корозійної стійкості і опору корозійній втомі зварних з'єднань трубопроводів і мостових конструкцій: звіт про НДР (заключний) / Інститут електросварювання ім. Є. О. Патона; кер. В. І. Кір'ян, А. О. Рибаків. – 3,28/33; № держ. реєстрації 0112U000615. – Київ, 2016. – Т. 2. – 203 с.

В. В. Кныш, С. О. Соловей, В. І. Кир'ян,
Л. І. Ниркова, С. О. Осадчук

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

ЗАСТОСУВАННЯ ВИСОКОЧАСТОТНОЇ ПРОКОВКИ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТИКОВИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ В УМОВАХ АТМОСФЕРИ ПОМІРНОГО КЛІМАТУ

У роботі представлено результати досліджень ефективності застосування високочастотної механічної проковки (ВМП) для підвищення характеристик опору втомі стикових зварних з'єднань металоконструкцій, які експлуатуються в умовах атмосфери помірного клімату. Металографічними дослідженнями показано, що обробка за технологією ВМП зони сплавлення стикового зварного з'єднання сталі 15ХСНД перед експонуванням в умовах підвищеної вологості сприяла підвищенню корозійної стійкості цієї зони: зменшенню глибини корозійних виразок і ступеня ураження металу ЗТВ від 100 % практично до 0. Проведені випробування на втому зварних з'єднань у вихідному і зміцненому ВМП станах до та після експонування в умовах підвищеної вологості і температури. Встановлено, що зміцнення технологією ВМП стикових зварних з'єднань сталі 15ХСНД перед експонуванням дозволяє підвищити межу обмеженої витривалості на базі $2 \cdot 10^6$ циклів на 39 % і збільшити циклічну довговічність до 9 разів. Бібліогр. 16, табл. 2, рис. 5.

Ключові слова: стикове зварне з'єднання, втома, високочастотна механічна проковка, підвищена вологість

Поступила в редакцію 21.02.2017