

# ВЛИЯНИЕ КОРРОЗИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ НА ЦИКЛИЧЕСКУЮ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ТАВРОВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ОБРАБОТАННЫХ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОКОВКОЙ

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

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

В работе изучена эффективность применения высокочастотной механической проковки для повышения характеристик сопротивления усталости тавровых сварных соединений металлоконструкций, которые эксплуатируются в условиях морского климата. Коррозионные повреждения, характерные для таких конструкций после длительной эксплуатации, получали выдержкой сварных соединений в камере соляного тумана КСТ-1 на протяжении 1200 ч. Проведены металлографические исследования зоны сварного шва и зоны термического влияния сварных соединений в исходном (неупрочненном) и упрочненном технологией высокочастотной механической проковки состояниях после воздействия коррозионной среды. Установлено, что упрочнение данной технологией не повышает стойкость соединений к воздействию нейтрального соляного тумана. Проведены испытания на усталость сварных соединений в исходном и упрочненном состояниях после влияния нейтрального соляного тумана. Установлено, что упрочнение высокочастотной механической проковкой тавровых сварных соединений до коррозионного воздействия позволяет повысить их предел ограниченной выносливости на базе  $2 \cdot 10^6$  циклов на 48 % и увеличить циклическую долговечность в 2...5 раз. Библиогр. 19, табл. 1, рис. 6.

*Ключевые слова:* тавровое сварное соединение, нейтральный соляной туман, усталость, высокочастотная механическая проковка, ультразвуковая ударная обработка, повышение сопротивления коррозионной усталости

Для повышения коррозионной стойкости металлов и сплавов широко используются различные обработки их поверхностного слоя, способствующие изменению структуры, повышению твердости, снятию остаточных напряжений растяжения и наведению остаточных напряжений сжатия, уменьшению концентрации напряжений. Статьи последних лет по данной тематике посвящены как изучению технологических особенностей упрочнения поверхности традиционными методами пластического деформирования металла (например, дробеструйной обработкой), так и исследованию новых обработок [1–5]. В сравнении с такими затратными и малопроизводительными обработками, как оплавление поверхности наноимпульсирующим лазером [3] или импульсирующим электронным лучом высокой мощности [4], притирка стальными шариками с применением вакуумной камеры [5], обжатие в холодном или горячем состоянии [6–8], применение высокочастотной механической проковки [9, 10] имеет ряд преимуществ. Компактность, мобильность и низкая стоимость оборудования для высокочастотной механической проковки (ВМП) позволяет проводить упрочнение деталей машин и металлоконструкций в любых пространственных положениях, в полевых условиях, в том числе под водой [11]. В работах [12–15] приведены результаты экспериментальных иссле-

ований эффективности применения технологии ВМП, известной в зарубежной литературе как «ультразвуковая ударная обработка», для повышения коррозионной стойкости и характеристик сопротивления коррозионной усталости сварных соединений. В данных работах оценку коррозионной стойкости, скорости коррозии и коррозионной усталости сварных соединений проводили в растворах NaCl. Из анализа поляризационных кривых установлено, что упрочнение технологией ВМП увеличивает потенциал коррозии и уменьшает скорость коррозии зоны проковки (линии перехода металла шва в зону термического влияния). При этом циклическая долговечность стыковых сварных соединений труб увеличивается в 2 раза, а тавровых — до 6 раз. Следует отметить, что приведенные выше данные ускоренных коррозионных испытаний не дают представления о снижении эксплуатационных свойств обработанных ВМП сварных соединений по мере разрушения упрочненного слоя металла. Влияние частичного коррозионного уноса упрочненного ВМП слоя металла на поля остаточных напряжений и циклическую долговечность сварных соединений рассмотрено в работах [16, 17]. Так, в работе [16] показано, что коррозионные повреждения сварных соединений низколегированной судостроительной стали, эквивалентные 7,5 годам эксплуатации, приводят к

уменьшению толщины поверхностного слоя металла с наведенными остаточными напряжениями сжатия примерно от 1,5 до 1,0 мм) и уменьшению их максимального уровня. Авторами сделан вывод о целесообразности обработки сварных соединений технологией ВМП, поскольку в зоне проковки вместо остаточных сварочных напряжений растяжения наводятся остаточные напряжения сжатия, и они сохраняются даже при частичном уносе упрочненного слоя. В работе [17] металлографическими исследованиями установлено, что выдержка сварных соединений атмосферостойкой стали в камере влаги Г4 при повышенных температуре и влажности на протяжении 1200 ч приводит к частичному разрушению упрочненного слоя металла вследствие образования коррозионных каверн. Экспериментальные данные, полученные на тавровых сварных соединениях после коррозионного воздействия, показывают, что предварительное упрочнение технологией ВМП повышает предел ограниченной выносливости на базе  $2 \cdot 10^6$  циклов таких соединений примерно на 48 %, а циклическую долговечность увеличивает в 6...8 раз. В отличие от низколегированных сталей, выдержка образцов нержавеющей сталей в агрессивных средах на протяжении 1000 ч не приводит к существенному разрушению упрочненного слоя металла [18, 19]. Таким образом, результаты работ [16–19] показывают, что установление характеристик сопротивления усталости сварных соединений при значительном повреждении (коррозионном уносе) упрочненного ВМП слоя металла является актуальной задачей. Существенные коррозионные повреждения можно получить предварительной выдержкой сварных соединений в камере соляного тумана, которая позволяет имитировать эксплуатацию металлоконструкций в условиях морского климата.

Цель настоящей работы — оценить характеристики сопротивления усталости упрочненных технологией ВМП тавровых сварных соединений, после выдержки в среде нейтрального соляного тумана.

**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  $-70$  до  $45$  °С.

Заготовки под образцы сварных соединений вырезали из горячекатаного листового проката толщиной 12 мм 12 категории. Размер заготовок под тавровые соединения составлял  $350 \times 70$  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. Корневой шов (первый слой) выполняли электродами диаметром 3 мм, а облицовочный шов (второй слой) — 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.

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. Образцы испытывали в исходном и упрочненном ВМП состоянии после выдержки в коррозионной среде.

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 в зону термического влия-

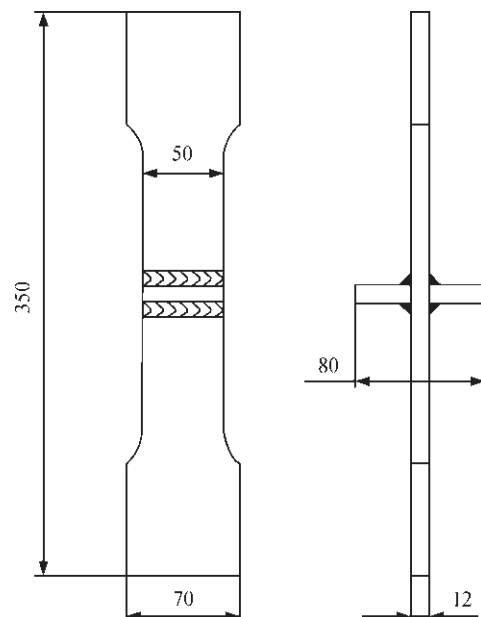


Рис. 1. Форма и геометрические размеры образцов таврового сварного соединения

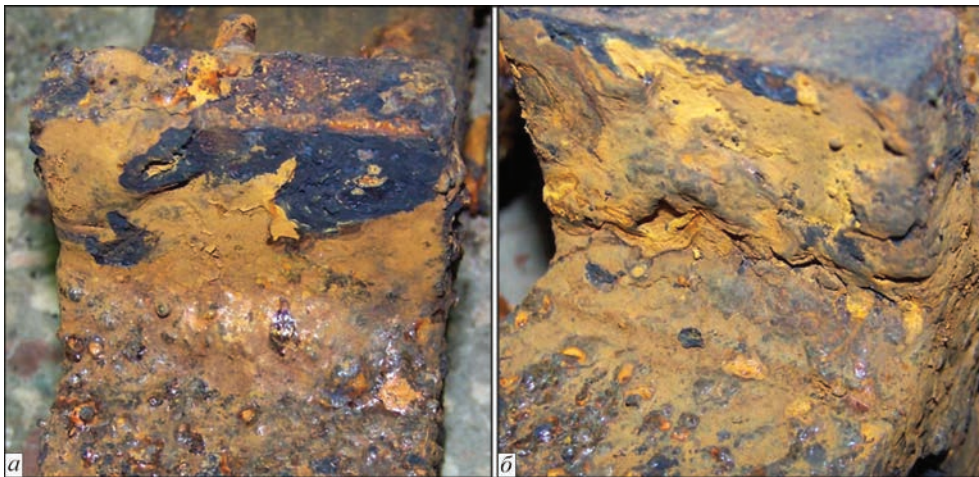


Рис. 2. Внешний вид зоны шва таврового сварного соединения в исходном (а) и упрочненном технологией ВМП (б) состояниях после влияния нейтрального соляного тумана в течение 1200 ч

ния (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, а амплитуда колебаний торца волновода ручного ударного инструмента — 25 мкм.

Для получения предварительных коррозионных повреждений сварные образцы помещали в камеру КСТ-1. Исследования проводили по ГОСТ 9.401–91 «ЕСЗКС. Покрытия лакокрасочные. Общие требования и методы ускоренных испытаний на стойкость к воздействию климатических факторов (метод 1, Б)» в камере соляного тумана КСТ-1 при температуре  $(35 \pm 2)^\circ\text{C}$  при распылении раствора хлорида натрия 15 мин через каждые 45 мин исследований. Концентрация хлорида натрия в растворе  $(50 \pm 5) \text{ г/дм}^3$ ,  $\text{pH}$  — от 6,5 до 7,2, плотность —  $1,03 \text{ г/см}^3$ . Электропроводность дистиллированной воды для приготовления раствора хлорида натрия — не более  $20 \text{ мкСм/см}$  при температуре  $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$ . Продолжительность пребывания сварных образцов в условиях влияния нейтрального соляного тумана составляла 1200 ч.

Металлографические исследования поверхностного слоя металла шва и зоны термического влияния (ЗТВ) тавровых сварных соединений после выдержки в камере КСТ-1 проводили на образцах в исходном (неупрочненном) и упрочненном технологией ВМП состояниях. Результаты металлографических исследований поверхностного слоя металла шва и ЗТВ аналогичных сварных соединений в исходном и упрочненном технологией ВМП состояниях до коррозионного влияния приведены в работе [17].

**Результаты исследований.** После выдержки в камере соляного тумана на протяжении 1200 ч образцы покрывались слоем продуктов коррозии до 1...2 мм (рис. 2). В поверхностных слоях металла шва таврового сварного соединения в неупрочнен-

ном состоянии после выдержки в камере соляного тумана наблюдаются достаточно протяженные коррозионные повреждения в виде пятен и каверн размерами  $1,95 \times 0,65$ ,  $4,16 \times 0,26$ ,  $2,73 \times 0,195$  мм. В металле ЗТВ коррозионные повреждения менее протяженные, но более глубокие размерами до  $0,56 \times 0,52$  и  $1,3 \times 0,65$  мм. Коррозионные повреждения в поверхностных слоях ЗТВ расположены преимущественно по границе сплавления зоны крупного зерна (ЗКЗ) и в некоторых случаях заполнены продуктами коррозии (рис. 3).

После упрочнения ВМП под канавкой сформировались пластически деформированные слои металла шва шириной 1,7...1,82 мм и металла ЗТВ шириной 1,3...1,7 мм. При этом их глубина, обусловленная видимыми изменениями структуры металла под канавкой, до помещения в камеру КСТ составляла 390...650 мкм. После выдерж-

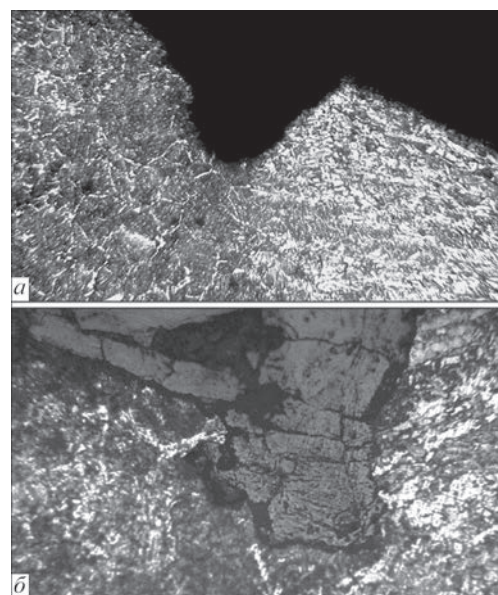


Рис. 3. Коррозионные каверны в поверхностном слое металла зоны крупного зерна таврового сварного соединения после влияния нейтрального соляного тумана в течение 1200 ч: а —  $\times 100$ , б —  $\times 250$

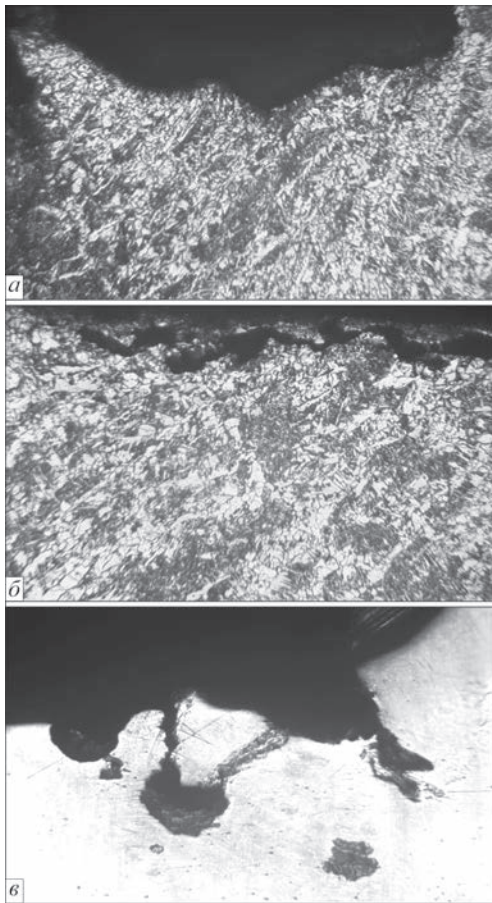


Рис. 4. Коррозионные повреждения упрочненного ВМП поверхностного слоя металла таврового сварного соединения после влияния нейтрального соляного тумана в течение 1200 ч:  $\times 100$  (а, б),  $\times 250$  (в)

ки образцов тавровых сварных соединений в камере КСТ-1 ширина упрочненного слоя металла уменьшилась до 0,52...1,3 мм, а глубина — до 65...455 мкм. На отдельных участках обнаружены лишь следы упрочненного ВМП слоя металла шириной 0,52 мм и глубиной 65...91 мкм, расположенные или в металле шва, или в металле ЗТВ, что свидетельствует о практически полном разрушении (уносе) упрочненного слоя.

В упрочненных поверхностных слоях металла угловых швов и ЗТВ сварных соединений после выдержки в КСТ по границе сплавления выявлены каверны в металле шва 2,6 $\times$ 0,26 мм, 2,08 $\times$ 0,65 мм, а в металле ЗТВ — размерами 1,69 $\times$ 0,65 мм, 0,36 $\times$ 0,78 мм. Характерные коррозионные повреждения упрочненного поверхностного слоя ме-

талла: коррозия пятнами с разной глубиной проникновения (рис. 4, а); поверхностная коррозия на глубину от 0,02 до 0,13 мм (рис. 4, б); сложные коррозионные повреждения, которые представляет собой каверны, переходящие в питтинги, и коррозионные трещины, переходящие в каверны, заполненные продуктами коррозии (рис. 4, 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 коррозионных пятен в поверхностном слое металла шва и металла ЗТВ для сварных соединений в исходном и упрочненном технологией ВМП состояниях практически одинаковая и составляет 0,65 и 0,78 мм, соответственно. Таким образом, упрочнение технологией ВМП не приводит к повышению коррозионной стойкости образцов тавровых сварных соединений в условиях влияния нейтрального соляного тумана.

Результаты усталостных испытаний образцов таврового сварного соединения стали 15ХСНД после выдержки в камере соляного тумана КСТ-1 представлены на рис. 5, там же приведены экспериментальные данные, полученные в работе [17] на идентичных сварных соединениях без коррозионных повреждений.

Выдержка образцов тавровых сварных соединений в камере соляного тумана на протяжении 1200 часов приводит к снижению пределов ограниченной выносливости на базе  $2 \cdot 10^6$  циклов неупрочненных сварных соединений на 25 % (со 180 до 135 МПа), а упрочненных технологией ВМП — примерно на 24,5 % (с 265 до 200 МПа). Применение технологии ВМП в качестве способа поверхностного пластического деформирования металла соединений вблизи мест локализации усталостных повреждений повышает характеристики сопротивления усталости тавровых сварных соединений, как на воздухе, так и при наличии коррозионных сред. Результаты, полученные на сварных соединениях после коррозионного воздействия (кривые 2 и 4, рис. 5), показывают, что предварительное упрочнение технологией ВМП по-

Размеры коррозионных повреждений в поверхностных слоях металла швов и зоны термического влияния тавровых сварных соединений стали 15ХСНД после выдержки 1200 ч в камере соляного тумана

Состояние образцов	Коррозия пятнами поверхностных слоев металла шва			Коррозия пятнами поверхностных слоев металла ЗТВ		
	Степень поражения, %	Глубина поражения, мм	Сумма проекции площади поражения, мм	Степень поражения, %	Глубина поражения, мм	Сумма проекции площади поражения, мм
Без упрочнения	50,4	0,039...0,65	26,52	64,0	0,065...0,65	9,78
Упрочненные ВМП	72,0	0,075...0,65	40,10	62,5	0,065...0,78	10,00

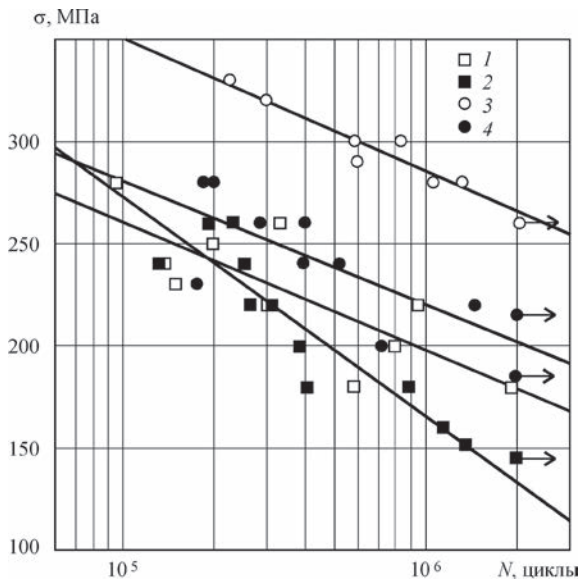


Рис. 5. Кривые усталости тавровых сварных соединений стали 15XCHD: 1, 3 — в исходном и упрочненном технологией ВМП состояниях на воздухе, соответственно [17]; 2, 4 — в исходном и упрочненном технологией ВМП состояниях после влияния нейтрального соляного тумана в течение 1200 ч соответственно

вышает предел ограниченной выносливости на базе  $2 \cdot 10^6$  циклов таких соединений примерно на 48 % (со 135 до 200 МПа), а циклическую долговечность увеличивает в 2...5 раз. Следует отметить, что разрушение неупрочненных сварных соединений после выдержки в камере КСТ-1 происходило по линии перехода металла шва к металлу ЗТВ (рис. 6, а), а упрочненных ВМП — вдали от сварного шва и ЗТВ, преимущественно около захватной части (рис. 6, б). Такое разрушение свидетельствует о сопоставимости характеристик сопротивления усталости упрочненного ВМП сварного соединения и основного металла с коррозионными повреждениями.

Таким образом, экспериментально полученные результаты свидетельствуют о целесообразности применения технологии ВМП для повышения характеристик сопротивления усталости тавровых сварных соединений металлоконструкций, эксплуатируемых в условиях воздействия переменного нагружения и морского климата (кривые 2 и 4, рис. 5). Несмотря на коррозионный унос основной части упрочненного слоя металла разрушение сварных соединений происходит по основному металлу от поверхностных коррозионных повреждений. При этом следует отметить, что защита упрочненного ВМП поверхностного слоя металла от прямого воздействия агрессивных сред, а соответственно от коррозионных повреждений (например, за счет использования лакокрасочных покрытий) позволит достичь максимальных характеристик сопротивления усталости соединений (кривая 1, рис. 5).

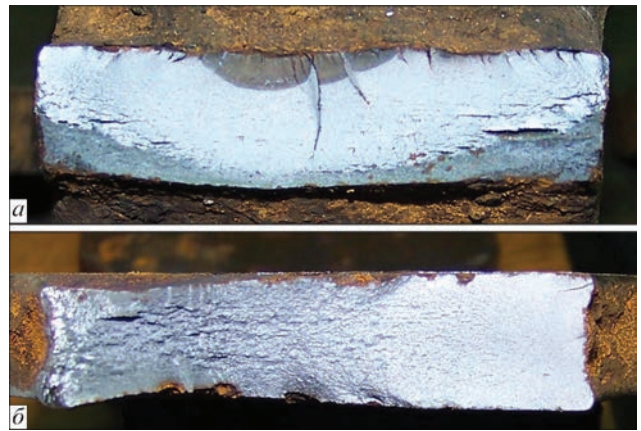


Рис. 6. Общий вид поверхности разрушения тавровых сварных соединений в исходном (а) и упрочненном технологией ВМП (б) состояниях после коррозионного воздействия и испытаний на усталость

### Выводы

1. Приведены результаты металлографической оценки поверхностных слоев металла шва и зоны термического влияния сварных соединений в исходном (неупрочненном) и упрочненном технологией ВМП состояниях после воздействия нейтрального соляного тумана. Установлено, что упрочнение технологией ВМП не приводит к повышению стойкости соединений к воздействию нейтрального соляного тумана.

2. Установлена высокая эффективность применения технологии ВМП для повышения характеристик сопротивления усталости сварных соединений металлоконструкций, работающих в условиях морского климата. Упрочнение технологией ВМП тавровых сварных соединений стали 15XCHD перед выдержкой в камере нейтрального соляного тумана на протяжении 1200 часов приводит к увеличению циклической долговечности в 2...5 раз в зависимости от уровней прикладываемых напряжений и повышению предела ограниченной выносливости на базе  $2 \cdot 10^6$  циклов на 48 %.

3. Показано, что разрушение неупрочненных сварных соединений после выдержки в камере КСТ-1 происходит по линии перехода металла шва к металлу ЗТВ, а упрочненных ВМП — вдали от сварного шва и ЗТВ, преимущественно около захватной части (по основному металлу). Такое разрушение свидетельствует о сопоставимости характеристик сопротивления усталости упрочненного ВМП сварного соединения и основного металла с коррозионными повреждениями.

- Ahmed A. A. Effect of shot peening parameters and hydroxyapatite coating on surface properties and corrosion behavior of medical grade AISI 316L stainless steel / Ayman A. Ahmed, M. Mhaede, M. Basta [et al.] // Surface & Coating Technology. – 2015. – Vol. 280. – P. 347–358.
- Zhiming L. Effect of high energy shot peening pressure on the stress corrosion cracking of the weld joint of 304

- austenitic stainless steel / L. Zhiming, S. Laimin, Z. Shenjin [et al.] // Materials Science and Engineering: A. – 2015. – Vol. 637. – P. 170–174.
3. Pacquentin W. Effect of microstructure and chemical composition on localized corrosion resistance of a AISI 304L stainless steel after nanopulsed-laser surface melting / W. Pacquentin, N. Caron, R. Oltra // Applied Surface Science. – 2015. – Vol. 356. – P. 561–573.
  4. Hao S. Improving corrosion and wear resistance of FV520B steel by high current pulsed electron beam surface treatment / S. Hao, L. Zhao, Y. Zhang, H. Wang // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2015. – Vol. 356–357. – P. 12–16.
  5. Balusamy T. Influence of surface mechanical attrition treatment (SMAT) on the corrosion behaviour of AISI 304 stainless steel / T. Balusamy, T.S.N. Sankara Narayanan, K. Ravichandran, Song Park, Min Ho Lee // Corrosion Science. – 2013. – Vol. 74. – P. 332–344.
  6. Effect of cold working and sandblasting on the microhardness, tensile strength and corrosion resistance of AISI 316L stainless steel / Suyitno, B. Arifvianto, T. D. Widodo [et al.] // International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. – 2015. – V. 19. – P. 1093–1099.
  7. 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 [et al.] // Surface & Coating Technology. – 2014. – Vol. 259. – P. 448–455.
  8. Похмурський В. І. Корозійна втома металів і сплавів / В. І. Похмурський, М. С. Хома. – Львів: СПОЛЮМ, 2008. – 304 с.
  9. Improvement of fatigue resistance of welded joints in metal structures by high-frequency mechanical peening (Review) / L. M. Lobanov, V. I. Kirian, V. V. Knysh [et al.] // The Paton welding journal. – 2006. – № 9. – С. 2–8.
  10. Malaki M. A review of ultrasonic peening treatment / M. Malaki, H. Ding // Materials and Design. – 2015. – Vol. 87. – P. 1072–1086.
  11. Enhancement of the fatigue strength of underwater wet welds by grinding and ultrasonic impact treatment / W. Gao, D. Wang, F. Cheng [et al.] // Journal of Materials Processing Technology. – 2015. – Vol. 223. – P. 305–312.
  12. Abdulah A. Strength enhancement of the welded structures by ultrasonic peening / A. Abdulah, M. Malaki, A. Eskandari // Materials & Design. – 2012. – Vol. 38. – P. 7–18.
  13. Повышение сопротивления усталости и коррозионной стойкости сварных соединений ультразвуковой ударной обработкой и электроискровым легированием / Г. И. Прокопенко, Б. Н. Мордюк, В. В. Кныш [и др.] // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2014. – № 3. – С. 34–40.
  14. Daavary M. Corrosion fatigue enhancement of welded steel pipes by ultrasonic impact treatment / M. Daavary, S. A. Sadough Vanini // Materials Letter. – 2015. – Vol. 139. – P. 462–466.
  15. Daavari M. The effect of ultrasonic peening on service life of the butt-welded high-temperature steel pipes / M. Daavari, S. A. Sadough Vanini // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2015. – Vol. 24. – P. 3658–3665.
  16. Ahmad B. Effect of ultrasonic peening and accelerated corrosion exposure on residual stress distribution in welded marine steel / B. Ahmad, M. E. Fitzpatrick // Metallurgical and materials transactions A. – 2015. – Vol. 46. – P. 1214–1226.
  17. Повышение высокочастотной механической проковкой циклической долговечности тавровых сварных соединений в условиях умеренного климата / В. В. Кныш, С. А. Соловей, А. А. Кадышев [и др.] // Автоматическая сварка. – 2016. – № 3. – С. 19–24.
  18. Effect of ultrasonic impact peening on the corrosion of ferritic-martensitic steels in supercritical water / Z. Dong, Z. Liu, M. Li [et al.] // Journal of Nuclear Materials. – 2015. – № 457. – С. 266–272.
  19. Nasiłowska B. Shot peening effect on 904 L welds corrosion resistance / B. Nasiłowska, Z. Bogdanowicz, M. Wojucki // Journal of Constructional Steel Research. – 2015. – Vol. 115. – P. 276–282.

Поступила в редакцию 22.02.2016



## IV Международная конференция «Нанотехнологии»

24–27 октября 2016 г.

г. Тбилиси, Грузия

### Организатор:

Грузинский технический университет

### Тематика

Конференция посвящена методам синтеза наноматериалов, изучению их структуры, химических, физических и технологических свойств в следующих направлениях:

- ◆ нанотехнологии ◆ нанофизика ◆ нанохимия ◆ нанобиология и наномедицина
- ◆ наноматериаловедение ◆ наноинженерия ◆ нанобезопасность ◆ нанообразование

[http:// nano2016.gtu.ge/](http://nano2016.gtu.ge/)