

# ПОВЫШЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ И КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ УДАРНОЙ ОБРАБОТКОЙ И ЭЛЕКТРОИСКРОВОМ ЛЕГИРОВАНИЕМ

Г. И. ПРОКОПЕНКО<sup>1</sup>, Б. Н. МОРДЮК<sup>2</sup>, В. В. КНЫШ<sup>2</sup>, С. А. СОЛОВЕЙ<sup>2</sup>, Т. В. ПОПОВА<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ин-т металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАНУ. 03680, г. Киев, ГСП, бульвар Академика Вернадского, 36.

E-mail: bogachuk@imp.kiev.ua

<sup>2</sup>ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев, ГСП, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>3</sup>ГП «УкрНИИ вагоностроения». 39621, г. Кременчуг, ул. И. Приходько, 33. E-mail: kaplja\_87@mail.ru

Для увеличения ресурса сварных конструкций с помощью ультразвуковой ударной обработки (УЗУО) создано новое портативное оборудование с использованием цифровой регулировки электрических параметров ультразвукового генератора с выходной мощностью до 650 Вт и частотой около 27 кГц. Испытания на усталость образцов низколегированных конструкционных сталей показали существенное увеличение циклической долговечности после УЗУО сварных швов. Данная обработка снижает также коррозию соединений за счет образования в поверхностном слое мелкозернистой структуры и сжимающих напряжений. Предложен метод дополнительного увеличения долговечности сварных соединений при испытаниях в 3%-ном водном растворе NaCl, заключающийся в последовательном использовании УЗУО и электроискрового легирования зоны шва хромом. Библиогр. 20, табл. 2, рис. 5.

*Ключевые слова:* ультразвуковая ударная обработка, ультразвуковой генератор, низколегированные конструкционные стали, сварные соединения, усталость, коррозия, электроискровое легирование

Основными факторами, которые ограничивают долговечность разнообразных промышленных изделий, являются износ, коррозия и усталость металлов. Разрушение, как правило, начинается с рабочих поверхностей изделий, которые подвергаются внешним температурно-силовым влияниям, действию агрессивных сред или циклической нагрузке. В настоящее время создано большое количество способов модификации поверхностей деталей и элементов конструкций. К упрочняющим обработкам относятся способы поверхностной пластической деформации (ППД): традиционная дробеструйная обработка, обкатка поверхности шариками или роликами и др. Используют для этой цели также энергию УЗ колебаний. Высоко-частотные удары стержневых деформирующих элементов небольшой массы (3...5 г), инициируемые мощным ультразвуком, приводят к существенным изменениям структуры поверхностного слоя металлов и сплавов [1–3]. Данная технология известна в мире как УЗ ударная обработка (УЗУО) или Ultrasonic Impact Treatment. С учетом того, что ударные элементы (бойки) принудительно колеблются в небольшом зазоре (примерно 0,01...0,02 мм) между концентратором УЗ колебаний и обрабатываемой поверхностью с частотой около 1...2 кГц, в литературе встречается также термин «высокочастотная механическая проковка (ВМП)» [4].

Известно, что прочность сварного соединения незначительна в результате изменения структуры при расплавлении металла, появления концентраторов напряжений и дефектов, а также возникновения растягивающих напряжений в зоне шва при его затвердевании. Если они складываются с внешними циклическими нагрузками, наступит преждевременное усталостное разрушение в зоне соединения, которое иногда приводит к катастрофическим последствиям. Растягивающие напряжения можно снизить нагреванием деталей, но для больших конструкций, как правило, применяют локальные методы обработки сварных соединений. Исследования показали, что УЗУО приводит к наиболее существенному снижению опасных растягивающих напряжений в зоне сварного шва и к повышению усталостной прочности образцов и элементов конструкций в сравнении с другими методами обработки [5–7]. Технология УЗУО зарекомендовала себя в мире как перспективная для увеличения ресурса сварных конструкций наряду с улучшением условий труда, экономичностью и другими преимуществами. Однако развитие этого направления в Украине сдерживалось отсутствием промышленного производства УЗ оборудования. В то же время здесь были созданы опытные образцы УЗ генераторов и ударных инструментов, а разработки способов и устройств защищены патентами [8, 9].



Цель данной работы состояла в создании нового УЗ оборудования, которое должно отвечать современному уровню разработок в использовании мощного ультразвука (до 2 кВт) и достижений в отрасли цифровых и микропроцессорных электронных технологий. В качестве излучателей ультразвука использовали высокодобротные пьезокерамические преобразователи с высоким КПД и малыми электрическими потерями. Созданное оборудование прошло опытную проверку в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины при обработке образцов низколегированных сталей, которые были испытаны на усталость, в том числе и в коррозионной среде. Поэтому основной задачей работы было повышение усталостной прочности и коррозионной стойкости сварных соединений методом УЗУО.

**Разработка оборудования для УЗУО.** Многолетний опыт применения УЗ обработки металлов для упрочнения поверхности позволяет сформулировать основные требования к УЗ излучателю и к ударному инструменту. Достижения последних лет в области создания современных высокоэффективных пьезокерамических материалов позволили отказаться от громоздких магнитострикционных источников УЗ колебаний, что дало толчок к последующему совершенствованию и созданию принципиально новых излучателей на основе пьезокерамических преобразователей большой мощности [10, 11]. Внедрение современных пьезоэлектрических преобразователей, которые имеют более чем в два раза больший КПД за счет высокой добротности, дало возможность отказаться от систем жидкостного охлаждения и уменьшить габариты и массу оборудования в несколько раз. Особенно это важно для переносных приборов, которые работают в полевых, иногда очень сложных условиях. В то же время была повышена частота УЗ колебаний с 22 до 27 кГц. Такое повышение частоты практически не влияет на технические характеристики оборудования для УЗУО, однако значительно уменьшает его общую массу примерно на 30 %. Задачей разработчиков было создание генераторов частотой 27 кГц с сохранением амплитуды колебаний торца волновода (концентратора УЗК) на уровне 20...25 мкм и массой инструмента не более 2,5 кг. Одним из основных преимуществ УЗ ударного инструмента, например, в сравнении с пневмодинамическим, является снижение вредных для организма человека шумов и вибраций его корпуса. Испытания, проведенные в Государственном НИИ «Гидро-

прибор» (г. Киев), показали, что шумы в УЗ и звуковом диапазоне частот не превышают допустимых норм, принятых в ГОСТ 12.1.001–89.

Использование новейших электронных технологий и современной элементной базы позволило создать компактный УЗ генератор (УЗГ) с габаритами 295×215×105 мм, массой 4,5 кг и мощностью до 650 Вт на частоте 27 кГц. Масса прибора с УЗ ударным инструментом составляет 6,2 кг (рис. 1). В нем использована полная автоматизация подстройки параметров УЗГ и защита электронной схемы от перегрузок.

**Материалы и методики испытаний.** В качестве сплавов на основе железа для исследований были выбраны низколегированные стали 20ГЛ и 15ХСНД. При малом содержании дорогих легирующих элементов они имеют невысокую стоимость и достаточную прочность наряду с высокой пластичностью. Данные стали характеризуются значительным сопротивлением усталости, а также высокими технологическими свойствами – они хорошо обрабатываются давлением и резанием, имеют хорошую свариваемость. Низкоуглеродистую сталь марки 20ГЛ применяют для изготовления ответственных литых деталей подвижного состава железнодорожного транспорта. Сталь 15ХСНД имеет более высокие механические свойства и применяется преимущественно при строительстве мостов.

Химический состав сталей и их механические свойства приведены в табл. 1 и 2.

Испытания на усталость круглых галтельных образцов по американскому стандарту ASTM E466 (рис. 2, а) проводили на универсальной сервогидравлической машине для механических испытаний типа INSTRON 8802. Испытывали партии по пять образцов для каждого состояния. Нагружение проводили по синусоидальной



Рис. 1. Общий вид оборудования для УЗУО

Таблица 1. Оптимальный химический состав сталей 20ГЛ и 15ХСНД, мас. %

Материал	C	Mn	Si	Ni	Cr	S	P
20ГЛ	0,19...0,20	1,20...1,40	0,35...0,60	–	–	< 0,04	< 0,04
15ХСНД	0,12...0,18	0,4...0,7	0,4...0,7	0,3...0,6	0,6...0,9	до 0,04	до 0,008

Таблица 2. Механические свойства сталей 20ГЛ и 15ХСНД

Материал	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\sigma_{-1}$ , МПа	KCV, кДж/м <sup>2</sup>	Коррозионная стойкость на воздухе, мм/год
20ГЛ	275	540	18	–	250 (20 °С)	–
15ХСНД, лист 10...32 мм	325	560	21	286	298 (-40 °С)	до 0,0608

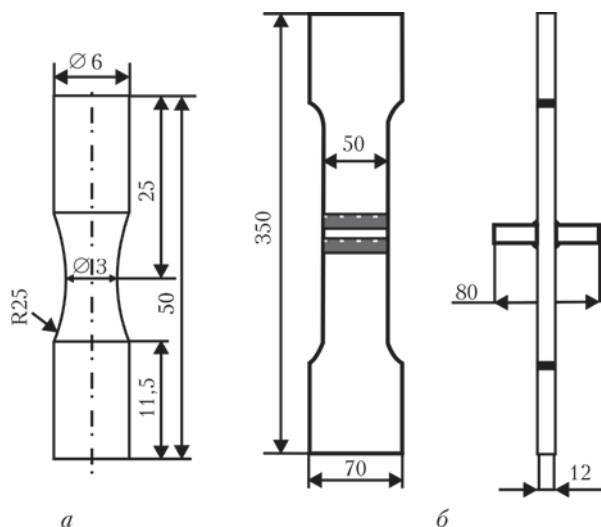


Рис. 2. Схематическое изображение образцов для усталостных испытаний; а – круглый галтельный образец; б – образец с тавровыми сварными соединениями для испытаний на усталость в коррозионной среде

кривой с частотой  $f = 30$  Гц. Параметры нагрузки:  $\sigma_{\min} = 0$  – минимальное напряжение цикла;  $\sigma_{\max} = 0,7\sigma_b = 380$  МПа – максимальное напряжение цикла, коэффициент асимметрии цикла  $K = 0,1$ .

Испытания на коррозионную усталость проводили на образцах тавровых сварных соединений низколегированной стали 15ХСНД. Заготовки под образцы вырезали из листового проката так, чтобы более длинная сторона была ориентирована вдоль проката. Поперечные ребра приваривали угловыми швами с двух сторон ручной электродуговой сваркой электродами марки УОНИ 13/55 диаметром 3 и 4 мм. Форма и геометрические размеры образца приведены на рис. 2, б. Толщина образца 12 мм была обусловлена широкой применимостью в сварных металлоконструкциях проката толщиной 8...20 мм. Ширину образца 50 мм выбирали исходя из мощности испытательного оборудования.

Усталостные испытания сварных соединений выполняли на испытательной машине УРС-20 (рис. 3, а), которая ежегодно проходит поверку Государственным предприятием «Всеукраинский государственный научно-производственный центр стандарти-

зации, метрологии, сертификации и защиты прав потребителей» (ДП «Укрметртестстандарт»). Данная машина предназначена для определения механических свойств образцов материалов и элементов конструкций при статической и циклической нагрузке со знакопостоянным или знакопеременным циклом с частотой от 0,1 до 7 Гц. Максимальное усилие испытательной машины составляет  $\pm 20$  тс. Сварные соединения испытывали на усталость при одноосном растяжении с асимметрией цикла напряжений  $K = 0,01$  и частоте циклической нагрузки 5 Гц.

Для испытаний на коррозионную усталость была сконструирована и изготовлена специальная емкость из нержавеющей стали объемом 1,2 л, которая закреплялась непосредственно на образце. В качестве коррозионной среды использовали 3 %-ный раствор NaCl. Общий вид емкости, в которой закреплялся образец во время испытаний на усталость, приведен на рис. 3, б.

Конструкция емкости обеспечивала постоянное пребывание всех четырех угловых швов и зоны термического влияния сварного соединения в коррозионной среде при циклическом нагружении. Размер рабочей части образца, которая

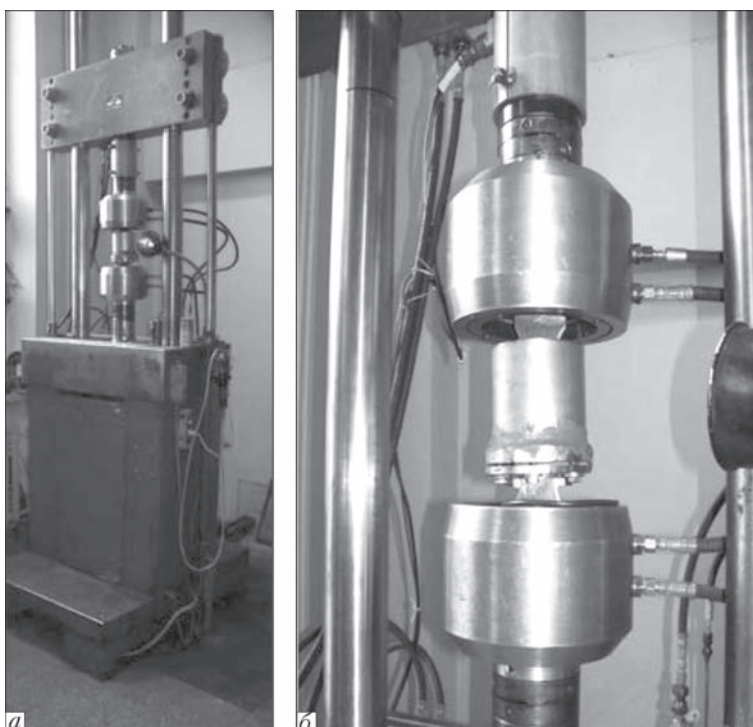


Рис. 3. Общий вид испытательной машины УРС-20 (а) и образец во время испытаний на коррозионную усталость (б)





постоянно находилась в 3 %-ном растворе NaCl, составлял 120 мм. После каждого испытания раствор обновлялся.

**Результаты и их обсуждение.** Методом УЗУО обрабатывается, как правило, узкая зона сплавления шва с основным металлом [1, 9] и, в большинстве случаев, этого достаточно для повышения усталостной прочности соединения, что способствует высокой производительности метода за счет локализации деформируемых участков шва и высокой частоты ударов бойков. В то же время известны работы по увеличению коррозионной стойкости металлических поверхностей после УЗУО вследствие образования поверхностного слоя с мелкозернистой структурой и определенным фазовым составом [12–14]. Представляло интерес применить для обработки сварных соединений вместе с УЗУО другой метод модификации поверхности. Наиболее простым и распространенным в промышленности является метод электроискрового легирования (ЭИЛ), который позволяет наносить покрытия различными металлами и может быть использован, как и УЗУО, для обработки локальных областей крупногабаритных конструкций, в том числе и сварных соединений [15].

Комбинированная обработка, при которой в одном технологическом цикле совмещаются разнообразные способы обработки поверхности металлических материалов – лазерная и электроискровая, плазменное и детонационное напыление, а также способы интенсивной пластической деформации (ИПД) поверхности [14, 16–18], является важным направлением развития технологий упрочнения и модификации рабочих поверхностей деталей и изделий. ИПД относится к перспективным способам обработки, в результате которой достигается высокая плотность дефектов кристаллического строения, что создает благоприятные условия для процессов диффузии и фазовых превращений, а также для образования мелкозернистых структур [1, 14, 16]. Следует отметить, что важным следствием ИПД является появление напряжений сжатия в поверхностных слоях деталей и конструкций, которые играют решающую роль в повышении их усталостной прочности и долговечности [3–6].

Перспективным путем создания покрытий с заданными свойствами является использование комбинированных воздействий, например, при сочетании ЭИЛ и УЗУО [13, 17]. ЭИЛ является одним из наиболее распространенных способов нанесения на детали упрочняющих покрытий, имеющих высокую прочность сцепления с деталью и уникальный комплекс физико-механических свойств. Однако электроискровые покрытия имеют значительную шероховатость и пористость, которая существенно снижает их экс-

плуатационные характеристики. Детали с нанесенными слоями легирующих веществ должны быть подвергнуты финишной обработке, которая может устранить указанные выше недостатки при сохранении или повышении необходимых механических, коррозионных и других свойств. Низкая энергоемкость метода и высокий процент использования материалов обеспечивают значительный экономический эффект (удешевление изделий и увеличение срока их эксплуатации).

Несмотря на малую энергию единичного удара при УЗУО, многократное ударное воздействие с высокой частотой приводит к уплотнению электроискровых покрытий с выглаживанием поверхности и снижением ее шероховатости. Кроме того, ускорение диффузионных процессов при УЗУО за счет локального возрастания температуры способствует увеличению адгезии покрытия к основному металлу, изменению его структуры и фазового состава.

Упрочнение поверхности образцов стали 20ГЛ изучали с помощью измерений микротвердости. Были проведены также усталостные испытания гладких образцов в исходном состоянии, после УЗУО и УЗУО + ЭИЛ. Для ЭИЛ поверхности образцов использовали стандартную промышленную установку «ЭЛИТРОН–22», которая работает на выпрямленном пульсирующем токе, с питанием от сети переменного тока напряжением 220 В. Применяли стержневые легирующие электроды Ni, Cr и Mo. Удельная скорость обработки составляла 1 мин/см<sup>2</sup> поверхности образца, при частоте колебаний электрода (анода) 100±3Гц, энергии искрового разряда 1 Дж, длительности импульса 200 мкс, рабочем токе 1...3 А и напряжении на аноде 70 В. Перед проведением ЭИЛ образцов проводили их термообработку, которая заключалась в закалке от температуры 880...900 °С с последующим стабилизационным отжигом при 600...650 °С в течение часа. Такая термообработка позволяет получать микроструктуру с равномерным распределением структурных элементов без избыточного роста их размеров.

УЗ обработку проводили с использованием установки, представленной в работах [1, 8]. УЗУО вращающихся галтельных образцов осуществляли в токарном станке с числом оборотов в минуту  $N = 120$ , продольной подачей суппорта  $S = 0,1$  мм/об, амплитудой колебаний торца концентратора  $A = 15$  мкм и деформирующим элементом бойком седлообразной формы массой 15 г. Использовали магнитоотрицательный излучатель ПМС 15А-18 с резонансной частотой 18 кГц, питаемый от генератора УЗГ2-4М. Был выбран оптимальный режим УЗУО, при котором достигалась минимальная шероховатость и максимальная микротвердость поверхности образцов. Наибольшая степень деформации  $\epsilon$  при УЗУО обычно

наблюдается в поверхностных слоях толщиной 30...50 мкм. Данные по микротвердости приведены на рис. 4. По сравнению с исходным состоянием после отжига поверхностная деформация с помощью УЗУО приводит к незначительному упрочнению (в 1,5 раза). Применение ЭИЛ способствует более существенному росту микротвердости, особенно в случае легирования хромом и молибденом. Причина такого отличия в механических свойствах полученных слоев заключается в особенностях структурного и фазового состояний, формируемых при комбинированной обработке ЭИЛ+УЗУО. Применение ЭИЛ+УЗУО приводит к существенному упрочнению – в случае легирования никелем в 1,3...1,5 раза, хромом в 2,0...3,5 раза и молибденом в 2,7...4,3 раза.

При легировании хромом и молибденом в поверхностном слое формируются ОЦК твердые растворы Fe–Cr и Fe–Mo, упрочненные интерметаллидными и/или карбидными фазами, а при легировании Ni – ГЦК твердый раствор Fe–Ni [15]. Следующая за ЭИЛ УЗУО ведет к существенному снижению шероховатости образцов. Все сформированные комбинированной обработкой поверхностные слои стали 20ГЛ, легированные никелем, хромом и молибденом, характеризуются большим потенциалом коррозии и меньшим током коррозии по сравнению с образцами в исходном состоянии, что свидетельствует об их повышенной стойкости к электрохимической коррозии [15].

Результаты испытаний круглых галтельных образцов (рис. 2, а) стали 20ГЛ показывают, что после шлифовки рабочей поверхности образца среднее количество циклов до разрушения составляет 154259 циклов. Долговечность образцов после УЗУО существенно возросла, достигнув  $10^6$  циклов (образцы не разрушались). Для электроискрового покрытия был выбран электрод из молибдена, который показал наибольшее упрочнение поверхности образца (рис. 4). После ЭИЛ молиб-

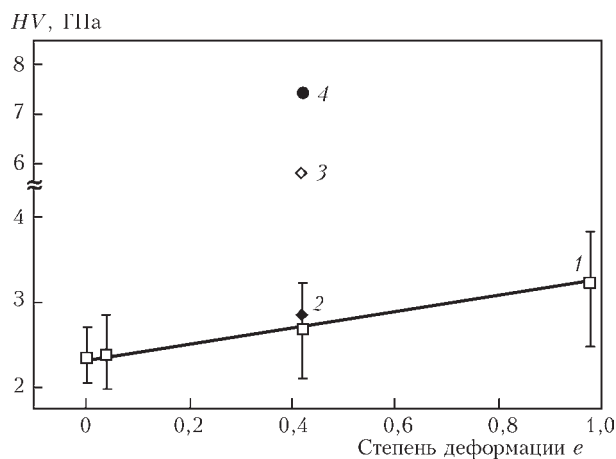


Рис. 4. Зависимость микротвердости от времени обработки при УЗУО (1) и после ЭИЛ+УЗУО при легировании Ni (2), Cr (3) и Mo (4)

деном с дальнейшей УЗУО по выбранным режимам долговечность возросла до 439564 цикла, что в 2 раза меньше, чем только после УЗУО. Очевидно, что электроискровые покрытия формируют в поверхности структуру, имеющую сложный фазовый состав. В него входят твердые растворы FeMo с ОЦК решеткой, интерметаллиды  $Fe_{63}Mo_{37}$ , оксиды, которые снижают пластичность поверхностного слоя и усталостную прочность. По-видимому, следует подбирать легирующие элементы, исходя из диаграмм состояния двойных систем, чтобы наряду с увеличением коррозионной стойкости добиться приемлемой усталостной прочности.

Обработка зоны сплавления сварных швов с помощью УЗУО повышает усталостную прочность и долговечность соединений при испытаниях в коррозионной среде по сравнению с исходными после сварки образцами низколегированных сталей [19]. В настоящей работе испытывали образцы тавровых соединений (рис. 2, б). Результаты усталостных испытаний образцов стали 15ХСНД на воздухе и в 3%-ном растворе NaCl приведены на рис. 5, а. Долговечность необработанных образцов сразу после сварки при  $\sigma_{max} = 260$  МПа составляла в среднем 130 тыс. циклов (точка 0 на графике). После УЗУО линии сплавления при испытаниях в коррозионной среде усталостная прочность значительно возрастает, что соответствует линии 1 на рис. 5, а. Видно, что долговечность на уровне 260 МПа повышается до 900 тыс. циклов. Для сравнения приведены испытания на воздухе после УЗУО образцов.

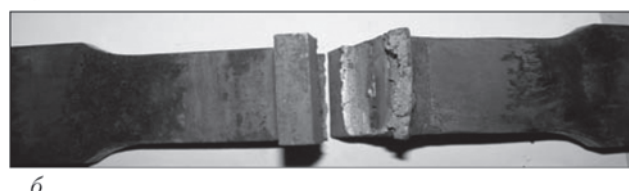
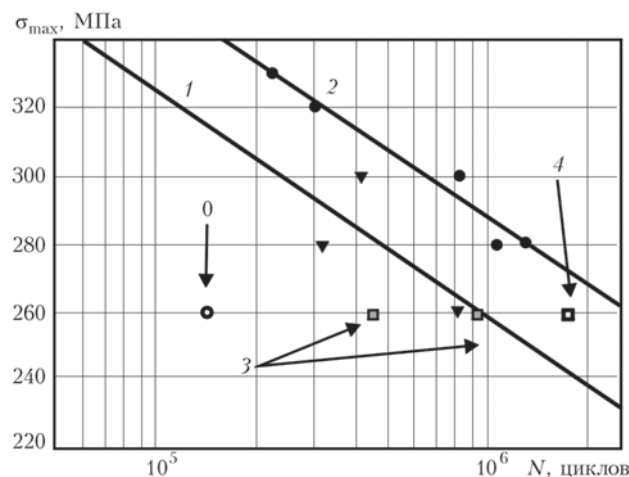


Рис. 5. Результаты усталостных испытаний сварных образцов стали 15ХСНД: а – после сварки (0) и после УЗУО (1–4) на воздухе (2) и в 3%-ном растворе NaCl (1,3,4) после УЗУО без ЭИЛ (2), ЭИЛ(Ni)+ УЗУО (3) и УЗУО+ЭИЛ(Cr)+УЗУО (4); б – образец после испытаний



Экспериментальные точки хорошо укладываются на прямую линию (рис. 5, а, кривая 2), что соответствует долговечности  $3,6 \cdot 10^6$  циклов при  $\sigma_{\max} = 260$  МПа. Испытания на этом уровне напряжений в 3%-ном растворе NaCl образцов, обработанных ЭИЛ никелем и УЗУО, показали среднюю долговечность 586 тыс. циклов (три образца, которым соответствуют точки 3 на рис. 5, а, разрушились при 424500, 457600 и 876300 циклах). Экспериментальные точки лежат ниже кривой 1.

Таким образом, никель не является оптимальным материалом для покрытия. Причиной снижения коррозионно-усталостной прочности образцов после ЭИЛ никелем с последующей УЗУО является не только образование хрупких фаз при высокочастотном ударном нагружении. Скорее всего, предварительное легирование поверхности затрудняет пластическую деформацию, что может сказаться и на уровне остаточных сжимающих напряжений в зоне шва после УЗУО. Поэтому был предложен способ комбинированной обработки, когда образец сначала подвергался УЗУО не только по линии сплавления, а по ширине зоны, в которой присутствуют растягивающие напряжения после сварки. Затем эта зона насыщалась с помощью ЭИЛ хромом, который с точки зрения образования хрупких соединений предпочтительнее никеля. Затем проводили окончательную обработку поверхности с помощью УЗУО для устранения повышенной шероховатости и уплотнения поверхностного слоя. В этом случае долговечность образцов повысилась до 1800 тыс. циклов. Большинство образцов разрушалось по ребру (рис. 5, б), что является характерной особенностью усталостных испытаний образцов стали 15ХСНД в коррозионной среде. Полученные результаты согласуются с данными работы [20], в которой использовались различные режимы дробеструйной обработки стали до и после нанесения покрытий хрома с целью увеличения сопротивления усталости.

Следует отметить, что гарантийные сроки эксплуатации многих ответственных сварных конструкций составляют десятки лет, потому данный метод является реальной мерой предупреждения преждевременного разрушения таких конструкций. В целом технология УЗУО продлевает сроки их эксплуатации, сохраняет материальные ресурсы, предотвращает нанесение ущерба окружающей среде. Широкое внедрение технологии и оборудование для УЗУО в промышленность Украины даст возможность существенно повысить надежность и долговечность ответственных сооружений, таких как мосты и путепроводы, а также машин и механизмов на железнодорожном транспорте, в горнодобывающей промышленности и в других отраслях народного хозяйства.

## Выводы

Разработано и изготовлено малогабаритное оборудование для УЗУО изделий и конструкций с излучателем на пьезокерамике. В УЗ генераторе использованы новые достижения в области микропроцессорной и цифровой техники, что позволило существенно уменьшить его массу и размеры.

Применение ЭИЛ поверхности стали 20ГЛ приводит к ее существенному упрочнению в случае легирования никелем (в 1,3...1,5 раза), хромом (в 2,0...3,5 раза) и молибденом (в 2,7...4,3 раза) по сравнению с УЗУО. Причина такого отличия в механических свойствах заключается в особенностях структурного и фазового состояний, формируемых при комбинированной обработке ЭИЛ+УЗУО разными элементами. Легирование молибденом с последующей УЗУО повышает долговечность образцов в 2,8 раза относительно исходного состояния после отжига и шлифовки.

Комбинированная обработка УЗУО + ЭИЛ (при легировании хромом) + УЗУО существенно увеличивает коррозионно-усталостную прочность сварных соединений стали 15ХСНД, которая становится сравнимой с теми значениями, которые получены для обработанных УЗУО образцов и испытанных на воздухе.

1. Структурные изменения в зоне сварного шва стали Ст3 при ультразвуковой ударной обработке и их влияние на повышение сопротивления усталости / П. Ю. Волосевич, Г. И. Прокопенко, В. В. Кныш и др. // *Металлофизика и новейшие технологии*. – 2008. – **30**, № 10. – С. 1429–1443.
2. Структура, фазовый состав и механизмы упрочнения аустенитной стали, подвергнутой ультразвуковой обработке бойками / В. А. Клименов, Ю. Ф. Иванов, О. Б. Перевалова и др. // *Физ. и хим. обработки материалов*. – 2001. – № 1. – С. 90–97.
3. The effects of ultrasonic peening treatment on the ultra-long life fatigue behavior of welded joints / D. Yin, D. Wang, H. Jing, L. Huo // *Materials and Design*. – 2010. – **31**. – P. 3299–3307.
4. Повышение сопротивления усталости сварных соединений металлоконструкций высокочастотной механической проковкой (Обзор) / Л. М. Лобанов, В. И. Кирьян, В. В. Кныш, Г. И. Прокопенко // *Автомат. сварка*. – 2006. – № 9. – С. 3–11.
5. Разработка и оптимизация оборудования и процесса ультразвуковой ударной обработки сварных соединений с целью снижения остаточных напряжений / Г. И. Прокопенко, А. Я. Недосека, А. А. Грузд, Т. А. Красовский // *Техн. диагностика и неразруш. контроль*. – 1995. – № 3. – С. 14–22.
6. Statnikov E. Sh. Applications of Operational Ultrasonic Impact Treatment Technologies in Production of Welded Joints // *Welding in the World*. – 2000. – **44**, № 3. – Doc.XIII-1667–97.
7. Дегтярев В. А., Шульгинов Б. С. Оценка эффективности методов повышения сопротивления усталости сварных соединений при ударном нагружении в условиях низкой температуры // *Пробл. прочности*. – 2000. – № 6. – С. 115–123.
8. Pat. 6,467,321 B2 USA. Device for ultrasonic peening of metals. / G. Prokopenko, J. Kleiman, O. Kozlov et al. – Oct. 22, 2002.
9. Пат. № 60390 Україна. Спосіб обробки зварних з'єднань металоконструкцій високочастотною проковкою /





- Л. М. Лобанов, П. П. Михеев, Г. І. Прокопенко та ін. – Бюл. № 10 від 15.10.2003.
10. Prokić M. Piezoelectric Transducers Modeling and Characterization. – Bern: Published in Switzerland by MPI, 2004. – 266 p.
  11. Грінченко В. Т., Вовк І. В., Маціпура В. Т. Основы акустики. – Київ: Наук. думка, 2007. – 640 с.
  12. Бабей Ю. И. Повышение усталостной и коррозионно-усталостной прочности валов в прессовых соединениях механо-ультразвуковой обработкой // ФХММ. – 1976. – 12, № 1. – С. 111–112.
  13. Фізико-механічні властивості ливарної сталі 20ГЛ після електроіскрового легування та ультразвукової ударної обробки/ Г. І. Прокопенко, В. Ф. Мазанко, Б. М. Мордюк та ін. // Вісник ТНТУ. – 2013. – №3 (71). – С. 170–181.
  14. Панин В. Е., Сергеев В. П., Панин А. В. Наноструктурирование поверхностных слоев конструкционных материалов и нанесение наноструктурных покрытий. – Томск: Изд-во Томск. политех. ун-та, 2009. – 285 с.
  15. Лазаренко Н. И. Электронское легирование металлических поверхностей. – М.: Машиностроение, 1976. – 144 с.
  16. Estrin Y., Vinogradov A. Extreme grain refinement by severe plastic deformation: A wealth of challenging science // Acta Materialia. – 61. – 2013. – P. 782–817.
  17. Чигринова Н. М., Кулешиов А. А., Нелаев В. В. Микроплазмонское легирование с ультразвуковой модификацией поверхности // Электронная обработка материалов. – 2010. – № 2. – С. 27.
  18. Tang X., Li D. Y. Production of alloyed nanocrystalline surfaces by combined punching, sandblasting and recovery treatments // Scripta Mater. – 2008. – 58. – P. 1090–1093.
  19. Спротивлення корозійній усталості сварних з'єдинень, упрочнених високочастотної механічної проковкой / В. В. Кныш, С. А. Соловей, А. З. Кузьменко, И. И. Вальтерис // Автомат. сварка. – 2008. – № 4. – С. 5–8.
  20. Gao Y., Li X., Yang Q., Yao M. Influence of surface integrity on fatigue strength of 40CrNi2Si2MoVA steel // Materials Letters. – 2007. – 61. – P. 466–469.

To increase the operation life of welded structures by ultrasonic impact treatment (UIT) new portable equipment was created. This equipment is supplied with 27 kHz ultrasonic generator of 650 W power output with digitally adjusted electrical parameters. Fatigue tests of samples of a number of low alloyed structural steels showed a significant increase in cyclic durability of welded seams after the UIT process. This treatment also reduced the corrosive degradation of welded joints due to ultrafine-grained structure and compressive residual stresses formed in the surface layer. A method for additional increase in durability of welded joints tested in a 3% NaCl aqueous solution was suggested. It consisted of the successive UIT process and electric spark alloying of seam area with chromium. 20 References, 2 Tables, 5 Figures.

*Keywords:* Ultrasonic Impact Treatment, Ultrasonic Generator, Low Alloyed Structural Steels, Welded Joints, Fatigue, Corrosion, Electric Spark Alloying

Поступила в редакцию  
24.06.2014

## 5-я МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «МЕХАНИКА РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ И ПРОЧНОСТЬ КОНСТРУКЦИЙ»

24–27 июня 2014 г. во Львове на базе Национального университета «Львовская политехника» состоялась 5-я Международная конференция «Механика разрушения материалов и прочность конструкций».

Организаторами конференции выступили Физико-механический институт им. Г. В. Карпенко НАН Украины, Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Национальный университет «Львовская политехника» и Украинское общество по механике разрушения материалов.



Для участия в конференции было заявлено более 200 докладов из 50 организаций, которые представляли ведущие академические институты, государственные научные центры, вузы, частные организации и промышленные предприятия Украины, Польши, Франции и Мексики.

Конференцию открыл председатель организационного комитета, директор ФМИ им. Г. В. Карпенко НАНУ, академик НАН Украины В. В. Панасюк, который в своем вступительном слове подчеркнул необходимость проведения подобного рода мероприятий с целью обмена опытом и налаживания научных и дружественных отношений между сотрудниками различных учреждений, представленных на конференции.

В работе конференции приняли участие более 190 ученых, в том числе 137 докторов и кандидатов наук. Было заслушано и обсуждено 26 пленарных, 44 секционных и 47 стендовых докладов, предусмотренных программой конференции.

От ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ на конференции было представлено более десяти докладов, в числе которых Л. Лобанов, В. Кныш, И. Клочков «Повышение циклической долговечности тонколистовых сварных соединений легких сплавов высокочастотной проковкой»; В. Позняков, Л. Маркашова, Т. Алексеенко, А. Максименко «Изменение структуры и механических свойств в стали 10Г2ФБ при сварке и во время циклического нагружения изгибом».

Проведение конференции способствовало установлению деловых контактов в области механики разрушения материалов, прочности конструкций и оценки ресурса работоспособности ответственных деталей и конструкций.