



# ПОВЫШЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОКОВКОЙ (Обзор)

Академик НАН Украины **Л. М. ЛОБАНОВ**, чл.-кор. НАН Украины **В. И. КИРЬЯН**,  
**В. В. КНЫШ**, канд. физ.-мат. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),  
**Г. И. ПРОКОПЕНКО**, д-р техн. наук (Ин-т металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины)

Обобщены результаты исследований эффективности применения высокочастотной механической проковки (ВМП) для повышения сопротивления усталости сварных соединений сталей различного класса прочности и алюминиевых сплавов. Установлены общие закономерности изменения сопротивления усталости сварных соединений в результате ВМП, определяемые механическими свойствами материала, уровнем концентрации рабочих напряжений, асимметрией цикла внешнего нагружения, величиной и знаком формируемых обработкой остаточных напряжений в зоне концентраторов. Разработана методика расчетного прогнозирования эффективности ВМП в зависимости от указанных выше факторов.

*Ключевые слова:* стали, алюминиевые сплавы, сварные соединения, концентрация напряжений, остаточные напряжения, сопротивление усталости, высокочастотная механическая проковка, ультразвуковая обработка

Высокочастотная механическая проковка (ВМП) является развитием технологий поверхностного пластического деформирования металла. К таким технологиям относят наклеп дробью, обкатку роликом, чеканку одно- и многобойковыми инструментами с пневматическим или электромеханическим приводом, пластическое обжатие, взрывную обработку и др. [1–5]. В основном они применяются для повышения сопротивления усталости деталей машин и сварных соединений конструкций различного назначения.

Впервые возможность использования ультразвуковой (УЗ) технологии для улучшения служебных свойств сварных конструкций обоснована в МВТУ им. Н. Э. Баумана в 1959 г. в работе [6], посвященной обработке сварных соединений ультразвуком с целью перераспределения остаточных напряжений. В последующем исследование по снижению остаточных напряжений в сварных соединениях УЗ обработкой получили развитие в работах [7–11] и в основном были направлены на обеспечение размерной стабильности элементов сварных конструкций при эксплуатации. Наряду с этим исследовано влияние УЗ колебаний на изменение внутренних напряжений в сталях, ударного воздействия инструмента на степень упругости металла, его износостойкость, формирование на поверхности остаточных напряжений [12–15]. В работе [16] изучен механизм УЗ ударной обработки. В отдельных работах предприняты попытки использования УЗ технологий для

повышения сопротивления усталости деталей машин [17, 18], коррозионно-усталостной прочности стали [19], а также наплавленных гребных валов [20].

УЗ технология представляет собой ударную обработку поверхности металла высокопрочными бойками, механические колебания которых возбуждаются УЗ генератором через излучатель (преобразователь электрических колебаний в механические). При этом в зависимости от решаемых технологических задач применяются стандартные или специально разработанные УЗ генераторы и инструменты на базе магнитострикционных или пьезокерамических излучателей с выходной мощностью 0,3...2,5 кВт [10, 21–24].

Поверхностное пластическое деформирование ударами, следующими с высокой частотой, может осуществляться по трем схемам (рис. 1). В первом случае (рис. 1, а) рабочий инструмент в виде закаленного шара, твердосплавного или алмазного наконечника жестко связан с торцом УЗ концентратора. Вся колебательная система поджимается к поверхности с силой  $F_{ст} \approx 100...200$  Па и свободно скользит в направляющих. При обработке прочных материалов происходит отскок инструмента от поверхности детали, поэтому для эффективной обработки требуются значительные силы поджатия  $F_{ст}$  и остаточная мощность УЗ излучателей. Во втором случае (рис. 1, б) рабочий инструмент не связан жестко с концентратором и удерживается в специальных оправках. Он называется промежуточным ударным элементом. В конце 1960-х — начале 1970-х годов такой способ обработки предложили ученые США, Украины и России. В данном случае весь излучатель также свободно скользит в направляющих и поджима-

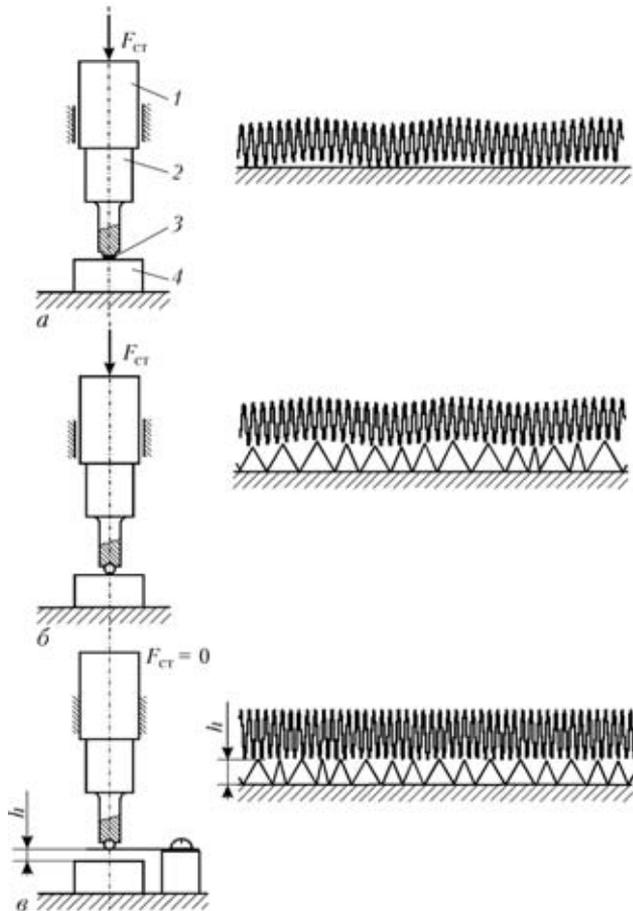


Рис. 1. Схемы реализации процесса ВМП [10]: а — жесткое закрепление деформирующего элемента (бок) с поджатием акустической системы усилием  $F_{ст}$ ; б — то же, но при пассивном деформирующем элементе; в — с колебаниями деформирующего элемента в зазоре  $h$ ; 1 — излучатель; 2 — волновод; 3 — деформирующий элемент; 4 — обрабатываемая деталь

ется к поверхности детали с силой  $F_{ст}$ , однако она значительно меньше, чем в первом случае, и обычно составляет 30...50 Па. При этом возникают вынужденные колебания промежуточного элемента в определенном зазоре (~0,01 мм), который автоматически устанавливается при возбуждении УЗ колебаний. Из схемы видно, что наличие зазора является необходимым условием возникновения колебаний деформирующего элемента. Исследования показали, что при таком способе передачи УЗ энергии в обрабатываемое изделие происходит интенсивная пластическая деформация поверхности металлов. Известен также способ поверхностной обработки с помощью ультразвука (рис. 1, в). В данном случае излучатель жестко закреплен (например, в суппорте станка), между промежуточным элементом и поверхностью детали устанавливается фиксированный зазор  $h \approx 0,01$  мм, а сам элемент поджимается к торцу УЗ волновода с небольшой силой порядка 10 Па. При включении УЗ колебаний элемент начинает колебаться в зазоре с определенной частотой. Из рис. 1 видно, что во втором и третьем случаях эта частота су-

щественно ниже частоты УЗ колебаний и составляет в среднем 1...3 кГц. При использовании многобойковых инструментов с количеством ударников 3...10 шт. и более суммарная частота ударов может быть выше этих значений из-за того, что ударники колеблются не в фазе и их колебания в зазоре носят стохастический характер. Тем не менее собственно УЗ обработкой может считаться лишь первый случай, когда инструмент колеблется с УЗ частотой. Во втором и третьем случаях ультразвук служит лишь приводом для вынужденных колебаний инструмента в определенном зазоре. Такой тип обработки называют УЗ ударной обработкой (УЗУО). В иностранной литературе используют термин УЗ пиннинг. Однако поскольку инструмент совершает колебания в зазоре с более низкой частотой, чем УЗ, более уместно использовать термин «высокочастотная механическая проковка» (ВМП).

Впервые исследования оценки возможности применения УЗ технологии для повышения сопротивления усталости сварных соединений были проведены в ИЭС им. Е. О. Патона в 1982 г. В сварных соединениях с помощью ВМП обрабатывали склонную к усталостным повреждениям зону перехода от шва к основному металлу по схеме, приведенной на рис. 1, б. В качестве бойка использовали шарик диаметром 16 мм. Его механические колебания создавали серийным магнитострикционным преобразователем ПМС-15А-18 и УЗ генератором УЗГ-10М. Частота УЗ колебаний составляла 27,5 кГц. Такой вид ВМП вызывал интенсивную пластическую деформацию металла на глубину до 0,3...1 мм в зависимости от вида материала и его механических свойств. Это приводило к обеспечению более плавного перехода от шва к основному металлу и, как следствие, снижению концентрации рабочих напряжений в соединении. Кроме того, в поверхностных слоях обработанного участка возникали сжимающие остаточные напряжения. В результате такой обработки циклическая долговечность стыковых соединений низкоуглеродистой стали увеличивалась в 18...20 раз.

По инициативе Б. Е. Патона в 1983 г. в ИЭС им. Е. О. Патона были начаты систематические исследования, связанные с разработкой технологичного в использовании способа повышения сопротивления усталости сварных соединений высокопрочной стали применительно к судостроительным корпусным конструкциям. Они выполнялись совместно с ЦНИИ «Прометей» (г. Санкт-Петербург, Россия) и Северным машиностроительным предприятием — СМП (г. Северодвинск, Россия). Исследования проводили на двух типах сварных соединений — стыковом и с поперечными угловыми швами. Для УЗУО сварных соединений на СМП использовали компактный ручной инстру-



Эффективность ВМП сварных соединений

№ п/п	Марка свариваемого металла	$\sigma_{\text{нр}}, \text{МПа}$	Толщина, мм	Тип соединения	Условия испытания		$\sigma_R, \text{МПа}$ при $N = 2 \cdot 10^6$ , цикл		$\Delta\sigma_R, \text{МПа}/\%$	Источник информации, примечание
					вид нагружения	$R_\sigma$	исходное состояние	после обработки		
1	Ст.3сп	458	20	Стыковое	Растяжение	0	140	220	80/57	[3, 25–28, 43, 55]
2	Высокопрочная	>1000	20	» »	Изгиб	-1	180	300	120/66	[3, 25–28, 43, 55]
3		>1000	20	» »	» »	-1	140	260	120/86	[3, 25–28, 43, 55]
4		>1000	20	» »	Растяжение	0	110	140	30/27	То же, выпуклости швов превышали допуски стандартов
5		>1000	20	» »	Изгиб	0,6	135	175	40/30	[3, 25–28, 43, 55, 56], $\sigma_R$ при $N = 5 \cdot 10^6$ цикл
6		>1000	30	С поперечным ребрами, приваренными угловыми швами	То же	-1	80	240	160/200	[3, 26–28, 43, 55, 56], $\sigma_R$ при $N = 5 \cdot 10^6$ цикл
7		>1000	30	То же	» »	0	110	230	120/109	
8		>1000	30	» »	» »	0,6	80	105	25/31	
9		Аустенитная	—	80	» »	» »	0	110	205	95/86
10	—		80	С продольной планкой, приваренной угловыми швами	» »	0	100	190	90/90	[25, 35, 43], соединение с полным проваром
11	Е690	823...876	9,5	Тавровое	» »	0,1	135	397	260/192	[33]
12		836	9,5	Стыковое	Растяжение	0,1	129	224	95/74	[34]
13	Е460	589	10	Тавровое	Изгиб	0,1	168	290	122/73	[34]
14	Алюминиевый сплав 6061Т6	290	8	Стыковое	Растяжение	0,1	71	86	15/21	[34]
15	Алюминиевый сплав АА5083	335	8	Нахлесточное с поперечными угловыми швами	» »	0,1	19,8	35,1	15,3/78	[53]
16		335	8	С продольными планками, приваренными угловыми швами	» »	0,1	35	68	33/95	[53]
17	WELDOX 420	573	20	С поперечными ребрами, приваренными угловыми швами	Изгиб	0,1	198	327	129/65	[47], диаметр деформирующего элемента 5 мм
18		573	20	То же	» »	0,1	198	341	143/72	[47], диаметр деформирующего элемента 3 мм
19	ТМСП	$\sigma_T = 420$	20	» »	» »	0,1	178	351	173/97	[46]
20	Ст3сп	460	30	» »	Растяжение	0,0	113	167	54/49	Данные ИЭС



№ п/п	Марка свариваемого металла	$\sigma_{\text{нр}}$ , МПа	Толщина, мм	Тип соединения	Условия испытания		$\sigma_R$ , МПа при $N = 2 \cdot 10^6$		$\Delta\sigma_R$ , МПа/%	Источник информации, примечание
					Вид нагружения	$R_\sigma$	В исходном состоянии	После обработки		
21	Ст3сп	460	30	С поперечными ребрами, приваренными угловыми швами	Растяжение	0,0	113	164	51/48	Данные ИЭС. Инструмент с пьезокерамическим преобразователем. Диаметр деформирующего элемента 3 мм
22		460	30	То же	» »	0,0	113	164	51/48	То же, диаметр деформирующего элемента 2 мм
23	09Г2СЮЧ	550	14	С продольными ребрами, приваренными угловыми швами	» »	0,0	96	156	60/62	Данные ИЭС
24	15ХСНД	520	14	То же	» »	0,0	86	180	94/110	» »
25	WELDOX 700	800	6	» »	» »	0,1	86	190	104/120	[54]
26	Q235B	435,5	8	Стыковое	» »	0,1	148,5	234	85,5/57	[52], инструмент с пьезокерамическим преобразователем
27		435,5	8	Крестообразное	Четырехточечный изгиб	0,25	142,5	234	91,5/64	
28		435,5	8	То же	То же	-0,5	165	282	117/71	

мент с магнитострикционным преобразователем и многоэлементным рабочим органом [21, 22]. Источником возбуждения колебаний служило УЗ тиристорное генераторное устройство УТГУ-1,2-27 с выходной мощностью до 1,2 кВт. При выполнении исследований изменяли следующие параметры ВМП: амплитуду колебаний УЗ излучателя; скорость перемещения инструмента; количество проходов инструмента; ширину обрабатываемой зоны. Установлена высокая эффективность ВМП сварных соединений высокопрочных конструкционных сталей при различных видах нагружения в широком диапазоне изменения коэффициента асимметрии цикла (таблица, № 2-8). При этом изменение ширины обрабатываемой зоны соединений не оказывало влияния на циклическую долговечность соединений. В качестве оптимальных режимов упрочнения ширина обрабатываемой зоны выбрана в пределах 4...7 мм, а скорость перемещения инструмента около 0,5 м/мин. Главными причинами, вызывающими повышение циклической долговечности и предела выносливости сварных соединений при ВМП, оказались следующие:

снятие растягивающих и создание в зонах концентраторов благоприятных остаточных напряжений сжатия;

уменьшение концентрации рабочих напряжений;

деформационное упрочнение поверхностного слоя металла.

Следует отметить, что работы Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины по созданию способа и технологии ВМП, а также оценке эффективности их применения для повышения сопротивления усталости сварных соединений выполнены совместно ЦНИИ «Прометей» и СМП [25–31].

Результаты этих исследований использованы в ЦНИИ «Прометей» при составлении технологических рекомендаций по применению ВМП для повышения сопротивления усталости сварных соединений корпусных корабельных конструкций.

Дальнейшие исследования ИЭС им. Е. О. Патона по расширению областей применения ВМП для повышения сопротивления усталости сварных конструкций проводил совместно с предприятиями и организациями Минтяжмаша, Минавиапрома, Минтрансстроя, Государственной администрации железнодорожного транспорта Украины и других ведомств. Ряд работ выполнен совместно с Северной научно-технологической компанией — СНТК (г. Северодвинск, Россия), ГИПРОНИИАВИАПРОМ (г. Москва, Россия), НКМЗ (г. Краматорск, Украина), Институтом сварки (Франция) и др. Результаты этих и других экспериментальных исследований эффективности применения ВМП для повышения сопротивления



усталости сварных соединений сталей различных классов прочности и алюминиевых сплавов приведены в таблице. Среди них выполненные Институтом сварки Франции в 1990–1991 гг. экспериментальные исследования на образцах с попережными угловыми швами (высокопрочная сталь), упрочненными с помощью ВМП в ИЭС им. Е. О. Патона. Результаты этой работы отражены в совместной публикации [32]. В дальнейшем аналогичные исследования продолжены Институтом сварки Франции на сварных соединениях низкоуглеродистой стали и алюминиевого сплава [33, 34]. Они показали, что эффективность ВМП сварных соединений снижается с уменьшением прочности стали (см. таблицу, № 11, 13).

В 1992–1993 гг. в ИЭС им. Е. О. Патона совместно с ГИПРОНИИАВИАПРОМ выполнены исследования обоснования целесообразности применения ВМП сварных узлов из аустенитных сталей при создании криогенной аэродинамической трубы. Установлено, что в сварных соединениях, подвергнутых ВМП, очагами зарождения усталостных трещин становятся незаваренные щели в корне угловых швов, а не как обычно зона перехода от металла шва к основному материалу. На основе полученных результатов исследований (см. таблицу, № 9, 10) даны рекомендации по конструктивному оформлению сварных узлов и применению ВМП в наиболее нагруженных элементах проектировавшейся криогенной аэродинамической трубы [35].

В 1987–1993 гг. в ИЭС им. Е. О. Патона совместно с НКМЗ (г. Краматорск) выполнены исследования сопротивления усталости сварных соединений при циклическом сжатии. Такой вид нагружения характерен для несущих элементов стрел экскаваторов-драглайнов. Показано, что перераспределение остаточных сварочных напряжений в зонах концентраторов в результате ВМП исключает образование усталостных трещин в сварных узлах, характерных для несущих элементов стрел [36, 37].

Обоснование применения ВМП для повышения сопротивления усталости сварных узлов из труб относится к 1991–2001 гг. При этом технологии ВМП выбирали с учетом особенностей напряженно-деформированного состояния в зоне примакивания раскоса к поясу элементов трубных конструкций. Установлено, что положительное влияние ВМП начинает сказываться в области долговечностей более  $10^4$  циклов и приводит к повышению предела выносливости в 2 раза. Положительное влияние ВМП трубчатых узлов проявляется как по критерию зарождения трещин, так и по критерию полного разрушения [38, 39]. В работе [40] обоснована целесообразность применения и установлена высокая эффективность ВМП для продления ресурса эксплуатируемых узловых

соединений решетчатых сварных конструкций из труб, работающих при переменном нагружении. При этом положительный эффект достигается независимо от степени накопленного усталостного повреждения конструкций на стадии ее эксплуатации до применения ВМП.

На основе результатов усталостных испытаний крупномасштабных сварных моделей узлов сплошнотенчатых пролетных строений нового типа для железнодорожных мостов [41], полученных в ИЭС им. Е. О. Патона, и опытной проверки на Воронежском мостовом заводе и экспериментальном кольце ВНИИ железнодорожного транспорта ВМП рекомендована к применению в мостостроении. По решению Технического совета Госадминистрации железнодорожного транспорта Украины УкрПРОЕКТСТАЛЬКОНСТРУКЦИЯ включила этот вид обработки в проектную документацию опытных типовых сварных пролетных строений мостов для железных дорог Украины. С учетом конструктивных особенностей сварных узлов пролетных строений осуществлена необходимая корректировка технологических параметров ВМП.

В работе [26] установлено, что анизотропия пластических свойств, обусловленная локальным пластическим деформированием металла ВМП, не приводит к снижению вязкости разрушения сварных соединений, характеризующей критическим раскрытием вершины трещины при низких температурах. Это дало основание отнести ВМП к способам упрочнения, не представляющим опасности для несущей способности сварных конструкций, эксплуатируемых при пониженных климатических температурах. Более того, в условиях низких климатических температур (до  $-60^\circ\text{C}$ ), как показано в работе [42] при повторно-ударном нагружении, ВМП сварных соединений низколегированных сталей является наиболее эффективной мерой повышения их сопротивления усталости по сравнению с другими видами обработок (механическое снятие усиления шва, аргонодуговая, взрывная).

С 1994–1995 гг. результаты исследований по повышению сопротивления усталости сварных соединений под действием ВМП и созданию соответствующего технологического оборудования представляются на конгрессах Международного института сварки (МИС) [43, 44]. В 1997–1999 гг. в рамках кооперативной программы МИС «Испытание методов упрочняющих обработок сварных соединений» [45] отделом прочности сварных конструкций ИЭС им. Е. О. Патона по договорам с СНТК (г. Северодвинск) выполнены две работы, в которых показаны преимущества ВМП по сравнению с пневмопроковкой, дробеструйной обработкой и аргонодуговым оплавлением [46, 47]. Исследования проводили на сварных соединениях

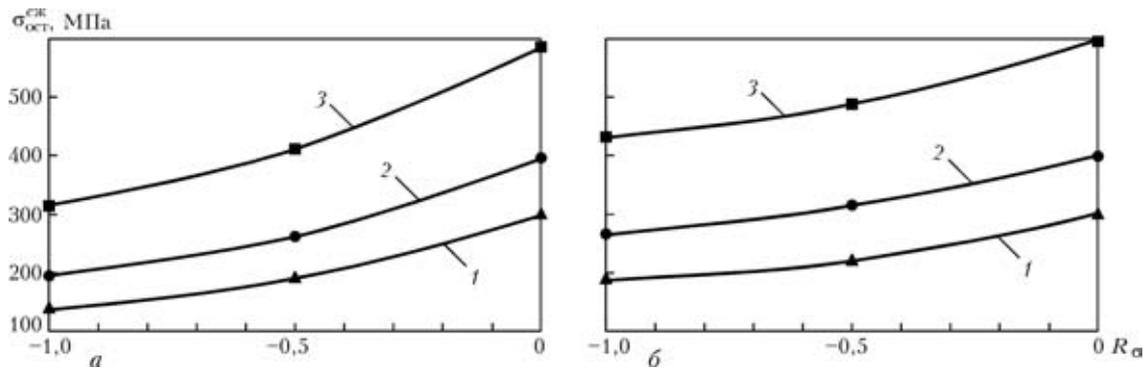


Рис. 2. Зависимость наведенных ВМП оптимальных остаточных напряжений сжатия  $\sigma_{ост}^{сж}$  в зоне концентратора напряжений от коэффициента асимметрии цикла внешнего нагружения  $R_{\sigma}$ , при которых достигается максимальное повышение пределов выносливости: *a* — стыковое соединение; *b* — соединение с поперечными угловыми швами: 1–3 — соответственно низкоуглеродистая, низколегированная и высокопрочная стали

шведской низколегированной стали WELDOX 420. Для получения максимального эффекта технологические параметры ВМП корректировали (см. таблицу, № 17, 18).

Рассмотренные результаты исследований получены на сварных соединениях, ВМП которых выполняли с использованием оборудования на базе магнитоотрицательных преобразователей [21, 22, 30–32, 44]. Вместе с тем, длительное время в Украине выполняются такие работы, связанные с созданием технологического оборудования для ВМП металлов и сварных соединений с использованием пьезокерамических преобразователей [4, 23, 24, 48]. Применение пьезокерамических излучателей имеет ряд преимуществ, главные из которых: увеличение КПД установок, снижение их массы и энергопотребления, отсутствие водяного охлаждения. Такая установка создана в Киеве на предприятии «Ультрамет» с участием сотрудников ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины [49–51]. Оптимальная мощность генераторов и излучателей на пьезокерамике находится в диапазоне 0,3...0,5 кВт. Установка опробована в ИЭС им. Е. О. Патона на сварных соединениях высокопрочной и низкоуглеродистой стали с поперечными угловыми швами. Для сопоставления однотипные образцы подвергали ВМП инструментами как с магнитоотрицательным, так и с пьезокерамическим преобразователями, причем оба типа инструмента имели головки с иглами-ударниками диаметром 3 мм. Отличительные особенности головок инструментов на пьезокерамических преобразователях защищены патентами [48–50] и авторскими свидетельствами СССР [23]. Технологические параметры (скорость перемещения инструмента, количество проходов, ширина обрабатываемой зоны, усилие прижатия инструмента, амплитуда УЗ колебаний торца волновода) обработки соединений принимали идентичными для обоих типов инструмента. Образцы из высокопрочной стали испытывали на трехточечный изгиб, а из низкоуглеродистой — при осевом нагру-

жении. Исследования показали, что при применении низкоуглеродистой стали использование инструмента с магнитоотрицательным и пьезокерамическим преобразователями по сравнению с исходным состоянием приводит практически к одинаковому повышению пределов выносливости сварного соединения (см. таблицу, № 20, 21). Вполне вероятно ожидать несколько высшую эффективность ВМП при обработке сварных соединений высокопрочной стали с помощью инструмента с магнитоотрицательным преобразователем. Здесь подтверждена также существенная зависимость эффекта ВМП от ее технологических параметров. Положительные результаты также получены в Китае при использовании оборудования с пьезокерамическими преобразователями для ВМП сварных соединений [52] (см. таблицу, № 26–28).

ВМП может применяться для повышения сопротивления усталости сварных соединений сталей различных классов прочности, в том числе и алюминиевых сплавов. Однако для соединений алюминиевых сплавов оптимальные параметры ВМП отличаются от параметров обработки сварных соединений сталей. Так, при оптимальных параметрах ВМП сварных соединений алюминиевых сплавов получено повышение пределов выносливости нахлесточных соединений с поперечными и продольными швами при  $N = 2 \cdot 10^6$  циклов соответственно на 78 и 95 % (см. таблицу, № 15, 16) [53]. В то же время обработка сварных соединений алюминиевых сплавов по технологии, соответствующей однотипным сварным соединениям сталей, приводит к повышению предела выносливости на 21 % (см. таблицу, № 12, 14) [34].

В работе [53] установлено, что эффективность ВМП стыковых соединений алюминиевого сплава АМг-6 зависит от мощности УЗ генератора и преобразователя, диаметра применяемых игольчатых бойков и асимметрии цикла внешнего нагружения. Один из важных выводов этих исследований состоит в том, что применительно к сварным со-



единениям алюминиевых сплавов лучшие результаты дает использование УЗ установки с пьезо-керамическим преобразователем (потребляемая мощность 0,3 кВт) по сравнению с магнитострикционным.

Априори считают, что наибольший эффект ВМП достигается при формировании в зоне концентратора остаточных напряжений сжатия, равных или превышающих предел текучести стали  $\sigma_T$ . В ИЭС им. Е. О. Патона разработана методика расчетного определения эффективности способов повышения сопротивления усталости сварных соединений, позволяющая устанавливать оптимальное значение формируемых остаточных напряжений сжатия в зоне концентратора, при котором достигается максимальное повышение предела выносливости сварного соединения [3]. В данном случае учитываются механические свойства материала, концентрация рабочих напряжений, асимметрия цикла внешнего нагружения, величина формируемых обработкой остаточных напряжений сжатия в зоне концентратора. Анализ показал, что в большинстве случаев значение остаточных напряжений сжатия должно находиться в диапазоне  $(0,5...0,7)\sigma_T$ . На рис. 2 приведено изменение оптимальных значений остаточных напряжений сжатия для двух типов сварных соединений (стыкового и с поперечными угловыми швами) сталей трех классов прочности — низкоуглеродистой ( $\sigma_T = 300$  МПа), низколегированной ( $\sigma_T = 400$  МПа) и высокопрочной ( $\sigma_T = 600$  МПа) в зависимости от коэффициента асимметрии цикла внешнего нагружения  $R_\sigma$ . Представленные данные свидетельствуют о существенном влиянии  $R_\sigma$  на оптимальное значение формируемых с помощью ВМП в зонах концентраторов остаточных напряжений сжатия, обеспечивающих максимально возможное повышение пределов выносливости и увеличение циклической долговечности сварных соединений. В области воздействия знакопеременных напряжений оптимальное значение формируемых обработкой остаточных напряжений сжатия значительно ниже  $\sigma_T$  соответствующей стали. И только при нулевом цикле ( $R_\sigma = 0$ ) оно достигает предела текучести стали. Таким образом, оптимизация параметров ВМП позволяет получить максимальный эффект при существенном снижении ее трудоемкости.

В заключение следует отметить, что ВМП является производительным и экономичным способом повышения сопротивления усталости сварных соединений сталей различного класса прочности и алюминиевых сплавов. Эффективность ВМП сварных соединений увеличивается:

с повышением прочности исходного материала. В случае стыковых соединений низкоуглеродистой стали повышение предела выносливости

$\Delta\sigma_R$  составляет 57 (см. таблицу, № 1), а высокопрочной 74 % (таблица, № 12). На соединениях с поперечными угловыми швами повышение  $\Delta\sigma_R$  составляет 65...72 (таблица, № 17, 18), а высокопрочной 109 % (таблица, № 7);

для сварных соединений с высокой исходной концентрацией рабочих напряжений, обусловливаемой формой шва. Если для стыкового соединения высокопрочной стали  $\Delta\sigma_R = 66$  (таблица, № 2), то в случае соединения с поперечными угловыми швами  $\Delta\sigma_R = 200$  % (таблица, № 6);

со снижением коэффициента асимметрии цикла внешнего нагружения  $R_\sigma$ . Изменение  $R_\sigma$  от +0,6 до -1,0 приводит к повышению  $\Delta\sigma_R$  сварного соединения высокопрочной стали с поперечными угловыми швами от 31 до 200 % (таблица, № 6–8). Такая же закономерность сохраняется и на стыковых соединениях высокопрочной стали ( $\Delta\sigma_R$  возрастает от 30 до 86 %, таблица, № 2, 3, 5).

Уровень повышения сопротивления усталости сварных соединений существенно зависит от параметров ВМП. Путем их подбора (в ИЭС им. Е. О. Патона разработана соответствующая методика) может быть достигнуто весьма существенное повышение предела выносливости  $\Delta\sigma_R$ .

ВМП сварных соединений с использованием оборудования на базе магнитострикционных и пьезокерамических преобразователей при идентичных технологических параметрах обработки приводит к практически одинаковому повышению сопротивления усталости сварных соединений сталей низкой и средней прочности. Преимущество магнитострикционных преобразователей может наблюдаться в случае высокопрочных сталей.

В результате пластического деформирования при ВМП локальное упрочнение металла в зоне перехода от шва к основному материалу не приводит к снижению вязкости разрушения сварного соединения в целом, устанавливаемой по показателю нелинейной механики разрушения (критическое раскрытие вершины трещины) при низких климатических температурах (до -60 °С). Это позволяет рекомендовать технологию ВМП для повышения сопротивления усталости сварных соединений металлоконструкций, эксплуатируемых при температурах до -60 °С.

Полученные результаты экспериментальных исследований эффективности применения ВМП для повышения сопротивления усталости сварных соединений сталей различных классов прочности и алюминиевых сплавов, опыт ее применения в судостроении, опытно-промышленные проверки в мостостроении применительно к вновь изготавливаемым и эксплуатируемым пролетным строениям и в других отраслях могут служить основанием для включения данного вида повер-



хностного наклепа в нормы проектирования и изготовления сварных конструкций.

1. Патон Б. Е. Современные направления повышения прочности и ресурса сварных конструкций // Автомат. сварка. — 2000. — № 9/10. — С. 3–9.
2. Труфяков В. И. Повышение сопротивления усталости сварных соединений и конструкций // Там же. — 1998. — № 11. — С. 11–19.
3. Trufiakov V. I., Mikheev P. P., Kudryavtsev Y. F. Fatigue strength of welded structures. Residual stresses and improvement treatments. — London: Harwood Acad. publ., 1995. — 100 p.
4. Дурье Г. Б., Штейнберг Я. И. Упрочняюще-отделочная обработка рабочих поверхностей деталей машин поверхностным пластическим деформированием. — М.: Машиностроение, 1971. — 232 с.
5. Кудряцев И. В., Науменков Н. Е. Усталость сварных конструкций. — М.: Машиностроение, 1976. — 270 с.
6. Мордвищева А. В. Обработка сварных соединений ультразвуком с целью снятия остаточных напряжений. Применение ультразвука в сварочной технике // Тр. МВТУ им. Н. Э. Баумана. — 1959. — Вып. 45. — С. 32–43.
7. Снижение остаточных сварочных напряжений УЗ обработкой / И. Г. Полоцкий, А. Я. Недосека, Г. И. Прокопенко и др. // Автомат. сварка. — 1974. — № 5. — С. 74–75.
8. Янченко Ю. А., Сагалевич В. М. Влияние УЗ обработки на снижение остаточных напряжений и деформаций сварных соединений из высокопрочных сталей // Вестн. машиностроения. — 1978. — № 1. — С. 60–63.
9. Холопов Ю. В. Обработка сварных соединений металлов ультразвуком с целью снятия остаточных напряжений // Свароч. пр-во. — 1973. — № 12. — С. 20–23.
10. Разработка и оптимизация оборудования и процесса УЗ 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.
11. Кривко В. П., Прокопенко Г. И. Ультразвуковая обработка сварных соединений // Свароч. пр-во. — 1979. — № 5. — С. 32.
12. Погодина-Алексеева К. М., Кремлев Е. М. Влияние УЗ колебаний на снятие внутренних напряжений в некоторых сталях // Ультразвуковая техника. — 1967. — Вып. 4. — С. 28–33.
13. Нерубай М. С. Влияние УЗ колебаний инструмента на наклеп и остаточные напряжения поверхности // Вестн. машиностроения. — 1968. — № 10. — С. 65–67.
14. Остаточные напряжения при упрочнении сварных соединений стали ЮЗ ультразвуковым инструментом ударного действия / В. Г. Степанов, Е. Ш. Статников, М. И. Клестов и др. // Технология судостроения. — 1974. — № 7. — С. 32–34.
15. Муханов И. И., Голубев Ю. М. Упрочнение стальных деталей шариком, вибрирующим с УЗ частотой // Вестн. машиностроения. — 1966. — № 11. — С. 52–53.
16. Механизм УЗ ударной обработки сварных соединений / В. Г. Бадалян, В. Ф. Казанцев, Е. Ш. Статников, Е. М. Шевцов // Там же. — 1979. — № 8. — С. 56–58.
17. Марков А. И. Применение ультразвука при механической обработке и поверхностном упрочнении труднообрабатываемых материалов // Применение ультразвука в промышленности / Под ред. А. И. Маркова. — М.: Машиностроение; София: Техника, 1975. — С. 172–179.
18. Кулемин А. В., Кононов В. В., Стебельков И. А. Повышение усталостной прочности деталей путем УЗ поверхностной обработки // Пробл. прочности. — 1981. — № 1. — С. 70–74.
19. Коррозионно-усталостная прочность стали ЮЗ при упрочнении ультразвуковым инструментом / В. Г. Степанов, Е. Ш. Статников, М. И. Клестов и др. // Технология судостроения. — 1975. — № 1. — С. 70–74.
20. Повышение сопротивления усталости наплавленных валов УЗ обработкой / Т. Г. Кравцов, Н. Ф. Рыжов, Е. Ш. Статников и др. // Автомат. сварка. — 1981. — № 10. — С. 35–38.
21. А. с. 472782 СССР. Ультразвуковая головка для деформационного упрочнения и релаксационной обработки / Е. Ш. Статников, Л. В. Журавлев, А. Ф. Алексеев. — 1975. — Бюл. № 21.
22. Статников Е. Ш., Шевцов Е. М., Куликов В. Ф. Ультразвуковой ударный инструмент для упрочнения сварных швов и уменьшения остаточных напряжений // Новые физические методы интенсификации технологических процессов. — М.: Металлургия, 1977. — С. 27–29.
23. А. с. 1143 СССР. Ультразвуковой многобойковый инструмент / Г. И. Прокопенко, В. П. Кривко. — 1978. — Бюл. № 13.
24. Пат. 8366 Украина. Устройство для УЗ обработки / Т. А. Красовский, Г. И. Прокопенко, А. Ф. Твердохлеб. — Оpubл. 29.03.96, Бюл. № 1.
25. Повышение сопротивления усталости сварных соединений металлоконструкций ультразвуковой ударной обработкой / В. И. Труфяков, П. П. Михеев, Е. Ш. Статников и др. — Киев, 1989. — Информ. письмо / АН УССР. Ин-т электросварки им. Е. О. Патона; [4 с.]. (Сер. Сварн. конструкции).
26. Михеев П. П. Повышение сопротивления усталости сварных соединений конструкций ультразвуковой ударной обработкой // Пробл. сварки и спец. электрометаллургии: Сб. науч. тр. ИЭС им. Е. О. Патона. — Киев: Наук. думка, 1990. — С. 41–47.
27. Эффективность применения ультразвуковой обработки для повышения сопротивления усталости сварных соединений / П. П. Михеев, А. Я. Недосека, И. В. Пархоменко // Автомат. сварка. — 1984. — № 3. — С. 4–7.
28. Повышение сопротивления усталости сварных соединений УЗ ударной обработкой / П. П. Михеев, А. Я. Недосека, И. В. Пархоменко и др. // Ультразвуковые колебания и их влияние на механические характеристики конструкционных материалов / Под ред. В. А. Кузьменко. — Киев: Наук. думка, 1986. — С. 42–46.
29. А. с. 1420035 СССР. Способ обработки сварных металлоконструкций / Е. Ш. Статников, В. И. Труфяков, П. П. Михеев и др. — Заявл. 23.02.87; Оpubл. 30.08.88, Бюл. № 32.
30. Пат. 2031144 Россия. Способ ультразвуковой ударной обработки и операционный технологический комплекс для его осуществления / Б. Е. Патон, Л. М. Лобанов, Е. Ш. Статников и др. — Заявл. 11.05.90; Оpubл. 1995, Бюл. № 8.
31. Пат. 12741 Украина. Спосіб ультразвукової ударної обробки і операційний технологічний комплекс для його реалізації / Б. Є. Патон, Л. М. Лобанов, Е. Ш. Статников та ін. — Заявл. 11.05.90; Оpubл. 28.02.97, Бюл. № 1.
32. Пат. 105608 Франция. Procédé de ravail par chocs aux ultra-sons ensemble technologique operationnel pour le travail par cyocs aux ultra-sons / В. Е. Paton, L. M. Lobanov, E. Sh. Statnikov et al. — Заявл. 08.05.90; Оpubл. 22.11.91.
33. Le martelage par ultrasons des soudures en acier HLE / P. Castellucci, V. I. Trufiakov, P. P. Mikheev, E. Sh. Statnikov // Soudage et Technigues connexes. — 1991. — 45, 5/6. — P. 31–37.
34. Improvement of fatigue strength in welded joint (in HSS and in aluminium alloy) by ultrasonic hammer peening / I. I. Janosh, H. Koneczny, S. Debiez et al. — S. I. — [1995]. — 21 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XIII 1594–95).
35. Способы повышения сопротивления усталости сварных узлов аэродинамических труб / В. И. Труфяков, П. П. Михеев, А. З. Кузьменко и др. // Исследование характеристик сталей для криогенной аэродинамической трубы: Тр. ГИПРОНИИАВИАПРОМ. — 1993. — Вып. 33. — С. 68–84.
36. Повышение сопротивления усталости несущих элементов сварных конструкций при циклическом сжатии / А. Г. Буренко, Е. К. Добыкина, П. П. Михеев, Ю. Ф. Кудрявцев // Автомат. сварка. — 1993. — № 3. — С. 8–12.
37. Increasing the fatigue strength of welded joints in cyclic compression / Y. F. Kudryavtsev, V. I. Trufiakov, P. P. Mik-



- heev et al. — S. 1. — [1994]. — 5 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XIII-1569-94).
38. *Повышение сопротивления усталости сварных узлов из труб ультразвуковой ударной обработкой* / П. П. Михеев, Э. Ф. Гарф, А. З. Кузьменко и др. // Автомат. сварка. — 1992. — № 11/12. — С. 32–35.
  39. *Improvement of fatigue resistance of tubular welded connections by ultrasonic peening* / P. P. Mikheev, E. F. Garf, F. Z. Kuzmenko et al. // Intern. of Offshore and Polar Eng. — 1996. — 6. — P. 304–307.
  40. *Гарф Э. Ф., Литвиненко А. Е., Смирнов А. Х.* Оценка долговечности трубчатых узлов, подвергнутых ультразвуковой ударной обработке // Автомат. сварка. — 2001. — № 2. — С. 13–16.
  41. *Кудрявцев Ю. Ф., Коршун В. Ф., Кузьменко А. З.* Повышение циклической долговечности сварных соединений ультразвуковой ударной обработкой // Там же. — 1989. — № 7. — С. 24–28.
  42. *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.
  43. *Ultrasonic impact treatment of welded joints* / V. I. Trufiakov, P. P. Mikheev, Y. F. Kudryavtsev, E. Sh. Statnikov. — S. 1. — [1995]. — 11 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XIII-1609-95).
  44. *Specification for welded toe improvement by ultrasonic impact treatment* / E. Sh. Statnikov, V. I. Trufiakov, P. P. Mikheev, Y. F. Kudryavtsev. — [1996]. — 10 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XIII-1617-96).
  45. *Haagensen P. I.* Collaborative test program on improvement methods. — S. 1. [1994]. — 21 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XIII-WG2-30-94).
  46. *The efficiency of ultrasonic impact treatment for improving the fatigue strength of welded joints* / V. I. Trufiakov, E. Sh. Statnikov, P. P. Mikheev, A. Z. Kuzmenko. — [1998]. — 12 p. — (Intern. Inst. of Welding Doc. XIII-1745-98).
  47. *Comparison of ultrasonic impact treatment (UIT) and other fatigue life improvement methods* / E. Sh. Statnikov, V. O. Muktepavel, V. I. Trufiakov et al. — [2000]. — 30 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XIII-1817-00).
  48. *Пат. 13936* Украина. Ультразвуковая головка для поверхностного упрочнения металлических поверхностей / Г. И. Прокопенко, А. В. Козлов. — Оpubл. 25.04.97, Бюл. — № 2.
  49. *Пат. 47536* Украина. Пристрій для ультразвукової ударної обробки металів / Г. І. Прокопенко, Я. І. Клейман, О. В. Козлов та ін. — Оpubл. 15.07.2002, Бюл. № 7.
  50. *Pat. 6467321.2002 USA.* Device for ultrasonic peening of metals / G. Prokopenko, J. Kleiman, O. Kozlov et al.
  51. *Пат. 60390* Украина. Спосіб обробки зварних з'єднань металоконструкцій високочастотною проковкою / Л. М. Лобанов, П. П. Михеев, Г. І. Прокопенко та ін. — Оpubл. 15.10.2003, Бюл. № 10.
  52. *Lixing H., Dongpo W., Yujeng Zh., Junmei Ch.* Investigation on improving fatigue properties of welded joints by ultrasonic peening method. — [2000]. — 10 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XIII-1812-00).
  53. *Применение* высокочастотной механической проковки для повышения сопротивления усталости стыковых соединений алюминиевых сплавов / В. И. Труфяков, В. А. Шонин, В. С. Машин, Д. С. Романовский // Автомат. сварка. — 2001. — № 7. — С. 7–11.
  54. *Haagensen P. J., Statnikov E. Sh., Lopez-Martinez L.* Introductory fatigue tests on welded joints in high strength steel and aluminium improved by various methods including ultrasonic impact treatment (UIT). — [1998]. — 12 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XIII-1748-98).
  55. *Михеев П. П., Статников Е. Ш., Кузьменко А. З.* Повышение сопротивления усталости сварных соединений металлоконструкций ультразвуковой ударной обработкой // Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. «Ультразвук в технологии машиностроения-91». — Архангельск, 1991. — С. 14–17.
  56. *Арановский Д. Е., Статников Е. Ш., Михеев П. П.* Исследование эффективности УЗ ударной обработки типовых сварных соединений // Там же. — С. 10–13.

The results of studying the effectiveness of application of high-frequency mechanical peening (HFMP) to increase the fatigue resistance of welded joints on steels of different strength classes and aluminium alloys have been generalized. General regularities are established of variation of fatigue fracture resistance of welded joints as a result of HFMP, determined by the mechanical properties of the material, level of concentration of working stresses, asymmetry of external loading cycle, magnitude and sign of the residual stresses induced by treatment in the concentrator zone. A procedure is developed for calculation-based prediction of the effectiveness of HFMP, depending on the above factors.

Поступила в редакцию 15.07.2005

## ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ СИСТЕМА КОРРОЗИОННОГО МОНИТОРИНГА МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

*Защита магистральных трубопроводов от коррозии является чрезвычайно актуальной проблемой. В комплексе мер по борьбе с коррозией трубопроводов важное место занимает диагностика коррозионного состояния трубопроводов. В лаборатории коррозии ИЭС им. Е. О. Патона разработана электрохимическая микропроцессорная система (ЭХМС) для коррозионного мониторинга трубопроводов. В состав ЭХМС входит измерительный блок ЭХМС-ИБ с системой GPS, прерыватели тока катодной защиты ПТКЗ-30, катушка провода (1000 м) со счетчиком метража, медно-сульфатные электроды сравнения, датчики скорости коррозии, устройство для углубления датчика скорости коррозии, ЗИП.*

*С помощью ЭХМС можно измерять электрохимические потенциалы (поляризационного, коррозионного, суммарного с омической составляющей, поперечного и продольного градиентов потенциалов по всей длине трубопровода), а также скорость коррозии металла трубопровода с внешней и внутренней поверхности трубы.*

**Контакты:** 03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11  
Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины  
Тел.: (38044) 287 66 79; e-mail: reservoir@paton.kiev.ua