

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

В. А. ДЕГТЯРЕВ

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины,  
01014, г. Киев-14, ул. Тимирязевская, 2. E-mail: ips@ipp.kiev.ua

Показана эффективность выбора неповреждающих режимов виброобработки сварных элементов металлоконструкций низкоуглеродистой стали с целью снижения в них остаточных напряжений без опасности усталостного повреждения на стадии технологической обработки. Сравнительные усталостные исследования показали увеличение долговечности виброобработанных сварных соединений и повышение их предела выносливости по мере увеличения базы испытаний. Предложен метод определения пределов выносливости стыковых сварных соединений низкоуглеродистой стали после разных режимов высокочастотной механической проковки, используя экспериментальные данные измерения глубины канавки. Показана эффективность повышения их предела выносливости в зависимости от скорости высокочастотной механической проковки и амплитуды колебаний рабочего инструмента. Проанализированы результаты экспериментальных исследований повышения сопротивления усталости сварных соединений низколегированных и низкоуглеродистых сталей при гармоническом и повторном ударном нагружении при температуре  $-60^{\circ}\text{C}$  после высокочастотной механической проковки, аргонодуговой, взрывной, механической обработок и представлен сравнительный анализ их эффективности. Библиогр. 23, табл. 4, рис. 10.

*Ключевые слова:* сварное соединение, сопротивление усталости, предел выносливости, остаточные напряжения, глубина канавки, скорость проковки

К настоящему времени уже накоплен большой опыт использования различных технологических методов повышения сопротивления усталости сварных соединений [1–3]. Применение того или иного метода связано с особенностью производства, наличием технологического оборудования, условиями эксплуатации и так далее. Однако многие из них требуют своей оптимизации и проведения дополнительных исследований. Это в полной мере касается виброобработки (ВО) [4] и высокочастотной механической проковки (ВМП) [5] сварных элементов металлоконструкций.

Анализ работ, посвященных виброобработке, показал, что ее используют в целях снижения остаточных напряжений (ОН) растяжения, которые могут уменьшить срок службы изделия [1], или изменить его форму [6]. Ее преимущество в том, что, подвергая циклическому нагружению в целом всю конструкцию, происходит снижение ОН в элементах, имеющих разную жесткость, за один технологический цикл. Однако недостаток ВО в том, что величина переменных напряжений в конструкциях, создаваемых механическими вибраторами, подбирается опытным путем [7, 8].

Высокочастотная механическая проковка разных типов сварных соединений обеспечивает существенное повышение их сопротивления усталости и ресурс [9], в том числе в условиях низких климатических температур, за счет упрочнения узкой зоны в месте перехода шва к основному ме-

таллу. В настоящее время достигнут ощутимый прогресс в поиске надежного критерия, отражающего ее эффективность. Вместо скорости перемещения рабочего инструмента вдоль сварного шва [10, 11] предложена методика оценки повышения пределов выносливости по глубине канавки [12], образующейся после ВМП, и предложены параметры скорости ВМП в зависимости от амплитуды колебаний рабочего инструмента. Однако до настоящего времени остается неисследованным влияние разных режимов обработки на сопротивление усталости сварных соединений.

Целью настоящей работы являлась оптимизация различных видов упрочняющей обработки сварных соединений, экспериментальная оценка их влияния на сопротивление усталости сварных образцов и элементов металлоконструкций.

**Объекты исследования, испытательное оборудование.** Исследования влияния видов упрочняющих обработок проводились как в лабораторных условиях на сварных образцах из низколегированных и низкоуглеродистых сталей со стыковым и тавровым соединениями, так и в производственных условиях на сварных балках коробчатого сечения (далее балки) из листовой стали толщиной 20 мм, моделирующих конструкцию поддизельной рамы тепловоза. Используемые марки сталей проката, основные размеры образцов и их механические свойства приведены в табл. 1.

Образцы вырезались либо из сварных заготовок с размерами в плане  $400 \times 660$  мм, у которых стыковые соединения выполнялись ручной элект-

Т а б л и ц а 1. Основные размеры сварных образцов и механические свойства сталей при комнатной температуре

Марка стали, вид соединения	Размеры, мм						$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа
	$h$	$b$	$L$	$e$	$\kappa$	$H$		
14X2ГМР, стыковое	16	80	0	12	-	-	702	800
12ГН2МФАЮ, стыковое	24	0	0	-	-	-	620	710
15ХСНД, тавровое	14	80	0	12	14	0	435	600
09Г2С, тавровое	20	0	0	-	20	36	340	520
сталь 20, с продольным ребром	20	100	0		12	0	290	0
сталь 20, балка	190	170	2100				290	0
Ст.3сп, стыковое	14	0	0				300	470

*Примечание:*  $h, b, L$  – толщина, ширина, длина образца;  $e$  – ширина наплавки;  $\kappa, H$  – толщина и высота приваренного ребра.

тродуговой сваркой (сталь 14X2ГМР), или полуавтоматической в среде углекислого газа (стали 12ГН2МФАЮ, Ст.3сп), а тавровые соединения — автоматической сваркой под флюсом (стали 15ХСНД и 09Г2С), либо индивидуально с приваренным вдоль длинной стороны образца полуавтоматической сваркой в среде углекислого газа ребром (сталь 20). Для получения пределов выносливости сварных конструкций по результатам испытаний образцов последние должны иметь высокие остаточные напряжения, которые создавались путем наплавки на тыльную сторону образца продольного валика, или погружением его на половину толщины в воду. Остаточные напряжения в балках из стали 20 создавались путем нанесения по краям продольных наплавки, а концентраторы напряжений — приваркой в поле ОН растяжения специальных накладок. Величина и знак ОН в направлении, совпадающем с направлением приложения нагрузки, определялись магнитошумовым методом, основанным на использовании эффекта Баркгаузена [13]. Учитывая, что в околошовной зоне в результате сварки материал претерпевает структурные изменения, для повышения точности оценки величины и распределения ОН предварительно строилась серия градуировочных кривых. Каждая кривая определялась на том расстоянии от наплавки, на котором происходило определение ОН.

Испытания образцов на усталость проводились при изгибе в условиях заданного коэффициента асимметрии цикла напряжений  $R$  при гармоническом нагружении в режиме заданной амплитуды деформации и повторном ударном нагружении в режиме заданной энергии удара при температуре  $-60\text{ }^\circ\text{C}$  [14]. Амплитуда напряжений измерялась тензометрическим методом. При низкотемпературных испытаниях образцы охлаждались регулируемой подачей жидкого азота через специально выполненные в них отверстия. За критерий разрушения образцов принимали образование предельной длины трещины на поверхности, равной 10 мм, что соответствует ее докритической глубине примерно 2,5 мм [3], или их хрупкое разрушение при меньшей длине трещины.

Виброобработка балок проводилась как посредством электромеханического вибратора ИВ107 путем создания переменных напряжений на резонансных или околорезонансных частотах, так и пульсатором ЦДМ-200пу в режиме вынужденных колебаний, позволяющим проводить испытания при любой асимметрии цикла. Амплитуда напряжений измерялась тензометрическим методом. При испытаниях использовались трехточечная и консольная схемы нагружений.

Высокочастотной механической проковке подвергалась линия сплавления сварного шва с основным металлом посредством ультразвукового магнитострикционного преобразователя [15] с частотой колебаний 24,5 КГц, возбуждаемого генератором УЗГ-10М, и потребляемой мощностью 1,2 кВт, а впоследствии использовался ультразвуковой пьезокерамический инструмент USP-300 [16] с частотой колебаний 22,0 КГц. Деформирующий механизм обоих инструментов представлял собой специальную головку со встроенными в нее в ряд четырем стальными стержнями диаметром 3 мм. После ВМП образуется канавка шириной 2,8...3,5 мм с глубиной  $h$ , зависящей от скорости  $V$  перемещения рабочего инструмента вдоль шва (скорость проковки), которую определяли как отношение длины обрабатываемого шва ко времени обработки. При каждой скорости обрабатывалось не менее двух образцов, а значение глубины канавки определялось как среднее арифметическое.

**Результаты исследований и их обсуждение.**  
*Анализ эффективности виброобработки.* Оптимизация методики виброобработки, заключающаяся в выборе неповреждающих режимов нагружения с целью снижения ОН, отрабатывалась на примере испытаний сварных балок из стали 20 (см. табл. 1). Для определения комплексной диаграммы предельных напряжений цикла (ДПНЦ), необходимой для этой цели, использовались образцы из стали 20 с приваренным вдоль длинной стороны ребром. Приварка ребра полуавтоматическим способом в среде углекислого газа при погружении образца на половину толщины в воду позволила создать на границе перехода шва к основному металлу высокие ОН растяжения, равные



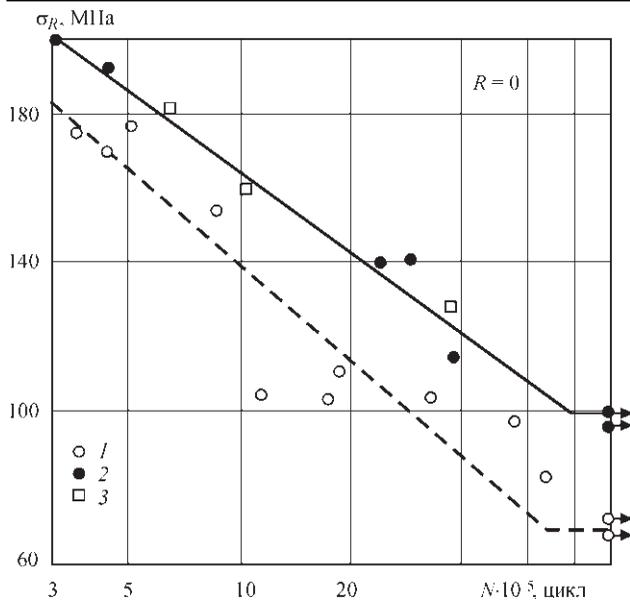


Рис. 3. Кривые усталости сварных образцов из стали 20 с приваренным ребром в исходном состоянии (1), после ВО (2) и термообработки (3)

на 32 %, которые составили 0,61 и 0,51 предела текучести соответственно. В качестве сравнения значения ОН в балках после термообработки составили в среднем  $0,35\sigma_T$ .

Для оценки влияния низких ОН были проведены сравнительные усталостные испытания образцов. Предварительно исходные ОН снижались в них неповреждающими режимами нагружения до уровня, равного  $0,5\sigma_T$ . Анализ полученных результатов исследований при гармоническом отнулевом нагружении в условиях комнатной температуры (рис. 3) свидетельствует об увеличении долговечности образцов после ВО во всем диапазоне приложения напряжений (кривая 2). Для сравнения на рисунке приведена также кривая усталости образцов с высокими остаточными напряжениями в исходном состоянии (кривая 1). Видно, что с понижением нагрузки действие остаточных напряжений проявляется в большей мере, вследствие чего долговечность виброобработанных образцов с увеличением базы испытаний по сравнению с исходным состоянием увеличивается, а предел выносливости повышается. Например, на базе  $2 \cdot 10^6$  и  $5 \cdot 10^6$  циклов нагружений он повысился на 27 и 40 % соответственно.

Чтобы оценить долговечность образцов при еще меньших значениях ОН, были проведены испытания образцов, подвергшихся отпуску при 600...620 °С. Максимальное ОН в них составило примерно  $0,35\sigma_T$ . Видно, что точки неплохо ложатся на кривую усталости виброобработанных образцов. Подобные результаты были получены при сравнительных усталостных испытаниях соединительных балок 120-тонной железнодорожной цистерны [18]. Основываясь на результатах испы-

таний образцов, можно предположить подобное повышение сопротивления усталости и увеличение долговечности металлоконструкций после ВО в реальных условиях их эксплуатации.

Таким образом, проведенные испытания показали, что для увеличения долговечности и сопротивления усталости ответственных конструкций из низкоуглеродистой стали нет необходимости во всех случаях применять дорогостоящую процедуру термообработки для максимального снижения в них ОН.

Однако опыт эксплуатации многих металлоконструкций свидетельствует о их усталостном разрушении в узкой зоне перехода шва к основному металлу. Такую задачу с успехом решает высокочастотная механическая проковка.

*Анализ эффективности высокочастотной механической проковки.* Проведенные ранее исследования [12] позволили предложить оптимальный режим обработки, при котором обеспечивается глубина канавки после проковки зоны сварного шва не менее 0,14 мм. На основании полученных зависимостей следует, что такой глубине канавки соответствует скорость перемещения рабочего инструмента вдоль сварного шва  $V = 0,065$  м/мин при амплитуде колебаний торца волновода  $a = 19$  мкм и 0,092 м/мин — при 26 мкм. Это хорошо иллюстрируют результаты сравнительных усталостных испытаний тавровых соединений низколегированной стали 09Г2С (рис. 4) и стыковых соединений низкоуглеродистой стали Ст.3сп (рис. 5) в условиях гармонического нагружения при комнатной температуре и ударного нагружения при  $-60$  °С. После порезки сварной заготовки на образцы последние (см. табл. 1) подвергались ВМП. Анализ данных (рис. 4) свидетельствует о том, что в исходном состоянии сопротивление усталости в условиях повторного ударного нагружения при  $-60$ °С (кривая 3) меньше, чем гармонического нагружения и комнатной температуре (кривая 2). Пределы выносливости, определенные на базе  $2 \cdot 10^6$  циклов нагружений, составили 307 и 360 МПа соответственно. Упрочнение образцов со скоростью проковки выше рекомендуемой показало, что их сопротивление усталости в условиях повторного ударного нагружения несколько повысилось, однако оно не превысило сопротивления усталости в исходном состоянии при гармоническом нагружении. Точки легли на кривую усталости 2. ВМП, выполненная в строгом соответствии с рекомендуемой в работе скоростью, позволила существенно повысить сопротивление усталости в условиях ударного нагружения во всем исследованном диапазоне долговечности (кривая 1). Предел выносливости повысился на 21 % по сравнению с данными испытаний образцов в исходном состоянии

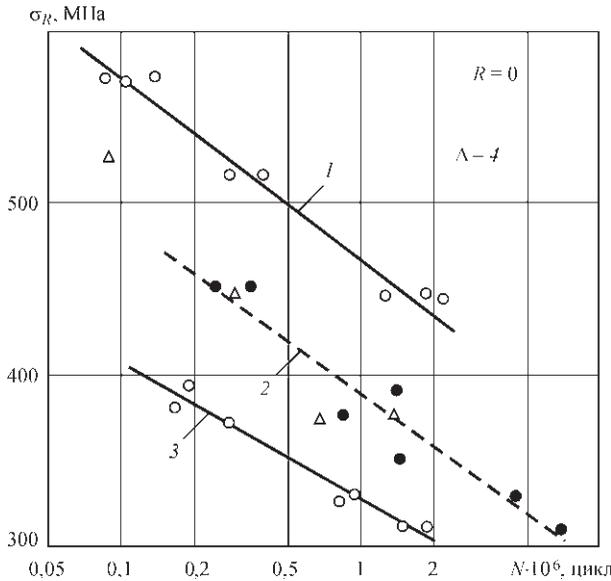


Рис. 4. Кривые усталости тавровых соединений стали 09Г2С в исходном состоянии (2, 3), после ВМП (1, 4); в условиях гармонического нагружения при комнатной температуре (2) и ударного нагружения при  $-60^{\circ}\text{C}$  (1, 3, 4)

в условиях гармонического нагружения. Анализ результатов испытаний сварных соединений стали Ст.3сп (рис. 5), обработанных со скоростью проковки, равной 0,065 м/мин, показал, что предел выносливости составил 375 МПа (кривая 1), что на 87 % выше такового, полученного при испытаниях образцов в исходном состоянии (кривая 2). При отступлении от рекомендаций относительно скорости проковки и нарушении технологии ВМП имелись наплывы металла на сварной шов — «гребешки», явившиеся мощными источниками концентрации напряжений. В этом случае трещина усталости развивалась из этих гребешков. Аналогичные результаты получены в работе [19]. В результате долговечность таких образцов увеличилась примерно в 2,5 раза по сравнению с исходным состоянием,

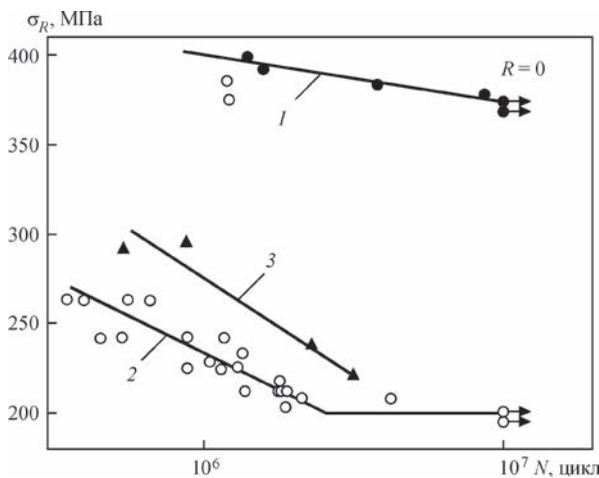


Рис. 5. Кривые усталости стыковых соединений стали Ст.3сп: 1 — в соответствии с рекомендуемой скоростью проковки; 2 — в исходном состоянии; 3 — с отступлением от рекомендуемой технологии ВМП

а повышение предела выносливости составило всего 11 % (кривая 3).

Известно, что в результате ВМП происходит деформационное упрочнение материала на некоторую глубину от поверхности канавки. Очевидно, разным режимам обработки будет соответствовать не только разная глубина пластически деформированного слоя, но и разная глубина канавки  $h$ . Влияние разных режимов обработки на сопротивление усталости определялось на примере испытаний сварных стыковых соединений стали Ст.3сп (см. табл. 1). После порезки сварной заготовки на образцы последние подвергались ВМП при амплитуде колебаний рабочего инструмента  $a = 19$  мкм и приведенной скорости его перемещения  $V$ , равной 0,232, 0,116 и 0,06 м/мин соответственно. После упрочнения образцы зависящая от скорости обработки канавка шириной 2,8...3,5 мм и глубиной, равной 0,041, 0,062, 0,143 мм соответственно. Анализ влияния глубины канавки на эффект упрочнения, выражающийся в повышении предела выносливости сварного соединения, выполнен на основании рис. 6, на котором отмечены экспериментально определенные пределы выносливости сварных стыковых соединений в исходном состоянии ( $\sigma_R^H = 200$  МПа) и при скорости ВМП, равной 0,065 м/мин ( $\sigma_R = 375$  МПа), при  $a = 19$  мкм (см. рис. 5), а также соответствующие им значения глубины канавки. Расчетная зависимость предела выносливости сварных соединений от текущей глубины канавки  $h_i$  в этом случае имеет вид

$$\sigma_R^i = \sigma_R^H + Kh_i = \sigma_R^H + \frac{\sigma_R - \sigma_R^H}{h} h_i, \quad (1)$$

где  $K = \frac{\sigma_R - \sigma_R^H}{h}$  — коэффициент корреляции;  $h_i$  — текущее значение глубины канавки, полученной после разной скорости ВМП.

По известным значениям пределов выносливости сварных соединений и экспериментально установленной  $h = 0,143$  мм нашли, что  $K = 1,224 \cdot 10^3$  МПа/мм. Предложенное выражение позволяет расчетным способом оценить предел выносливости сварного соединения (затемненные точки) при любой глубине канавки, не проводя трудоемких и продолжительных во времени испытаний. Расчетные значения  $\sigma_R^i$  приведены в табл. 2. Предположение о пропорциональном повышении предела выносливости упрочненного сварного соединения с увеличением  $h_i$  требует дальнейшего экспериментального подтверждения. Однако в пользу пропорционального его увеличения свидетельствуют как литературные данные испытаний упрочненных образцов [20], так и имеющиеся сведения о пропорциональной зависимости между глубиной канавки и долговечностью

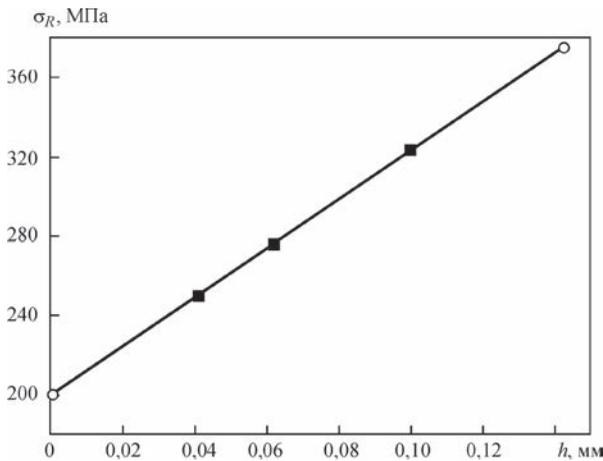


Рис. 6. Расчетная (темные точки) и экспериментальная (светлые точки) зависимость предела выносливости упрочненных стыковых сварных соединений от глубины канавки

глубина канавки представляет собой интегральную характеристику, косвенно отражающую глубину пластически деформированного слоя и возникающих при этом ОН сжатия. Полученная в работе [12] глубина канавки для данной толщины сварного соединения рассматривается в качестве оптимальной, так как дальнейшее ее увеличение может не сопровождаться упрочнением и увеличивается вероятность шелушения упрочненной поверхности, что негативно сказывается на сопротивлении усталости образцов. Что касается коэффициента концентрации напряжений то, как показали ранее проведенные исследования [21], доля его влияния в общей совокупности всех факторов составляет всего 14 %.

Известно, что глубина канавки в значительной степени зависит от амплитуды колебаний рабочего инструмента. Как показала практика, наиболее часто сварные элементы металлоконструкций обрабатываются при  $a$ , изменяющейся в пределах от 19 до 26 мкм. В связи с этим, используя ранее полученные зависимости глубины канавки от скорости ВМП при амплитудах 19 и 26 мкм [12], на рис. 7 показан сводный график, на котором приведены зависимости между глубиной канавки и пределом выносливости сварных соединений (табл. 2) с одной стороны, и между глубиной канавки и скоростью проковки при разной амплитуде колебаний рабочего инструмента с другой, соответственно. Анализ представленных в таком виде результатов позволяет определить не только изменение глубины канавки при заданной скорости проковки в зависимости от амплитуды колебаний рабочего инструмента, но и предел выносливости сварного соединения. Из графика следует, что по мере увеличения скорости обработки глубина канавки уменьшается, а влияние амплитуды колебаний рабочего инструмента на прочностные характеристики становится менее эффективным, так как кривые 1 и 2 практически сходятся. При  $V = 0,4$  м/мин  $h$  практи-

Таблица 2. Зависимость пределов выносливости стыковых соединений от глубины канавки и соответствующая им скорость ВМП при разной амплитуде колебаний рабочего инструмента

Глубина канавки $h_p$ , мм	Предел выносливости $\sigma_R^i$ , МПа		Скорость ВМП (м/мин) при амплитуде колебаний	
	расчет	эксперимент	$a = 19$ мкм	$a = 26$ мкм
0,041	251	-	0,4	0,4
0,062	278	-	0,11	0,24
0,1	325	-	0,075	0,125
0,143	379	375	0,06	0,092

чески не зависит от  $a$ , что определяет, в свою очередь, одинаковые значения пределов выносливости сварных образцов. Полученный эффект может иметь практическое значение при использовании данной технологии упрочнения.

Зачастую при ремонтно-восстановительных работах в труднодоступных местах элементов конструкций не всегда возможно надежно определить глубину канавки, а легче фиксировать скорость проковки. В связи с этим на рис. 8 приведены зависимости пределов выносливости сварных соединений от скорости проковки, определенные при амплитуде колебаний рабочего инструмента 19 и 26 мкм соответственно. Видно, что с увеличением  $V$  происходит не только их снижение, но и уменьшение разницы между ними. Кроме того, при  $V = 0,4$  м/мин независимо от  $a$  значения  $\sigma_R$  одинаковые, однако на 25 % превышающие предел выносливости сварного соединения в исходном состоянии.

Относительное повышение  $\sigma_R$  сварных соединений, определенных после разной скорости ВМП в диапазоне изменения  $a$  от 19 до 26 мкм, хорошо иллюстрируют зависимости, приведенные на рис. 9. Их расчетные значения при текущей амплитуде колебаний рабочего инструмента  $a_i$  можно определить по уравнению

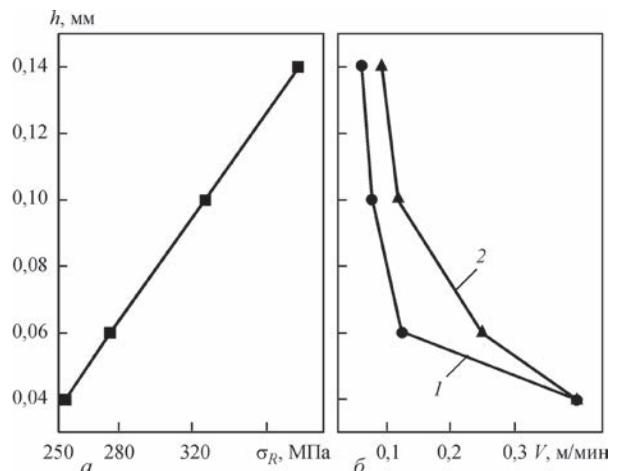


Рис. 7. Зависимость между глубиной канавки и пределом выносливости упрочненных сварных соединений (а), а также скоростью ВМП при амплитуде колебаний рабочего инструмента 19 (1) и 26 мкм (2) (б)

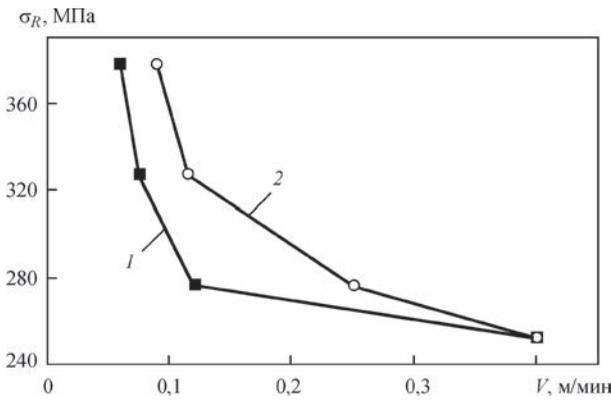


Рис. 8. Зависимость пределов выносливости сварных соединений от скорости ВМП при амплитуде колебаний рабочего инструмента 19 (1) и 26 (2) мкм

$$\frac{\sigma_{Ri}}{\sigma_R^H} = \frac{\sigma_{R1}}{\sigma_R^H} + \frac{\sigma_{R2} - \sigma_{R1}}{\sigma_R^H(a_2 - a_1)}(a_i - a_1), \quad (2)$$

где  $\sigma_{R1}$  и  $\sigma_{R2}$  — пределы выносливости сварных соединений, определенные после разной скорости ВМП при амплитуде колебаний рабочего инструмента  $a_1 = 19$  мкм и  $a_2 = 26$  мкм соответственно (табл. 3);  $\beta = (\sigma_{R2} - \sigma_{R1}) / (\sigma_R^H(a_2 - a_1))$  — коэффициент с конкретным значением для каждой скорости проковки;  $\sigma_R^H = 200$  МПа — предел выносливости сварного соединения в исходном состоянии.

Из анализа результатов, приведенных на рисунке, следует, что как при уменьшении скорости проковки, так и увеличении амплитуды колебаний рабочего инструмента происходит более интенсивное повышение пределов выносливости. Представленные данные позволяют более осознанно подходить к выбору оптимальных режимов высокочастотной механической проковки при различной комбинации ее скорости и амплитуды колебаний рабочего инструмента.

*Анализ результатов применения механической, аргонодуговой, взрывной обработок.* Упрочнению подвергались зоны сварного шва в образцах из низколегированных сталей.

Механическая обработка (МО) стыкового соединения стали 14Х2ГМР, выполненного ручной электродуговой сваркой, заключалась в удалении усиления шва заподлицо с основным металлом.

Т а б л и ц а 3. Расчетные значения пределов выносливости стыковых сварных соединений, определенных после разной скорости ВМП при разной амплитуде колебаний рабочего инструмента

Скорость ВМП, м/мин	Предел выносливости $\sigma_R$ , МПа		$\beta \cdot 10^{-2}$ , мкм <sup>-1</sup>
	$a_1 = 19$ мкм	$a_2 = 26$ мкм	
0,1	290	350	4,29
0,2	269	290	1,79
0,3	255	265	0,714
0,4	250	250	0

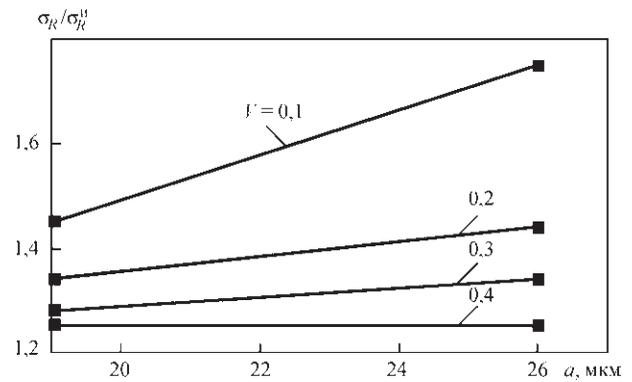


Рис. 9. Относительное повышение пределов выносливости сварных соединений, определенных после разной скорости ВМП в диапазоне изменения амплитуды колебаний рабочего инструмента 19...26 мкм

При аргонодуговой обработке (АДО) стыкового соединения стали 12ГН2МФАЮ, выполненного полуавтоматической сваркой в среде углекислого газа, оплавились зоны перехода шва к основному металлу неплавящимся вольфрамовым электродом диаметром 4 мм в среде аргона. Тавровое соединение стали 15ХСНД, выполненное автоматической сваркой под флюсом, подвергалось взрывной обработке (ВЗО). Для этого использовались цилиндрические заряды взрывчатого вещества марки ДША-12, уложенные вдоль сварного шва на пластилиновые подкладки.

Эффективность методов упрочнения вышеперечисленных типов сварных соединений в разных условиях циклического нагружения представлена на рис. 10. Чтобы не загромождать рисунки, некоторые кривые усталости приведены без экспериментальных точек. Там же приведены кривые усталости образцов в исходном состоянии. Испытания образцов с ОН проводились при  $R = 0$ , а без ОН при  $R = 0,5$ . Такой выбор был сделан на том основании, что, как показали ранее проведенные исследования [22], при  $R = 0,5$  пределы выносливости сварных образцов с высокими ОН и без них имеют одинаковые значения. Это дает возможность определить ДПНЦ сварного соединения с высокими ОН по результатам испытаний образцов без ОН. Анализ полученных результатов показал, что сопротивление усталости образцов в исходном состоянии при ударном нагружении ниже, чем при гармоническом (кривые 1, 2). Все обработки повышают сопротивление усталости сварных соединений как при гармоническом, так и ударном нагружении во всем исследованном диапазоне долговечности в пределах 1,1...1,6 раза. Из рисунка также видно, что сопротивление усталости обработанных соединений в условиях ударного нагружения и  $-60$  °С незначительно превышает их сопротивление усталости в исходном состоянии при гармоническом нагружении и комнатной температуре (кривые 2, 3). Это означает, что по-

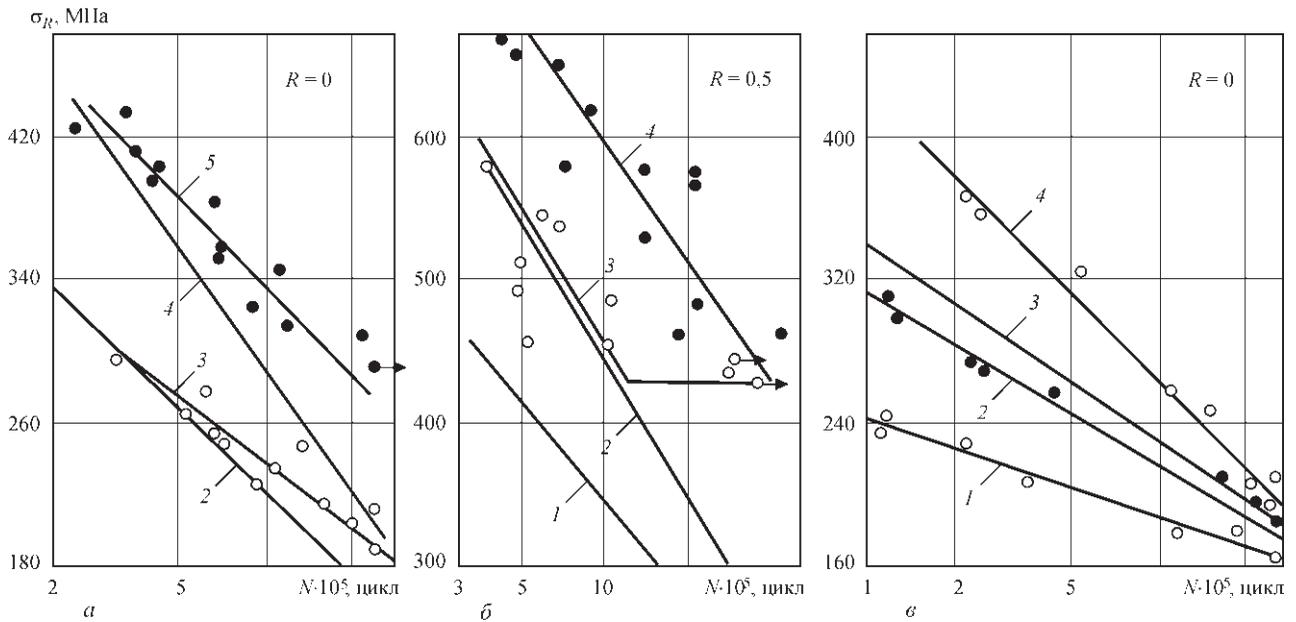


Рис. 10. Кривые усталости стыковых соединений сталей 14Х2ГМР (а) после механической, 12ГН2МФАЮ (б) после аргодуговой обработок, соответственно, таврового соединения 15ХСНД (в) после взрывной обработки: 1, 3 — ударное нагружение при -60 °С в исходном состоянии и после обработки, соответственно; 2, 4 — гармоническое нагружение при комнатной температуре в исходном состоянии и после обработки, соответственно; 5 — при -60 °С

ложительный эффект от упрочнения нивелируется отрицательным влиянием удара и низкой температуры, что имеет существенное значение для металлоконструкций, эксплуатируемых в условиях Крайнего Севера. Объяснением полученному результату служит то, что в условиях ударного нагружения и низкой температуры существующие в сварных швах поры становятся опасными источниками концентрации напряжений, из которых развиваются трещины усталости. Это было установлено при проведении исследований сварных соединений стали 14Х2ГМР со снятым усилением шва [23].

Чтобы сопоставить эффективность методов упрочнения сварных образцов с учетом различных условий испытания на усталость и дать им количественную оценку, ввели ряд коэффициентов. Влияние обработки на сопротивление усталости сварных соединений в условиях гармонического нагружения и комнатной температуры оценивали коэффициентом  $K_{V1}$ , а ударного нагружения и низкой температуры  $K_{V2}$ :

$$K_{V1} = \frac{\sigma_{RO}}{\sigma_R}, \quad (3)$$

Таблица 4. Сравнительная оценка влияния вида упрочняющей обработки на сопротивление усталости сварных соединений на базе  $10^6$  циклов нагружений

Марка стали, вид соедин.	Вид обработки шва	Характер нагружения	T, °C	$\sigma_R, \sigma_{RO}$ , МПа	$K_{V1}$	$K_{V2}$	$K_{V3}$
14Х2ГМР стыковое	МО	Ударный	-60	245	1,32	-	1,08
	МО	Гармонический	20	295			
	Без обработки	Гармонический	20	225			
12ГН2МФАЮ стыковое	АДО	Ударный	-60	451	1,37	1,35	1,02
	АДО	Гармонический	20	605			
	Без обработки	Гармонический	20	443			
	Без обработки	Ударный	-60	335			
15ХСНД тавровое	ВзО	Ударный	-60	235	1,22	1,26	1,07
	ВзО	Гармонический	20	269			
	Без обработки	Гармонический	20	220			
	Без обработки	Ударный	-60	187			
09Г2С тавровое	ВМП	Ударный	-60	468	-	1,38	1,18
	Без обработки	Гармонический	20	398			
	Без обработки	Ударный	-60	330			
сталь Ст.3сп стыковое	ВМП	Гармонический	20	402	1,71	-	-
	Без обработки	Гармонический	20	235			
сталь 20 с прив. ребром	ВО	Гармонический	20	166	1,19	-	-
	Без обработки	Гармонический	20	140			

$$K_{V2} = \frac{\sigma'_{RO}}{\sigma'_R}, \quad (4)$$

где  $\sigma_R$ ,  $\sigma'_R$  и  $\sigma_{RO}$ ,  $\sigma'_{RO}$  — пределы ограниченной выносливости сварного соединения в исходном состоянии и после дополнительной обработки соответственно, значения которых при одинаковой долговечности определяли по уравнениям кривых усталости.

Совместное влияние обработки, ударного режима нагружения и низкой температуры на сопротивление усталости исследуемых сварных соединений оценивали как

$$K_{V3} = \frac{\sigma'_{RO}}{\sigma'_R}. \quad (5)$$

Результаты расчетов коэффициентов для всех видов обработок представлены в табл. 4.

Из таблицы следует, что наиболее эффективным из рассмотренных методов упрочнения является ВМП, которая в условиях гармонического нагружения и комнатной температуры повышает сопротивление усталости упрочненных образцов на 71 %, определенного на базе  $10^6$  циклов нагружений, а в условиях повторного удара и низкой температуры на 18 % такого же соединения, испытанного в исходном состоянии при гармоническом нагружении и комнатной температуре. Это дает основание рекомендовать ее, при соблюдении правильной технологии обработки, для упрочнения конструкций, эксплуатируемых, в том числе, в условиях холодного климата. Относительно ВО можно отметить следующее. Несмотря на то, что этот метод не выделяется эффективностью повышения сопротивления усталости, однако имеет неоспоримое преимущество, заключающееся в возможности за один технологический цикл обработать элементы конструкции, характеризующиеся разной жесткостью. Анализ табличных данных также показал, что эффект упрочнения практически не зависит от условий испытаний. Это означает, что сопротивление усталости обработанных соединений в сопоставимых условиях испытаний повышается примерно одинаково. Можно отметить также то, что эффективность рассматриваемых обработок по коэффициенту  $K_{V3}$  в несколько раз меньше, чем просто в сопоставимых условиях испытаний, т. е. в условиях гармонического нагружения при комнатной температуре или ударного при  $-60$  °С. По эффективности упрочнения, оцениваемого в условиях гармонического нагружения на базе  $10^6$  циклов, обработки можно расположить в следующей последовательности: ВМП — 71 %, АДО — 37, МО — 32, ВЗО — 22, ВО — 19.

Таким образом, на основании проведенных исследований можно сделать вывод о том, что все

рассмотренные методы упрочняющих обработок повышают сопротивление усталости сварных соединений, но эффективность их разная и в существенной мере зависит от сочетания вида циклического нагружения и температуры окружающей среды.

### Выводы

1. Экспериментально апробирована методика оптимизации выбора режимов виброобработки сварных элементов металлоконструкций из низкоуглеродистых сталей, обеспечивающих эффективное снижение остаточных напряжений растяжения без опасности возникновения усталостных повреждений.

2. Предложена методика определения предела выносливости упрочненных технологией высокочастотной механической проковки стыковых сварных соединений по глубине канавки.

3. Установлена эффективность повышения пределов выносливости сварного соединения в зависимости от скорости высокочастотной механической проковки и амплитуды колебаний рабочего инструмента.

4. Установлено, что наиболее эффективным методом упрочнения исследованных сварных соединений, оцениваемых по критерию повышения сопротивления усталости в разных условиях циклического нагружения и температуры окружающей среды, является высокочастотная механическая проковка. Далее обработки по результативности можно расположить в следующей последовательности: аргонодуговая обработка, механическая зачистка усиления шва, взрывная обработка, виброобработка.

### Список литературы

1. Аснис А. Е., Иващенко Г. А. (1978) *Повышение прочности сварных конструкций*. Киев, Наукова думка.
2. Кудрявцев И. В., Наумченков Н. Е. (1976) *Усталость сварных конструкций*. Москва, Машиностроение.
3. Труфяков В. И. (1973) *Усталость сварных соединений*. Киев, Наукова думка.
4. Dreger D. R. (1978) Good Vibes Reduce Stresses in Metall Parts. *Machine Design*, 50, 13, 100–103.
5. Ting W., Dongpo W., Lixing H., Yufend Z. (2008) Discussion on fatigue design of welded joints enhanced by ultrasonic peening treatment (UPT). *International J. of Fatigue*, 3, 1–7.
6. Шпеер Ф. З., Панов В. И. (1983) Вибрационная обработка сварных крупногабаритных конструкций с целью уменьшения деформации и склонности к образованию трещин. *Сварочное производство*, 5, 13–15.
7. Томпсон. Л. (1969) *Способ снятия напряжений в деталях вибрацией и установка для этих целей*. Великобритания, Пат. 1259556.
8. Зимницкий Ю. А., Хвальнский В. Н. (2004) Экспериментальная проверка влияния низкочастотной виброобработки на эксплуатационную надежность корпусных конструкций. *Судостроение*, 1, 50–52.
9. Xiaohui Z., Dongpo W., Lixing H. (2011) Analysis of the S-N curves of welded joints enhanced by ultrasonic peening treatment. *Materials and Design*, 32, 88–96.
10. Михеев П. П., Недосека А. Я., Пархоменко И. В. и др. (1984) Эффективность применения ультразвуковой удар-

- ной обработки для повышения сопротивления усталости сварных соединений. *Автоматическая сварка*, **3**, 4–7.
11. Лобанов Л. М., Кирьян В. И., Кныш В. В., Прокопенко Г. И. (2006) Повышение сопротивления усталости сварных соединений металлоконструкций высокочастотной механической проковкой (обзор). *Там же*, **9**, 3–11.
  12. Дегтярев В. А. (2011) Оценка влияния режимов высокочастотной механической проковки сварных соединений на их сопротивление усталости. *Проблемы прочности*, **2**, 61–70.
  13. Гришаков С. В., Ковалев А. М. (1988) *Использование эффекта Баркгаузена для оценки напряжений и поврежденности в ферромагнитных материалах*. АН УССР, Институт проблем прочности. Препр. Киев.
  14. Дегтярев В. А. (1982) Установки типа ДСО для испытаний на усталость при повторном ударном нагружении с различной асимметрией цикла. *Проблемы прочности*, **10**, 110–113.
  15. Статников Е. Ш., Шевцов Е. М., Куликов В. Ф. (1977) Ультразвуковой ударный инструмент для упрочнения сварных швов и уменьшения остаточных напряжений. *Новые физические методы интенсификации технологических процессов*. Москва, Металлургия, сс. 27–29.
  16. Прокопенко Г. И., Клейман Я. И., Козлов О. В. та ін. *Пристрій для ультразвукової ударної обробки металів*. Україна, Пат. 47536. 15.07.2002.
  17. Дегтярев В. А. (1991) Влияние коэффициента асимметрии цикла напряжений на усталость и циклическую ползучесть низколегированных сталей. *Сообщ. 2. Проблемы прочности*, **2**, 27–31.
  18. Висилковский Н. Г., Пожидаев Н. Г., Демин В. М. (1992) Проблемы использования виброобработки вместо термообработки. *Тяжелое машиностроение*, **8**, 20–22.
  19. Marguis G. (2010) Failure modes and fatigue strength of improved HSS welds. *Engineering Fracture Mechanics*, **7**, 2051–2062.
  20. Серенсен С. В., Когаев В. П., Шнейдерович Р. М. (1975) *Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность*. Москва, Машиностроение.
  21. Кирьян В. И., Кныш В. В. (2008) Высокочастотная механическая проковка сварных соединений металлоконструкций. *Сварочное производство*, **11**, 36–41.
  22. Шульгинов Б. С., Дегтярев В. А., Матвеев В. В. (1984) О предельных напряжениях цикла сварных соединений с высокими остаточными напряжениями. *Проблемы прочности*, **3**, 58–61.
  23. Шульгинов Б. С., Матвеев В. В., Дегтярев В. А., Дудин А. И. (1985) О влиянии микродефектов в сварных швах на сопротивление усталости металлоконструкций горнодобывающей, транспортной техники. *Тез. докл. 2. республиканской конференции по повышению надежности и долговечности машин и сооружений*. Киев, Наукова думка, сс. 167–168.
  1. Asnis, A.E., Ivashchenko, G.A. (1978) *Increase in strength of welded structures*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
  2. Kudryavtsev, I.V., Naumchenkov, N.E. (1976) *Fatigue of welded structures*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
  3. Trufyakov, V.I. (1973) *Fatigue of welded joints*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
  4. Dreger, D.R. (1978) Good vibes reduce stresses in metal parts. *Machine Design*, **50(13)**, 100-103.
  5. Ting, W., Dongpo, W., Lixing, H. et al. (2008) Discussion on fatigue design of welded joints enhanced by ultrasonic peening treatment (UPT). *International J. of Fatigue*, **3**, 1-7.
  6. Shpeer, F.Z., Panov, V.I. (1983) Vibration treatment of large-sized welded structures to decrease the strains and crack formation susceptibility. *Svaroch. Proizvodstvo*, **5**, 13-15 [in Russian].
  7. Thompson, L. (1969) *A method of removing stresses in components by vibration and a setup for this purpose*. UK Pat. 1259556 [in Russian].
  8. Zimnitsky, Yu.A., Khvalynsky, V.N. (2004) Experimental verification of influence of low-frequency vibrotreatment on service reliability of hull structures. *Sudostroenie*, **1**, 50-52 [in Russian].
  9. Xiaohui, Z., Dongpo, W., Lixing, H. (2011) Analysis of the S-N curves of welded joints enhanced by ultrasonic peening treatment. *Materials & Design*, **32**, 88-96.
  10. Mikheev, P.P., Nedoseka, A.Ya., Parkhomenko, I.V. et al. (1984) Efficiency of application of ultrasonic peening treatment for improvement of fatigue resistance of welded joints. *Avtomatich. Svarka*, **3**, 4-7 [in Russian].
  11. Lobanov, L.M., Kirian, V.I., Knysh, V.V. et al. (2006) Improvement of fatigue resistance of welded joints in metal structures by high-frequency mechanical peening (Review). *The Paton Welding J.*, **9**, 2-8 [in Russian].
  12. Degtyarev, V.A. (2011) Evaluation of effect of high-frequency mechanical peening modes of welded joints on their fatigue resistance. *Problemy Prochnosti*, **2**, 61-70 [in Russian].
  13. Grishakov, S.V., Kovalev, A.M. (1988) *Application of Barkhausen effect for evaluation of stresses and damages in ferromagnetic materials*. Kiev, IPS [in Russian].
  14. Degtyarev, V.A. (1982) Units of DSO type for fatigue tests under shock reloading with different cycle asymmetry. *Problemy Prochnosti*, **10**, 110-113 [in Russian].
  15. Statnikov, E.Sh., Shevtsov, E.M., Kulikov, V.F. (1977) Ultrasonic peening instrument for strengthening of welds and reducing the residual stresses. In: *New physical methods of intensification of technological processes*. Moscow, Metallurgiya, 27-29 [in Russian].
  16. Prokopenko, G.I., Kleiman Ya.I., Kozlov, O.V. et al. *Device for ultrasonic peening treatment of metals*. Ukraine Pat. 47536, Publ. 15.07.2002 [in Ukrainian].
  17. Degtyarev, V.A. (1991) Influence of coefficient of cycle stress asymmetry on fatigue and cyclic creep of low-alloyed steels. *Rep. 2. Problemy Prochnosti*, **2**, 27-31 [in Russian].
  18. Visilovskiy, N.G., Pozhidaev, N.G., Demin, V.M. (1992) Problems of application of vibrotreatment instead of heat treatment. *Tyazholoe Mashinostroenie*, **8**, 20-22 [in Russian].
  19. Marguis, G. (2010) Failure modes and fatigue strength of improved HSS welds. *Engineering Fracture Mechanics*, **7**, 2051-2062.
  20. Serensen, S.V., Kogaev, V.P., Shnejderovich, R.M. (1975) *Load-carrying capacity and strength calculations of machine parts*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
  21. Kirian, V.I., Knysh, V.V. (2008) High-frequency mechanical peening of welded joints of metal structures. *Svaroch. Proizvodstvo*, **11**, 36-41 [in Russian].
  22. Shulginov, B.S., Degtyarev, V.A., Matveev, V.V. (1984) On ultimate cycle stresses of welded joints with high residual stresses. *Problemy Prochnosti*, **3**, 58-61 [in Russian].
  23. Shulginov, B.S., Matveev, V.V., Degtyarev, V.A. (1985) About influence of microdefects in welds on fatigue resistance of metal structures of mining and transport technics. In: *Proc. of 2nd Republ. Conf. on Improvement of Reliability and Service Life of Machines and Constructions*. Kiev, Naukova Dumka, 167-168.

References

В. О. Дегтярев

Институт проблем міцності ім. Г. С. Писаренка  
НАН України. 01014, м. Київ, вул. Тимірязєвська, 2

ЭФЕКТИВНІСТЬ РІЗНИХ МЕТОДІВ  
ЗМІЦНЮЮЧОЇ ОБРОБКИ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ

Показано ефективність вибору непошкоджуючих режимів віброобробки зварних елементів металлоконструкцій низьковуглецевої сталі з метою зменшення в них залишкових напружень без ризику втомного пошкодження на стадії технологічної обробки. Порівняльні втомні дослідження засвідчили зростання довговічності віброоброблених зварних з'єднань та підвищення їх межі витривалості по мірі зростання бази

досліджень. Запропоновано метод визначення меж витривалості стикових зварних з'єднань низьковуглецевої сталі після різних режимів високочастотної механічної проковки, що використовує експериментальні дані вимірювання глибини канавки. Показано ефективність зростання їх меж витривалості в залежності від швидкості високочастотної механічної проковки та амплітуди коливань робочого інструменту. Проаналізовано результати експериментальних досліджень зростання опору втомі зварних з'єднань низьколегованих та низьковуглецевих сталей при гармонічному та повторному ударному навантаженні при температурі  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  після високочастотної механічної проковки, аргонодугової, вибухової та механічної обробки та надано порівняльний аналіз їх ефективності. Бібліогр. 23, табл. 4, рис. 10.

*Ключові слова:* зварне з'єднання, опір втомі, межа витривалості, залишкові напруження, глибина канавки, швидкість проковки

V.A. Degtyarev

G.S. Pisarenko Institute for Problems of Strength  
of the NAS of Ukraine. 2 Timiryazevskaya Str., 01014,  
Kyiv-14, Ukraine. E-mail: ips@ipp.kiev.ua

EFFICIENCY OF DIFFERENT METHODS

The effectiveness of selection of non-damaging modes of vibration treatment of welded elements of metal structures of low-carbon steel with the purpose of reducing residual stresses in them without danger of fatigue fracture at the stage of technological treatment is shown. The comparative fatigue investigations showed an increase in the durability of vibrotreated welded joints and an increase in their endurance limit at the increase of test base. A method for determination of endurance limits for butt welded joints of low-carbon steel after different modes of high-frequency mechanical peening was proposed using experimental data of groove depth measurement. The effectiveness of increasing their endurance limit is shown depending on the speed of high-frequency mechanical peening and the amplitude of oscillations of the working tool. The results of experimental investigations of increasing fatigue resistance of welded joints of low-alloy and low-carbon steels under harmonic and repeated shock loading at the temperature of  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  after high-frequency mechanical peening, argon-arc, explosive, and mechanical treatments were analyzed and a comparative analysis of their efficiency was presented. 23 Ref., 4 Tabl., 10 Fig.

*Key words:* welded joint, fatigue resistance, endurance limit, residual stresses, depth of groove, speed of peening

Поступила в редакцію 13.06.2017

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОЗВАРЮВАННЯ ім. Є. О. ПАТОНА НАНУ  
МІЖНАРОДНА АСОЦІАЦІЯ «ЗВАРЮВАННЯ»



## Міжнародна конференція «ЗВАРЮВАННЯ ТА СПОРІДНЕНІ ТЕХНОЛОГІЇ – СЬОГОДЕННЯ І МАЙБУТНЄ»

Присвячується 100-річчю  
Національної академії наук України

5 – 6 грудня, 2018 р.  
Україна, м. Київ

Голова:

академік НАН України Л. Лобанов

НАУКОВІ НАПРЯМКИ КОНФЕРЕНЦІЇ

- Технології, матеріали і обладнання для зварювання і споріднених процесів
- Міцність зварних конструкцій, теоретичні та експериментальні дослідження напружено-деформуючих станів та їх регулювання
- Вдосконалення зварних конструкцій, автоматизація їх розрахунку і проектування, оцінка і подовження ресурсу
- Нові конструкційні матеріали
- Неруйнівний контроль і технічна діагностика
- Інженерія поверхні
- Зварювання в медицині – технології, обладнання; наноматеріали і нанотехнології
- Проблеми екології зварювального виробництва
- Спеціальна електрометалургія
- Стандартизація, сертифікація продукції зварювального виробництва, підготовка і атестація спеціалістів

Відправлення тез доповідей для участі в роботі конференції – до 01.11.2017 р.

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України,  
вул. Казимира Малевича (Боженка), 11, м. Київ, 03680  
тел.: (38044) 200-60-16; 200-47-57; факс: (38044) 528-04-86  
E-mail: office@paton.kiev.ua  
www.paton.kiev.ua | www.patonpublishinghouse.com