

## **Влияние видов упрочняющей обработки сварных соединений на повышение их сопротивления усталости**

**В. А. Дегтярев**

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

*На основе результатов экспериментальных исследований показано влияние виброобработки, высокочастотной механической проковки, механической зачистки усиления шва, аргонодуговой обработки и обработки взрывом на сопротивление усталости сварных соединений малоуглеродистых и низколегированных сталей в различных условиях температурно-силового нагружения. Усовершенствованы методы виброобработки и высокочастотной механической проковки сварных элементов металлоконструкций.*

**Ключевые слова:** сопротивление усталости, предел выносливости, кривая усталости, сварное соединение, остаточное напряжение, метод обработки.

**Введение.** Повышение несущей способности сварных элементов металлоконструкций по истечении назначенного срока эксплуатации имеет большое практическое значение, поскольку вероятность их разрушения весьма велика, а производственная необходимость требует дальнейшей эксплуатации. В настоящее время накоплен большой опыт использования различных технологических методов повышения сопротивления усталости сварных соединений [1]. Полученные результаты таких исследований приведены в работах [2, 3]. Применение того или иного метода обусловлено особенностями производства, наличием технологического оборудования, условиями эксплуатации и т.д. Однако ввиду недостаточной их изученности широкого внедрения многие из них не получили, несмотря на перспективность. Это в полной мере относится к виброобработке (ВО) и высокочастотной механической проковке (ВМП) сварных элементов металлоконструкций.

Анализ работ, посвященных виброобработке сварных элементов металлоконструкций, показал, что она используется, главным образом, с целью снижения остаточных напряжений (ОН) растяжения, которые могут привести к уменьшению срока службы изделия [1] или изменению его формы [4]. Преимущество ВО состоит в том, что, подвергая циклическому нагружению всю конструкцию, можно снижать ОН в элементах металлоконструкций, обладающих разной жесткостью, за один цикл технологической стадии обработки. Поэтому метод считается достаточно производительным (продолжительность обработки занимает не более 40 мин) и малоэнергозатратным, что позволяет рассматривать его в качестве альтернативы термообработке. Недостаток ВО заключается в том, что величина переменных напряжений в конструкциях, создаваемых механическими вибраторами, подбирается, как правило, опытным путем [5]. Это может привести к тому, что амплитуда напряжений окажется либо недостаточной для требуемого снижения ОН, либо настолько большой, что приведет к возникновению усталостных повреждений уже на технологической стадии виброобработки.

Эффективность высокочастотной механической проковки разных типов сварных соединений при небольшой трудоемкости достигается путем снижения концентрации напряжений в месте перехода шва на основной металл, деформационного упрочнения поверхностного слоя металла и создания остаточных напряжений сжатия в зоне концентратора. В настоящее время одним из самых распространенных критериев ее эффективности считается скорость перемещения обрабатывающего инструмента вдоль шва, оптимальное значение которой, по данным работ [6, 7], составляет 0,3...0,5 м/мин. Учитывая, что контроль скорости в производственных условиях затруднен, а процесс упрочнения осуществляется вручную, высока вероятность того, что большая ее величина не обеспечит требуемого качества обработки, а слишком малая – неоправдана с экономической точки зрения. Поэтому в настоящее время актуальной задачей является разработка простого количественного критерия контроля эффективности и качества ВМП.

Цель данной работы состоит в усовершенствовании существующих методов виброобработки и высокочастотной механической проковки, а также в экспериментальной оценке их влияния на сопротивление усталости элементов металлоконструкций наряду с другими известными способами, такими как аргонодуговая обработка, механическая зачистка усиления шва (механическая обработка), обработка взрывом.

**Объекты и методики их испытаний.** Исследования влияния видов упрочняющих обработок проводили как в лабораторных условиях на сварных образцах из низколегированных и малоуглеродистых сталей, изготовленных индивидуально или вырезанных из сварных заготовок размером в плане 400 × 660 мм со стыковым и тавровым соединением, которое выполнено вдоль длинной стороны, так и в производственных на натуральных конструкциях. Упрочнению подвергали сварные балки коробчатого сечения (далее – балки) из листовой стали 20 ( $\sigma_B = 740$  МПа,  $\sigma_T = 590$  МПа) толщиной 20 мм (рис. 1,а), моделирующие конструкцию поддизельной рамы тепловоза, и концевые пятники сложной конфигурации размером 600 × 600 × 60 мм, изготовленные электрошлаковым литьем из стали 20ГФЛ ( $\sigma_B = 740$  МПа,  $\sigma_T = 590$  МПа) и приваренные к элементам соединительной балки восьмиосной железнодорожной цистерны из стали 09Г2С (рис. 1,б). Выбор упрочнения зоны приварки концевого пятника обусловлен его частым усталостным разрушением в процессе эксплуатации.

Испытания образцов на усталость проводили в условиях изгиба при заданном коэффициенте асимметрии цикла напряжений  $R$  при гармоническом нагружении на установке ДСО-2 и повторном ударном нагружении на установке ДСО-1 в режиме заданной энергии удара при температуре  $-60^\circ\text{C}$  [8]. В обоих случаях частота нагружения составляла 10 Гц. Амплитуду напряжений измеряли тензометрическим методом. При низкотемпературных испытаниях образцы охлаждали путем регулируемой подачи 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 2,5 мм [3], или их хрупкое разрушение при меньшей длине трещины.

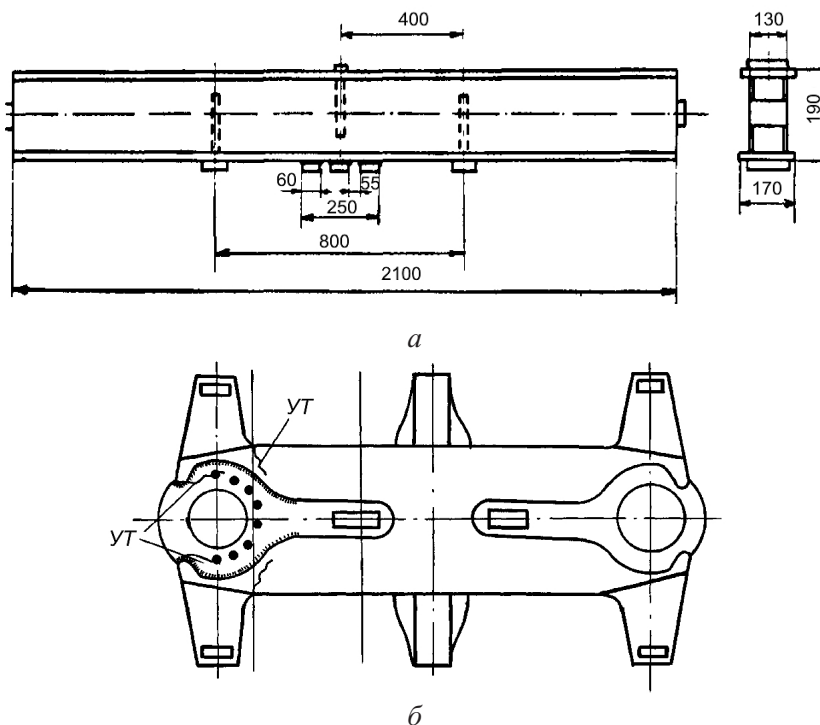


Рис. 1. Конструкции сварной балки коробчатого сечения (а) и соединительной балки восьми-осной железнодорожной цистерны (б) (УТ – зоны распространения усталостной трещины, ● – точки препарирования тензорезисторов на разных участках концевой пятника.)

Виброобработку элементов металлоконструкций осуществляли как электромеханическим вибратором 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. Амплитуду напряжений измеряли тензометрическим методом. При испытаниях использовались трехточечная и консольная схемы нагружений.

Линию сплавления сварного шва с основным металлом подвергали ВМП посредством ультразвукового магнитострикционного преобразователя [9] с частотой колебаний 24,5 кГц, возбуждаемого генератором УЗГ-10М с потребляемой мощностью 1,2 кВт. В дальнейшем использовали ультразвуковой пьезокерамический инструмент USP-300 [10] с частотой колебаний 22,0 кГц. Деформирующий механизм обоих инструментов представлял собой специальную головку со встроенными в нее в ряд четыремя стальными стержнями диаметром 3 мм. После ВМП образуется канавка шириной 3,0–3,5 мм и глубиной  $h$ , зависящей от скорости  $V$  перемещения рабочего инструмента вдоль шва, которую определяли как отношение длины обрабатываемого шва ко времени обработки. При каждой скорости обрабатывалось не менее двух образцов, а значение глубины канавки определялось как среднеарифметическое.

Для измерения глубины канавки сварного шва было разработано приспособление, которое состояло из основания в виде полированной пластины и узла крепления индикатора часового типа с ценой деления 0,001 мм и

закреплялось на поверхности сварного образца. Глубину канавки определяли как разницу в показаниях индикатора, полученных на поверхности образца и в самой глубокой точке дна канавки. Для расчетов использовали среднее значение измерений, полученных в нескольких точках по длине сварного шва.

Для определения пределов выносливости сварных конструкций по результатам испытаний образцов последние должны иметь высокие остаточные напряжения, которые создавались путем наплавки на их тыльную сторону продольного валика или погружением наполовину толщины в воду. Высокие остаточные напряжения в балках коробчатого сечения создавались нанесением по их краям продольных наплавов, а концентраторы напряжений – приваркой в поле ОН растяжения специальных накладок. Величину и их знак в околошовной зоне в направлении, которое совпадает с направлением приложения нагрузки, определяли магнитошумовым методом, основанным на использовании эффекта Баркгаузена [11]. Учитывая, что в околошовной зоне в результате сварки материал претерпевает структурные изменения, для повышения точности оценки величины и распределения ОН предварительно определяли серию градуировочных кривых. Каждую кривую строили на том расстоянии от наплавки, на котором происходило определение ОН. В дальнейшем при анализе их кинетики использовали значение максимального ОН растяжения.

**Выбор неповреждающих режимов виброобработки.** Чтобы избежать возможного появления трещин усталости на технологической стадии, предложена методика назначения неповреждающих режимов ВО элементов металлоконструкций, приводящих к эффективному снижению ОН на величину не меньше заданной.

Методика основана на использовании комплексной диаграммы предельных напряжений цикла. На рис. 2 эта диаграмма построена в координатах максимальные напряжения  $\sigma_{\max}$  – средние напряжения  $\sigma_m$ , где линия 1 соответствует пределам выносливости  $\sigma_R$  сварного соединения или конструкции и ограничена пределом выносливости при симметричном нагружении  $\sigma_{-1}$  и пределом прочности  $\sigma_B$ , линия 2 – пределам циклической ползучести материала конструкции  $\sigma_{ц,пR}$  [12]. Она ограничена пределом ползучести при статическом нагружении  $\sigma_{п}$ , определяемым согласно ГОСТ 3248-81 [13] (допускается предел текучести  $\sigma_T$ ), и пределом выносливости, названным минимальным пределом циклической ползучести  $\sigma_{ц,п}$ , при котором достигается заданное значение пластической деформации  $\epsilon_{пл}$ . Перед началом виброобработки определяется эпюра остаточных напряжений, и максимальное значение ОН растяжения  $\sigma_{ост}^H$  откладывается на диаграмме (т. А). Задается значение напряжения  $\sigma_{ост1}^H$  (т. А<sub>1</sub>), до которого необходимо уменьшить  $\sigma_{ост}^H$ . Одним из условий такого выбора может служить, например, требование геометрической стабильности формы изделия. Для правильного выбора нагрузки, которая позволила снизить ОН на величину не меньше  $\Delta\sigma_{ост1}$ , необходимо, чтобы линия 2 соответствовала пластической деформации  $\epsilon_{пл}$ , определенной из условия  $\Delta\sigma_{ост1} = E\epsilon_{пл}$ . Напряжение от внешней нагрузки  $\sigma_{в.н}$ , которое необходимо приложить к конструкции, определяется из условия

$$\sigma_{ц,пR} < \sigma_{в.н} + \sigma_{ост}^H < \sigma_R, \quad (1)$$

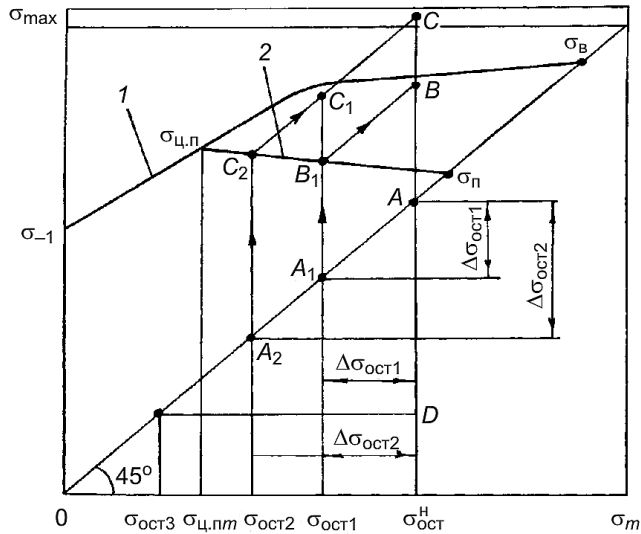


Рис. 2. Назначение неповреждающих режимов виброобработки металлоконструкций для снижения в них остаточных напряжений растяжения на величину не меньше заданной.

где  $\sigma_R$ ,  $\sigma_{ц.пR}$  – напряжения, соответствующие точкам пересечения действия циклических напряжений с линиями предельных напряжений 1 и 2 соответственно. Условие  $\sigma_{в.н} + \sigma_{ост}^H < \sigma_R$  обеспечивает отсутствие усталостных повреждений после виброобработки, а  $\sigma_{ц.пR} < \sigma_{в.н} + \sigma_{ост}^H$  – эффективное снижение ОН. Если  $\sigma_{ост}^H$  больше среднего напряжения  $\sigma_{ц.пm}$  минимального предела циклической ползучести, для снижения ОН на  $\Delta\sigma_{ост1}$  достаточно приложить симметричную циклическую нагрузку. Такой вид нагружения осуществляется при установке вибратора на конструкцию. Амплитуда напряжений  $\sigma_a$  соответствует отрезку  $A_1B_1$ . Значения  $\sigma_R$  и  $\sigma_{ц.пR}$  определяются по точкам пересечения линий предельных напряжений 1 и 2 с отрезком  $A_1B_1$ .

В случае если требуемая величина снижения ОН достаточно велика (т.  $A_2$ ) и не может быть достигнута за одну ступень приложения вибрационной нагрузки, так как амплитуда напряжения (на рис. 2 отрезок  $AC$ ) выше, чем предельные напряжения (1), снижения ОН до  $\sigma_{ост2}$  можно достичь многоступенчатым нагружением. Вначале ОН уменьшаются до  $\sigma_{ост1}$  в соответствии с вышеописанной методикой, затем амплитуда напряжений  $\sigma_a$  увеличивается до величины  $A_1C_1$ , соблюдая условие (1). Для снижения исходных остаточных напряжений  $\sigma_{ост3}$ , которые меньше среднего напряжения минимального предела циклической ползучести  $\sigma_{ц.пm}$ , следует приложить асимметричную циклическую нагрузку:  $\sigma_m = AD$ ,  $\sigma_a = AB$ . Если не задаваться условием снижения ОН на величину не меньше заданной, методика существенно упрощается: режимы нагружения можно выбирать произвольно, соблюдая условие (1) [14].

**Оптимизация метода высокочастотной механической проковки.** Поскольку после ВМП сварного соединения образуется канавка, было предложено [15] ее глубину, как легко контролируемый параметр, использовать в качестве критерия эффективности обработки сварных соединений, в том

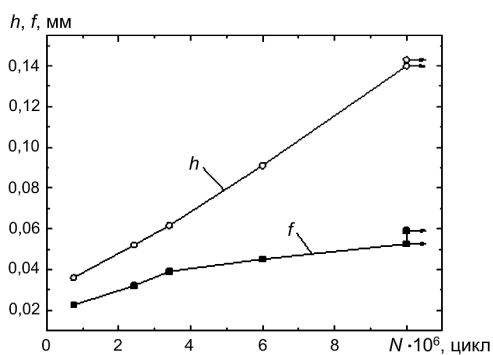


Рис. 3

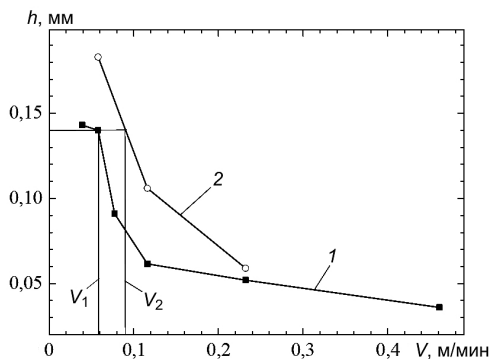


Рис. 4

Рис. 3. Зависимость между глубиной канавки  $h$ , прогибом  $f$  образца из стали СтЗсп со стыковым сварным швом и числом циклов до разрушения  $N$ .

Рис. 4. Зависимость глубины канавки в образце из стали СтЗсп со стыковым сварным швом от скорости высокочастотной механической проковки при амплитуде колебаний торца волновода 19 (1) и 26 мкм (2). ( $V_1$ ,  $V_2$  – скорость перемещения инструмента, при которой достигается глубина канавки 0,14 мм в условиях разной амплитуды колебаний торца волновода.)

числе при выполнении ремонтных работ. Методика его выбора отработывалась при испытаниях на усталость сварных стыковых соединений из малоуглеродистой стали СтЗсп, изготовленных ручной электродуговой сваркой. Исследовали влияние глубины канавки на долговечность образцов, испытанных в условиях отнулевого цикла гармонического нагружения при максимальном напряжении 375 МПа, после их обработки при амплитуде колебаний торца волновода 19 мкм. Зависимость между изменением глубины канавки  $h$  сварного шва, прогибом  $f$  сварного образца, который измеряли после обработки, и числом циклов до разрушения  $N$  представлена на рис. 3. Анализ результатов исследований показывает, что с увеличением глубины канавки, т.е. с уменьшением скорости проковки, которая также влияет на прогиб образца, долговечность повышается. Видно, что при  $h = 0,14$  мм и больше трещин усталости в сварных образцах, испытанных на базе  $10^7$  цикл нагружений, не возникает. Полученные данные дают основание полагать, что для выбранных сварных образцов оптимальным режимом обработки по критерию циклической долговечности будет такой, который обеспечит минимальную глубину канавки (0,14 мм). Полученные зависимости глубины канавки от скорости перемещения рабочего инструмента вдоль сварного шва (рис. 4) свидетельствуют о том, что такой глубине канавки соответствует скорость перемещения инструмента  $V = 0,06$  м/мин при амплитуде колебаний торца волновода 19 мкм и 0,09 м/мин – при 26 мкм. Кроме того, как по мере уменьшения скорости проковки, так и при увеличении амплитуды колебаний торца волновода при одинаковой скорости проковки глубина канавки увеличивается. Это означает, чем меньше амплитуда колебаний торца волновода обрабатывающего инструмента, тем меньшей должна быть скорость проковки.

**Результаты испытаний и их обсуждение.** Анализ эффективности виброобработки. Предложенную методику снижения остаточных напряжений при использовании безопасных режимов нагружения проверяли как в лаборатор-

ных условиях при испытаниях сварных образцов из стали 20 с приваренным ребром вдоль их длинной стороны, так и в производственных на натуральных конструкциях (рис. 1). Благодаря приварке ребра полуавтоматической сваркой в среде углекислого газа при погружении образца наполовину толщины в воду можно создать высокие остаточные напряжения растяжения ( $0,85\sigma_T$ ). Это позволило использовать их для определения комплексной диаграммы предельных напряжений цикла при оценке снижения ОН в крупногабаритных конструкциях. На рис. 5 показано снижение ОН в балках, полученное с использованием разного испытательного оборудования. Прежде всего, в результате проведенных испытаний сварных образцов на усталость в условиях гармонического нагружения при  $R=0$  и  $0,75$  (линия 1) и цилиндрических образцов на циклическую ползучесть при  $R=0,75$  и  $0,85$  (линия 2) была определена область (заштрихована) безопасного нагружения (показана часть диаграммы). Значения  $\sigma_{ц,пR}$  определяли при  $\varepsilon_{цп} = 0,2\%$ .

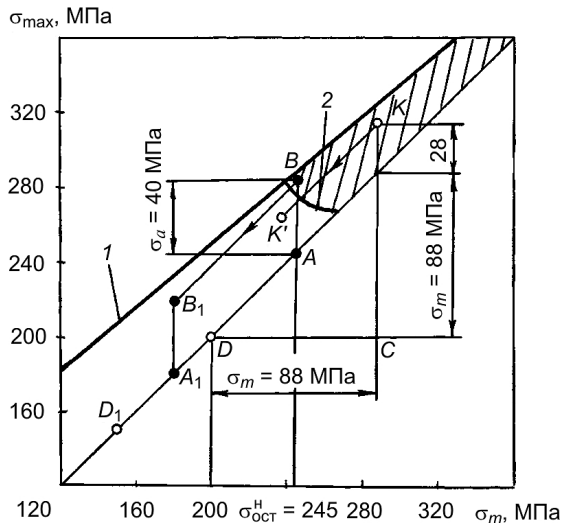


Рис. 5. Снижение остаточных напряжений в сварных балках коробчатого сечения из стали 20.

Согласно вышеизложенной методике по ширине балок определяли эпюры исходных остаточных напряжений. В качестве примера на рис. 6 приведена одна из них. Видно, что левая (I) и правая (II) части эпюры несимметричны. Это обусловлено порядком наложения наплавов. Более высокие ОН свидетельствуют о том, что на левом участке балки наплавку выполняли в последнюю очередь. Максимальные значения ОН приведены в табл. 1. В тех балках, где  $\sigma_{ост}^H = 245$  МПа (на рис. 5 т. А), его снижение осуществлялось в условиях симметричного цикла напряжений. Такой вид нагружения обеспечивает вибратор. Продолжительность виброобработки на околорезонансной частоте 95 Гц составляет примерно 20 мин, что соответствует  $10^5$  цикл нагружений. О снижении остаточных напряжений судили по изменению тока, потребляемого вибратором. Максимально возможное значение амплитуд напряжений, рассчитанных исходя из условия (1), достигает 40 МПа (табл. 1).

Видно, что в процессе испытаний ОН уменьшились до  $(0,6...0,62)\sigma_T$  (на рис. 5 т.  $A_1$ ). Также отметим, что при значении исходного ОН 120 МПа, что соответствует  $0,41\sigma_T$ , виброобработка не приводит к его изменению (на рис. 6 кривая 2). Если учитывать принятое в литературных источниках мнение [3], что остаточные напряжения, равные  $0,5\sigma_T$ , не влияют на предел выносливости, то очевидна необходимость их дальнейшего снижения. Однако для этого следует увеличить амплитуду напряжений (на рис. 5 отрезок  $AB$ ) настолько, что наряду с их снижением может произойти усталостное повреждение конструкции. Поэтому для эффективного снижения ОН (особенно, если они незначительны уже в исходном состоянии) необходимо приложение асимметричной вибрационной нагрузки. С этой целью часть балок испытывали на пульсаторе ЦДМ-200пу при отнулевом цикле гармонического нагружения. При значении  $\sigma_{ост}^H = 200$  МПа (на рис. 5 т.  $D$ ) были рассчитаны параметры внешней нагрузки (их значения представлены на рис. 5 и в табл. 1). В отличие от симметричного цикла, в этом случае можно достичь больших значений максимального напряжения (на рис. 5 т.  $K$ ), соблюдая условие безопасного нагружения конструкции. Определенные в нескольких балках ОН снизились примерно до установившихся напряжений  $\sigma_{ост}^k = 145...155$  МПа (табл. 1), что соответствует  $(0,5...0,52)\sigma_T$ .

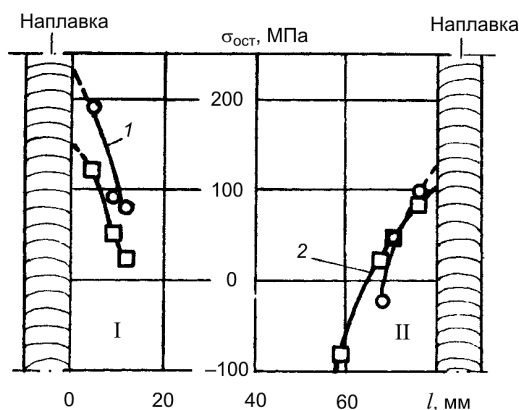


Рис. 6. Распределение остаточных напряжений по ширине балки с продольными наплавками в исходном состоянии (1) и после виброобработки (2). (I, II – участки балки, где происходило определение эпюр ОН;  $l$  – расстояние между наплавками.)

Виброобработку зоны приварки концевых пятников проводили с установкой вибратора на исследуемую соединительную балку. Использование консольной схемы нагружения позволило, во-первых, значительно увеличить амплитуду напряжений в расчетном сечении, во-вторых, понизить собственную частоту колебаний конструкции до величины, соизмеримой с возможностью вибратора. Анализ результатов испытаний показывает, что при максимально достигнутой амплитуде напряжений  $\sigma_a = 35$  МПа, рассчитанной по условию (1), существующая технология позволяет снизить исходные ОН, составляющие  $0,65\sigma_T$ , после  $10^5$  цикл нагружений в производственных условиях на 20% (табл. 1).



Т а б л и ц а 1

**Результаты снижения максимальных ОН растяжения  
в зависимости от вида используемого оборудования**

Объект исследования	Способ снижения ОН	Напряжения, характеризующие неповреждающие режимы для снижения ОН в сварных конструкциях, МПа						
		$\sigma_{ост}^H$	$\sigma_R$	$\sigma_{ц. пR}$	$\sigma_{в. н}$	$\sigma_{max}$	$\sigma_{ост}^k$	$\frac{\sigma_{ост}^k}{\sigma_{ост}^H}, \%$
Балка	Вибратор	245	290	275	$\frac{40}{0}$	285	180	74
	Пульсатор	230	330	265	$\frac{20}{70}$	320	155	67
		230	330	265	$\frac{22}{70}$	322	150	65
		200	320	265	$\frac{28}{88}$	316	145	72
		175	315	265	$\frac{24}{109}$	308	120	69
Концевой пятник	Вибратор	480	530	515	$\frac{35}{0}$	515	385	80
Образец	ДСО-2	220	430	405	$\frac{30}{165}$	415	150	68
Балка	Термо-обработка	240	–	–	–	–	100	42
Концевой пятник	Термо-обработка	480	–	–	–	–	210	44

**Примечание.** Над чертой приведена амплитуда напряжений, под чертой – их статическое значение.

Из данных табл. 1 видно, что значения максимальных остаточных напряжений, определенные в балках и концевых пятниках, которые подвергались термо-обработке, уменьшились на 56...58% и составили в среднем  $0,35\sigma_T$ .

Учитывая, что исследования по оценке влияния уровня остаточных напряжений на сопротивление усталости металлоконструкций не могут дать однозначного ответа [3], так как это в значительной мере зависит от степени концентрации напряжений, на установке ДСО-2 были проведены сравнительные усталостные испытания образцов из стали 20 с приваренным ребром. Предварительно исходные ОН снижались при неповреждающих режимах нагружения до уровня  $0,52\sigma_T$ . Параметры внешней нагрузки с указанием значений  $\sigma_{ост}^H$  и  $\sigma_{ост}^k$  после  $10^5$  цикл нагружений приведены в табл. 1.

Анализ полученных результатов при отнулевом цикле гармонического нагружения в условиях комнатной температуры (рис. 7) свидетельствует об увеличении долговечности виброобработанных образцов во всем диапазоне приложения напряжений. Для сравнения на рис. 7 приведена кривая усталости образцов с высокими остаточными напряжениями в исходном состоянии.

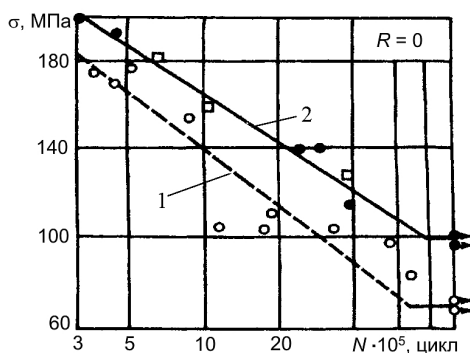


Рис. 7. Кривые усталости сварных образцов из стали 20 с приваренным ребром в исходном состоянии (1) и после виброобработки (2): □ – результаты испытаний термообработанных образцов.

Видно, что с понижением нагрузки действие остаточных напряжений проявляется в большей мере, вследствие чего кривые усталости расходятся. Например, при снижении напряжений от 180 МПа до напряжения на уровне предела выносливости 100 МПа долговечность виброобработанных образцов увеличивается в 1,5...2,7 раза. При этом предел выносливости повышается на 40%. Чтобы оценить долговечность при еще меньших значениях ОН, были проведены испытания образцов, которые подвергались отпуску при температуре 600...620°С. Максимальные ОН в них составили  $0,35\sigma_T$ . Из рис. 7 видно, что точки ложатся на кривую усталости виброобработанных образцов. Аналогичные результаты были получены при сравнительных усталостных испытаниях соединительных балок 120-тонной железнодорожной цистерны [16]. Основываясь на результатах испытаний образцов, можно предположить подобное повышение сопротивления усталости и долговечности металлоконструкций после ВО в реальных условиях эксплуатации.

Таким образом, по результатам снижения остаточных напряжений в элементах конструкций можно сделать некоторые выводы. Исходные значения максимальных ОН достигают  $(0,7...0,84)\sigma_T$ . При нагружении вибратором их можно снизить на 20...26%, пульсатором – в среднем на 35%, что составляет  $(0,62...0,65)\sigma_T$  и  $0,52\sigma_T$  соответственно. Значения ОН после термообработки не превышают  $0,35\sigma_T$ . Проведенные усталостные испытания показывают, что для увеличения долговечности неотвественных конструкций из малоуглеродистой стали нет необходимости в применении дорогостоящей процедуры термообработки.

Однако зачастую опыт эксплуатации многих металлоконструкций свидетельствует о необходимости использования одновременно нескольких методов упрочнения. Это в полной мере можно отнести и к соединительным балкам, так как в отдельных случаях имеет место развитие усталостных трещин в зоне приварки концевого пятника после виброобработки или термообработки (рис. 1,б). Для обоснованного выбора наиболее рационального вида дополнительного упрочнения предварительно был проведен анализ нагруженности разных элементов соединительной балки на участках железной дороги большой протяженности (более 3000 км), отличающихся профилем и техническим состоянием пути.

Установлено, что максимальные эксплуатационные напряжения действуют именно в зоне приварки концевой пятника. По-видимому, причиной их повышенных значений служат перевалка заполненного котла цистерны в процессе ее движения и дополнительные динамические напряжения, возникшие из-за технического состояния пути. Чтобы оценить, какие из действующих напряжений могут вызвать усталостные повреждения, необходимо сопоставить их с предельными напряжениями для данного вида сварного соединения в зависимости от среднего напряжения и числа циклов нагружения [17].

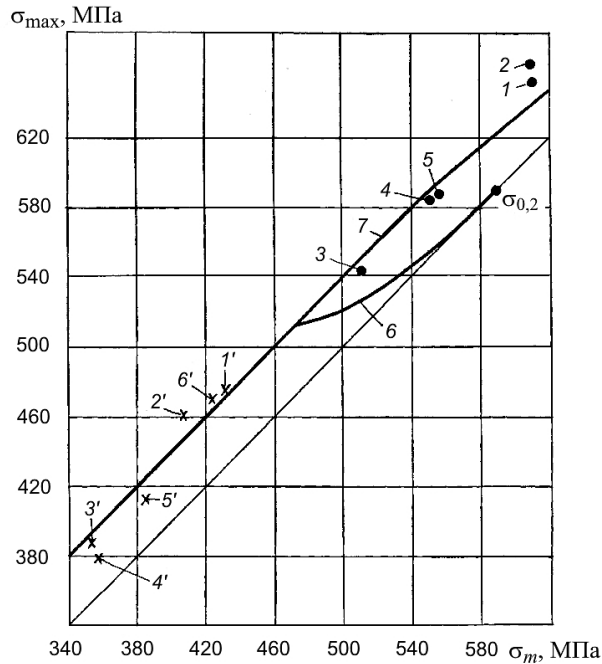


Рис. 8. Участок диаграммы предельных напряжений сварного соединения концевой пятника с балкой: 1–5 – максимальные напряжения, действующие в разных зонах концевой пятника в исходном состоянии; 1'–6' – то же после термообработки; 6, 7 – линии пределов выносливости и циклической ползучести соответственно.

Для решения этой задачи была определена комплексная диаграмма предельных напряжений цикла сварного соединения концевой пятника с балкой (на рис. 8 показан участок диаграммы). Поскольку проведенные измерения на разных участках концевой пятника показали наличие высоких ОН растяжения (табл. 1), составляющих  $(0,75...0,82)\sigma_T$ , при ее построении достаточно ограничиться определением предела выносливости при одном значении коэффициента асимметрии цикла [3], наиболее предпочтительно при  $R = -1$ . По данным [18] он составляет 40 МПа. Далее амплитуды предельных напряжений не зависят от среднего напряжения цикла. После нанесения на диаграмму значений максимальных напряжений (с учетом ОН) отметим, что эксплуатация соединительных балок как в исходном состоянии, так и после термообработки происходит в области высокой асимметрии цикла ( $R > 0,75$ ). Кроме того, анализ полученных данных показал, что в тех зонах концевой пятника, где происходит преимущественное возникновение усталостных тре-

щин, имеют место высокие амплитуды внешней нагрузки, превышающие пределы выносливости, определенные по диаграмме (на рис. 8 т. 1, 2 расположены выше линии пределов выносливости 7). Заметим, что даже термообработка, используемая в настоящее время в качестве завершающей стадии при изготовлении соединительных балок, не уменьшает риск их разрушения в связи с действием опасных амплитуд эксплуатационных напряжений (на рис. 8 т. 1', 2', 6'). Таким образом очевидно, что в наиболее опасных, с точки зрения усталостного разрушения, зонах приварки концевых пятников при изготовлении соединительных балок кроме существующей технологии термообработки необходима дополнительная упрочняющая обработка, направленная на повышение предела выносливости указанных зон конструкции. Поскольку усталостные трещины возникают в месте перехода шва на основной металл, в данном случае наиболее технологичной, с точки зрения упрочнения этой узкой зоны, является высокочастотная механическая проковка, обладающая высокой эффективностью упрочнения разных типов сварных соединений.

В связи с этим по разработанной методике с учетом предлагаемого критерия высокочастотной механической проковки провели упрочнение сварных швов концевых пятников в нескольких соединительных балках. Качество сварного шва показало, что получить требуемые геометрические параметры канавки можно при трех проходах обрабатывающего инструмента. Эффективность предлагаемого критерия обоснована нижеприведенными результатами исследований.

*Анализ эффективности высокочастотной механической проковки.* Предлагаемый критерий проверялся путем проведения сравнительных усталостных испытаний стыковых соединений из малоуглеродистой стали СтЗсп и тавровых соединений из низколегированной стали 09Г2С в условиях гармонического нагружения при комнатной температуре и ударного нагружения при  $-60^{\circ}\text{C}$ .

Испытаниям подвергались образцы в исходном состоянии после сварки, изготовленные как с отступлением от технологии обработки, так и в строгом соответствии с рекомендуемой глубиной канавки после ВМП.

Результаты испытаний образцов из стали СтЗсп в исходном состоянии, обработанные методом наименьших квадратов, представлены на рис. 9. Их предел выносливости составил 200 МПа.

Анализ экспериментальных данных, полученных при испытаниях образцов, изготовленных с отклонением от предлагаемой технологии ВМП, показал, что предел выносливости повысился на 36%. Из рис. 9 видно, что для этих образцов разброс результатов по долговечности больший, чем для образцов в исходном состоянии. Зарождение трещин усталости, развивавшихся по дну прокованной зоны, происходило на расстоянии 5–6 мм от торца образца с последующим распространением к нему. Однако в некоторых образцах (на рис. 9 кривая 2) кроме отклонений от рекомендаций относительно глубины канавки в результате некачественной проковки ее конфигурация не была плавной, а имели место наплывы металла на сварной шов (гребешки), являющиеся мощными источниками концентрации напряжений. В этом случае трещина усталости развивалась из этих гребешков. Аналогичные результаты

получены также в работе [19]. Долговечность образцов с такими дефектами всего в 3-4 раза выше долговечности образцов, испытанных в исходном состоянии, а повышение предела выносливости составило всего 11%. Анализ полученных данных свидетельствует о том, что качество проковки имеет большое значение, так как при образовании дополнительных концентраторов в случае отклонения от технологии ВМП обработка сварного соединения не эффективна.

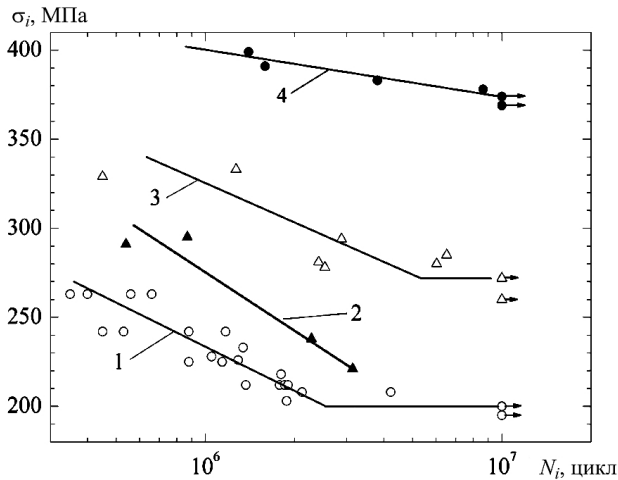


Рис. 9. Кривые усталости стыковых соединений из стали СтЗсп в условиях отнулевого цикла гармонического нагружения: 1 – исходное состояние; 2, 3 – отклонение от технологии ВМП; 4 – в соответствии с рекомендуемой технологией.

Результаты испытаний образцов, которые после изготовления подвергались обработке в соответствии с рекомендуемой скоростью ВМП 0,06 м/мин, что обеспечивает необходимую глубину канавки (0,14 мм), показали, что предел выносливости в этом случае составляет 375 МПа (на рис. 9 кривая 4). Это на 87% выше такового, полученного при испытаниях образцов в исходном состоянии.

Результаты испытаний тавровых соединений из стали 09Г2С представлены на рис. 10. Полученные данные свидетельствуют о том, что в исходном состоянии сопротивление усталости в условиях повторного ударного нагружения при  $-60^{\circ}\text{C}$  меньше, чем при гармоническом нагружении и комнатной температуре. При этом пределы выносливости, определенные на базе  $2 \cdot 10^6$  цикл нагружений, составили 307 и 360 МПа соответственно. Анализ результатов испытаний образцов, подвергнутых ВМП со скоростью перемещения инструмента, которая больше, чем рекомендуемая в работе, показал, что благодаря обработке несколько повысилось сопротивление усталости соединений в условиях повторного ударного нагружения, однако оно не выше сопротивления усталости, полученного для образцов в исходном состоянии при гармоническом нагружении. Точки ложатся на кривую усталости 2. Высокочастотная механическая проковка, выполненная в строгом соответствии с рекомендуемой скоростью, позволила существенно повысить сопротивление усталости в условиях ударного нагружения во всем исследованном диапазоне

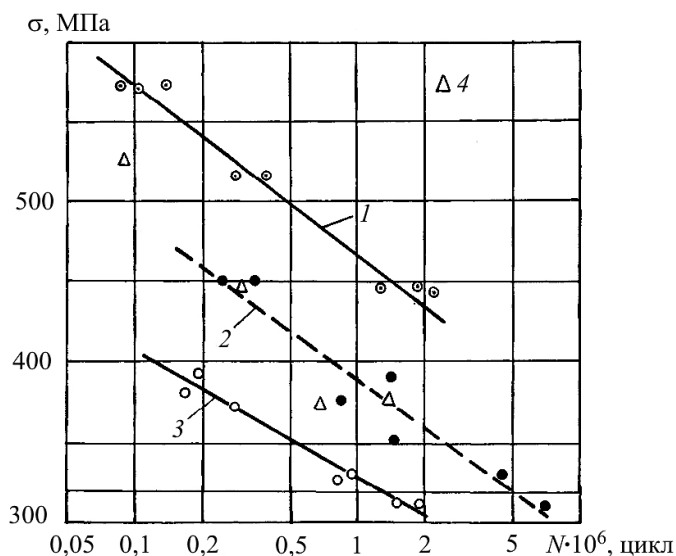


Рис. 10. Кривые усталости тавровых соединений из стали 09Г2С в исходном состоянии (2, 3), после ВМП (1, 4) в условиях гармонического нагружения при комнатной температуре (2) и повторного ударного нагружения при  $-60^{\circ}\text{C}$  (1, 3, 4).

долговечности. Предел выносливости повысился на 21% по сравнению с данными испытаний образцов в исходном состоянии в условиях гармонического нагружения.

Таким образом, анализ экспериментальных данных усталостных испытаний разных типов сварных соединений в различных условиях циклического нагружения позволяет утверждать, что использование глубины канавки в качестве критерия эффективности ВМП проковки сварных металлоконструкций на стадии их эксплуатации или изготовления более объективно, чем скорости, так как ее всегда можно проконтролировать.

*Сравнительный анализ результатов, полученных при применении других методов обработки.* Для сравнения наряду с предлагаемыми упрочняющими методами были рассмотрены некоторые широко используемые на практике технологические способы повышения сопротивления усталости сварных соединений, такие как механическая и аргонодуговая обработки, обработка взрывом. Упрочнению подвергались зоны сварного шва в образцах из низколегированных сталей.

Механическая обработка стыкового соединения из стали 14Х2ГМР, выполненного ручной электродуговой сваркой, заключалась в удалении усиления шва. При аргонодуговой обработке стыкового соединения из стали 12ГН2МФАЮ, выполненного полуавтоматической сваркой в среде углекислого газа, оплавились зоны перехода шва к основному металлу неплавящимся вольфрамовым электродом в среде аргона.

Тавровое соединение из стали 15ХСНД, выполненное автоматической сваркой под флюсом, подвергалось обработке взрывом. Для этого использовались цилиндрические заряды, уложенные вдоль сварного шва на пластилиновые подкладки.

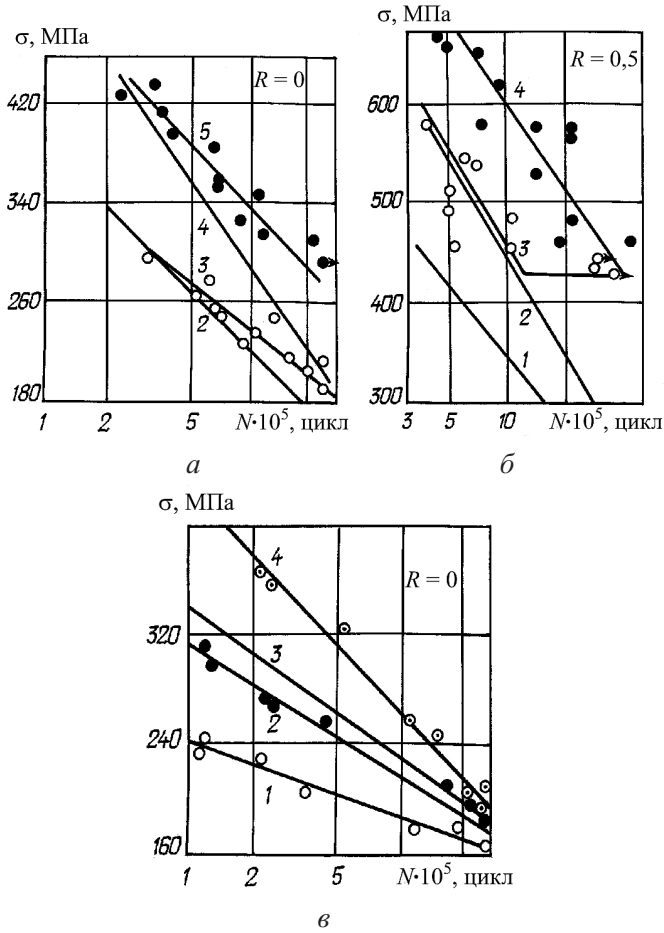


Рис. 11. Кривые усталости стыковых соединений из сталей 14X2ГМР после механической (а) и 12ГН2МФАЮ после аргодуговой (б) обработок, а также таврового соединения 15ХСНД после обработки взрывом (в): 1, 3 – ударное нагружение при  $-60^\circ\text{C}$ , исходное состояние и после обработки соответственно; 2, 4 – гармоническое нагружение при комнатной температуре, исходное состояние и после обработки соответственно; 5 – гармоническое нагружение при  $-60^\circ\text{C}$  после обработки.

Эффективность методов упрочнения вышеуказанных типов сварных соединений в разных условиях циклического нагружения иллюстрирует рис. 11. (С целью упрощения анализа рисунка некоторые кривые усталости приведены без экспериментальных точек.) Там же представлены кривые усталости образцов в исходном состоянии. Анализ полученных результатов показал, что сопротивление усталости образцов в исходном состоянии при ударном нагружении ниже, чем при гармоническом. В ходе обработки сопротивление усталости сварных соединений как при гармоническом, так и ударном нагружении во всем исследованном диапазоне долговечности повышается в 1,1...1,6 раза. Видно, что сопротивление усталости обработанных соединений в условиях ударного нагружения при температуре  $-60^\circ\text{C}$  незначительно выше, чем сопротивление усталости соединений в исходном состоянии в случае гармонического нагружения при комнатной температуре. Это означает,

что положительный эффект от упрочнения нивелируется отрицательным влиянием удара и низкой температуры, что существенно для металлоконструкций, эксплуатируемых в условиях Крайнего Севера. Обусловлено это тем, что в случае ударного нагружения при низкой температуре существующие в сварных швах поры становятся опасными источниками концентрации напряжений, из которых развиваются трещины усталости. Это было установлено при проведении исследований сварных соединений из стали 14Х2ГМР со снятым усилением шва [20].

Чтобы сопоставить эффективность методов упрочнения сварных образцов с учетом различных условий испытания на усталость и дать им количественную оценку, был введен ряд коэффициентов. Влияние обработки на сопротивление усталости сварных соединений в условиях гармонического нагружения при комнатной температуре оценивали коэффициентом  $K_{v1}$ , ударного нагружения при низкой температуре –  $K_{v2}$ :

$$K_{v1} = \frac{\sigma_{Ro}}{\sigma_R}; \quad (2)$$

$$K_{v2} = \frac{\sigma'_{Ro}}{\sigma'_R}, \quad (3)$$

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 нагружения и низкой температуры на сопротивление усталости исследуемых сварных соединений оценивали так:

$$K_{v3} = \frac{\sigma'_{Ro}}{\sigma_R}. \quad (4)$$

Результаты расчетов указанных коэффициентов для всех видов обработки представлены в табл. 2.

Анализ данных показывает, что наиболее эффективной из рассмотренных методов упрочнения является высокочастотная механическая проковка, которая в условиях гармонического нагружения и комнатной температуры повышает сопротивление усталости упрочненных образцов, определенное на базе  $10^6$  цикл нагружений, на 71%, а в условиях повторного ударного нагружения при низкой температуре – на 18% сопротивление усталости образцов, испытанных в исходном состоянии при гармоническом нагружении и комнатной температуре. Это дает основание рекомендовать ВМП, при соблюдении правильной технологии обработки, для упрочнения конструкций, эксплуатируемых также в условиях холодного климата. Относительно виброобработки можно отметить следующее: несмотря на то что этот метод не выделяется эффективностью повышения сопротивления усталости, он имеет неоспоримое преимущество, заключающееся в возможности за один техноло-



гический цикл обработать элементы конструкции, обладающие разной жесткостью. Анализ данных, приведенных в табл. 2, также показывает, 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, что оценка рассматриваемых обработок по коэффициенту  $K_{v3}$  в несколько раз меньше таковой в сопоставимых условиях испытаний, т.е. в условиях гармонического нагружения при комнатной температуре или ударного нагружения при  $-60^{\circ}\text{C}$ .

Т а б л и ц а 2

Сравнительная оценка влияния вида упрочняющей обработки на сопротивление усталости сварных соединений на базе  $10^6$  цикл нагружений

Марка стали и вид соединения	Вид обработки шва	Вид нагружения	$T, ^{\circ}\text{C}$	$\sigma_R, \sigma_{R0}, \text{МПа}$	$K_{v1}$	$K_{v2}$	$K_{v3}$
14Х2ГМР, стыковое	Механическая	Ударный	-60	245	1,32	-	1,08
	»	Гармонический	20	295			
	Без обработки	»	20	225			
12ГН2МФАЮ, стыковое	Аргонодуговая	Ударный	-60	451	1,37	1,35	1,02
	»	Гармонический	20	605			
	Без обработки	»	20	443			
	» »	Ударный	-60	335			
15ХСНД, тавровое	Взрыв	Ударный	-60	235	1,22	1,26	1,07
	»	Гармонический	20	269			
	Без обработки	»	20	220			
	» »	Ударный	-60	187			
09Г2С, тавровое	ВМП	Ударный	-60	468	-	1,38	1,18
	Без обработки	Гармонический	20	398			
	» »	Ударный	-60	330			
Сталь СтЗсп, стыковое	ВМП	Гармонический	20	402	1,71	-	-
	Без обработки	»	20	235			
Сталь 20, с приваренным ребром	Виброобработка	Гармонический	20	166	1,19	-	-
	Без обработки	»	20	140			

Таким образом, все рассмотренные методы упрочняющих обработок повышают сопротивление усталости сварных соединений, однако эффективность их разная и существенно зависит от сочетания вида циклического нагружения и температуры окружающей среды.

## Выводы

1. Разработана и экспериментально апробирована методика выбора режимов виброобработки сварных элементов металлоконструкций, что обеспечивает эффективное снижение остаточных напряжений растяжения до вели-

чины, которая не меньше заданной, без опасности возникновения усталостных повреждений.

2. Предложен критерий, позволяющий использовать глубину канавки зоны сплавления сварного шва с основным металлом для оценки эффективности высокочастотной механической проковки. Для достижения максимальной долговечности образца экспериментально установлены оптимальное значение глубины канавки, а также скорость проковки в зависимости от амплитуды колебаний рабочего инструмента.

3. Показано, что наиболее эффективным методом упрочнения исследованных сварных соединений, оцениваемых по критерию повышения сопротивления усталости в разных условиях циклического нагружения, является высокочастотная механическая проковка.

## Резюме

На основі результатів експериментальних досліджень показано вплив віброобробки, високочастотної механічної проковки, механічної зачистки підсилення шва, аргонодугової обробки й обробки вибухом на опір утомі зварних з'єднань маловуглецевих і низьколегованих сталей в різних умовах температурно-силового навантаження. Удосконалено методи віброобробки і високочастотної механічної проковки зварних елементів металоконструкції.

1. *Аснис А. Е., Иващенко Г. А.* Повышение прочности сварных конструкций. – Киев: Наук. думка, 1978. – 193 с.
2. *Кудрявцев И. В., Наумченков Н. Е.* Усталость сварных конструкций. – М.: Машиностроение, 1976. – 271 с.
3. *Труфяков В. И.* Усталость сварных соединений. – Киев: Наук. думка, 1973. – 215 с.
4. *Шнеер Ф. З., Панов В. И.* Вибрационная обработка сварных крупногабаритных конструкций с целью уменьшения деформации и склонности к образованию трещин // Сварочное пр-во. – 1983. – № 5. – С. 13 – 15.
5. *Пат. Великобритании № 1259556.* Способ снятия напряжений в деталях вибрацией и установка для этих целей / Л. Томпсон. – 1969.
6. *Лобанов Л. М., Кирьян В. И., Кныш В. В., Прокопенко Г. И.* Повышение сопротивления усталости сварных соединений металлоконструкций высокочастотной механической проковкой (обзор) // Автомат. сварка. – 2006. – № 9. – С. 3 – 11.
7. *Кудрявцев Ю. Ф., Коришун В. Ф., Кузьменко А. З.* Повышение циклической долговечности сварных соединений ультразвуковой ударной обработкой // Там же. – 1989. – № 7. – С. 24 – 28.
8. *Дегтярев В. А.* Установки типа ДСО для испытаний на усталость при повторном ударном и гармоническом нагружении с различной асимметрией цикла // Пробл. прочности. – 1982. – № 10. – С. 110 – 113.

9. *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.
10. *Пат. України № 47536.* Пристрій для ультразвукової ударної обробки металів / Г. І. Прокопенко, Я. І. Клейман, О. В. Козлов та ін. – Чинний з 15.07.2002.
11. *Гришаков С. В., Ковалев А. М.* Использование эффекта Баркгаузена для оценки напряжений и повреждений в ферромагнитных материалах / АН УССР. Ин-т проблем прочности. – Препр. – Киев, 1988. – 48 с.
12. *Дегтярев В. А.* Влияние коэффициента асимметрии цикла напряжений на усталость и циклическую ползучесть низколегированных сталей. Сообщ. 2 // Пробл. прочности. – 1991. – № 2. – С. 27 – 31.
13. *ГОСТ 3248-81.* Металлы. Метод испытаний на ползучесть. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 54 с.
14. *Дегтярев В. А., Шульгинов Б. С., Михайлов О. Н., Гуца О. И.* Влияние циклической ползучести на остаточные сварочные напряжения // Пробл. прочности. – 1988. – № 3. – С. 26 – 31.
15. *Дегтярев В. А., Шульгинов Б. С., Кныш В. В.* Деформационный критерий эффективности упрочнения сварных соединений высокочастотной механической проковкой // Автомат. сварка. – 2009. – № 10. – С. 48 – 51.
16. *Вислювський Н. Г., Пожидаєв Н. Г., Демин В. М.* Проблемы использования виброобработки вместо термообработки // Тяжелое машиностроение. – 1992. – № 8. – С. 20 – 22.
17. *РД 50-551-85.* Методические указания. Расчеты испытания на прочность. Расчетно-экспериментальные методы оценки сопротивления усталости сварных соединений. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 52 с.
18. *Нормы для расчета и проектирования новых и модернизируемых вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных).* – М.: ВНИИВ-ВНИИЖТ, 1983. – 259 с.
19. *Marquis G.* Failure modes and fatigue strength of improved HSS welds // Eng. Fract. Mech. – 2010. – 77, No. 11. – P. 2051 – 2062.
20. *Шульгинов Б. С., Матвеев В. В., Дегтярев В. А., Дудин А. И.* О влиянии микродефектов в сварных швах на сопротивление усталости металлоконструкций горнодобывающей транспортной техники // XI Респ. конф. по повышению надежности и долговечности машин и сооружений: Тез. докл. – Киев: Наук. думка, 1985. – С. 167 – 168.

Поступила 11. 06. 2012