

Оценка эффективности методов повышения сопротивления усталости сварных соединений при ударном нагружении в условиях низкой температуры

В. А. Дегтярев, Б. С. Шульгинов

Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, Украина

Проанализированы экспериментальные данные по влиянию различных упрочняющих обработок (механическое снятие усиления шва, аргонодуговая, взрывом, ультразвуковой поверхностный наклеп) на сопротивление усталости сварных соединений низколегированных сталей при гармоническом и ударном нагружении в условиях комнатной и низкой (-60°C) температур. Установлено количественное повышение сопротивления усталости при каждом виде обработки в одинаковых условиях испытаний. Сравнение эффективности каждого вида обработки в условиях ударного нагружения при низкой температуре относительно исходного состояния сварного соединения при гармоническом нагружении и комнатной температуре показало, что наиболее целесообразно использовать ультразвуковой поверхностный наклеп для упрочнения сварных конструкций, эксплуатируемых в условиях низких климатических температур.

Введение. Существует целый ряд технологических методов повышения долговечности сварных соединений [1–3]. Их эффективность обычно оценивают по результатам испытаний упрочненных и неупрочненных сварных образцов или деталей на усталость в стандартных условиях, т.е. при гармоническом нагружении в условиях комнатной температуры [4]. Принято считать, что снижение температуры до -60°C не уменьшает сопротивление усталости сварных соединений [2]. Поэтому оценку эффективности упрочняющих методов в условиях низких климатических температур обычно не проводят. Однако в условиях Сибири и Крайнего Севера поток отказов сварных конструкций транспортной и горнодобывающей техники в зимнее время увеличивается в несколько раз [5], что, по-видимому, обусловлено в основном уменьшением сопротивления усталости сварных соединений при понижении температуры эксплуатации. Экспериментально этот эффект был получен в Институте проблем прочности НАН Украины при испытаниях на усталость в условиях ударного нагружения [6]. В связи с этим упрочнение сварных конструкций, работающих в условиях низких климатических температур, становится особенно актуальным. Однако эффективность упрочняющих методов при ударном нагружении и низкой температуре практически неизвестна.

В настоящей работе исследовано влияние наиболее известных методов упрочнения на сопротивление усталости сварных соединений низколегированных сталей в условиях ударного нагружения при -60°C . Исследовали эффективность механической и аргонодуговой обработок стыковых соединений, взрывной обработки и ультразвукового поверхностного наклепа тавровых соединений.

Типы сварных образцов и порядок их подготовки. Используемые марки сталей проката, размеры образцов и их механические свойства приведены в табл. 1, а конструкция образцов – на рис. 1.

Основные размеры сварных образцов и механические свойства сталей при комнатной температуре

Сталь	Вид образца	h , мм	b , мм	L , мм	e , мм	k , мм	H , мм	σ_T , МПа	σ_B , МПа
14X2ГМР	<i>a</i>	16	80	400	12	–	–	702	800
12ГН2МФАЮ	<i>б</i>	24	40	400	–	–	–	620	710
15ХСНД	<i>в</i>	14	80	400	12	14	40	435	600
09Г2С	<i>г</i>	20	40	400	–	20	36	340	520

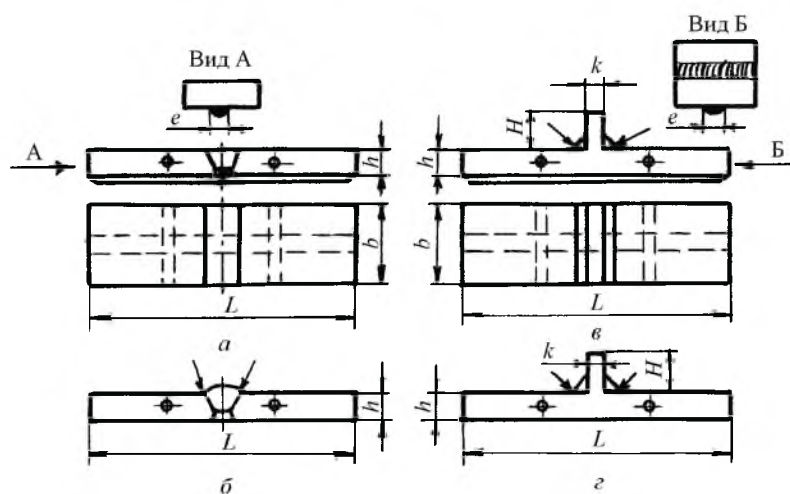


Рис. 1. Типы сварных образцов для определения сопротивления усталости.

Образцы вырезали из сварных заготовок размером в плане 400×660 мм, у которых стыковые соединения выполняли ручной электродуговой сваркой (сталь 14X2ГМР) или полуавтоматической в среде углекислого газа (сталь 12ГН2МФАЮ), а тавровые соединения – автоматической сваркой под флюсом (стали 15ХСНД и 09Г2С). Одинаковые сварные соединения в одних заготовках оставляли в исходном состоянии, в других – подвергали одному из нижеперечисленных видов упрочнения.

Механическая обработка (МО) стыкового соединения стали 14X2ГМР заключалась в удалении усиления шва заподлицо с основным металлом (рис. 1,*а*).

При аргонодуговой обработке (АДО) стыкового соединения стали 12ГН2МФАЮ оплавливали зоны перехода шва к основному металлу (на рис. 1,*б* указано стрелками) несплавающимся вольфрамовым электродом диаметром 4 мм в среде аргона по известной технологии [7].

Ультразвуковому поверхностному наклепу (УПН) в тавровых соединениях стали 09Г2С подвергали зоны сплавления металла шва с основным металлом (на рис. 1,*г* указано стрелками) посредством специального инструмента с многоэлементным рабочим органом [8] при амплитуде резонансных колебаний торца волновода 20 мкм с частотой 18 кГц и скорости перемещения инструмента 0,20...0,25 м/мин.

Образцы из стали 15ХСНД с тавровым сварным соединением, предназначенные для взрывной обработки (ВзО), вырезали из пластин с необработанными швами. В образцах шириной 80 мм создавали остаточные напряжения (ОН) путем наплавки продольного валика на тыльной стороне образца. Затем образцы подвергали взрывной обработке (на рис. 1, в указано стрелками) с помощью цилиндрических зарядов взрывчатого вещества марки ДША-12, уложенных вдоль сварного шва на пластилиновые подкладки.

Методика эксперимента и испытательное оборудование. Образцы испытывали на усталость при изгибе в плоскости наименьшей жесткости при заданном коэффициенте асимметрии цикла напряжений R на установках ДСО-2 [9] в условиях гармонического нагружения при комнатной и низкой температурах и ДСО-1 [10] в условиях повторного ударного нагружения при температуре -60°C . При гармоническом нагружении образца испытания проводили при заданных амплитуде его прогиба и статической нагрузке, а при ударном нагружении – при заданных энергии удара и статической нагрузке. В обоих случаях статическая нагрузка вызывала в образце минимальные напряжения цикла. Амплитуду напряжений измеряли тензорезисторами, наклеенными на образец. Критерием разрушения образца считали образование трещины предельной длины, равной для узких образцов 20 мм, для широких – 40 мм, или его хрупкое разрушение при меньшей длине трещины. Образцы с остаточными напряжениями испытывали при коэффициенте асимметрии $R=0$, а без остаточных напряжений – при $R=0,5$. Выбор $R=0,5$ сделан на том основании, что, как показали ранее проведенные исследования [11], при таком значении R пределы выносливости сварных образцов с высокими остаточными напряжениями и без них имеют одинаковые значения. Это дает возможность определить диаграмму предельных напряжений цикла сварного соединения с высокими ОН по результатам испытаний образцов без ОН.

При проведении испытаний при низких температурах образцы охлаждали путем пропускания паров жидкого азота через специально выполненные в них отверстия (рис. 1). С целью повышения надежности системы охлаждения вместо электромеханических приборов было изготовлено специальное электронное устройство для задания и поддержания температуры образца, что позволило значительно увеличить точность измерения температуры до $\pm 0,04^{\circ}\text{C}$ и точность ее поддержания в течение всего времени испытания до $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Для сравнения точность измерения температуры образца ранее использовавшимися приборами составляла $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, а точность ее поддержания – $\pm 1,0^{\circ}\text{C}$.

Анализ результатов исследований. Кривые усталости обработанных и необработанных стыковых сварных соединений сталей 14Х2ГМР и 12ГН2МФАЮ в полулогарифмических координатах максимальное напряжение цикла σ – число циклов до разрушения N представлены на рис. 2, а тавровых сварных соединений сталей 15ХСНД и 09Г2С – на рис. 3. (Чтобы не загромождать рисунки, некоторые кривые усталости приведены без экспериментальных точек.) Уравнения кривых усталости приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Сравнительная оценка влияния упрочняющих обработок на сопротивление усталости сварных соединений

Стали и вид обработки	Тип соединения	Уравнение кривой усталости $K = f(\lg N)$	Значения K при N , цикл	
			10^6	$2 \cdot 10^6$
14Х2ГМР, МО 12ГН2МФАЮ, АДО	Стыковое	$K_{v1} = \frac{\sigma_{R_0}}{\sigma_R} = \frac{1166 - 227,6 \lg N}{1188,2 - 160 \lg N}$	1,32	1,29
		$K_{v3} = \frac{\sigma'_{R_0}}{\sigma_R} = \frac{982,5 - 122,9 \lg N}{1188,2 - 160 \lg N}$	1,08	1,16
	» »	$K_{v1} = \frac{\sigma_{R_0}}{\sigma_R} = \frac{2359 - 292,3 \lg N}{2485,6 - 340,5 \lg N}$	1,37	1,55
		$K_{v2} = \frac{\sigma'_{R_0}}{\sigma'_R} = \frac{2444 - 332,2 \lg N}{1735 - 232,5 \lg N}$	1,35	—
		$K_{v3} = \frac{\sigma'_{R_0}}{\sigma_R} = \frac{2444 - 332,2 \lg N}{2485,6 - 340,5 \lg N}$	1,02	—
15ХСНД, ВЗО	Тавровое	$K_{v1} = \frac{\sigma_{R_0}}{\sigma_R} = \frac{1236,4 - 161,3 \lg N}{770,25 - 91,74 \lg N}$	1,22	1,16
		$K_{v2} = \frac{\sigma'_{R_0}}{\sigma'_R} = \frac{849,6 - 102,46 \lg N}{496,37 - 51,55 \lg N}$	1,26	1,16
		$K_{v3} = \frac{\sigma'_{R_0}}{\sigma_R} = \frac{849,6 - 102,46 \lg N}{770,25 - 91,74 \lg N}$	1,07	1,06
09Г2С, УПН	» »	$K_{v2} = \frac{\sigma'_{R_0}}{\sigma'_R} = \frac{1112,9 - 107,43 \lg N}{794,7 - 77,61 \lg N}$	1,42	1,42
		$K_{v3} = \frac{\sigma'_{R_0}}{\sigma_R} = \frac{1112,9 - 107,43 \lg N}{986 - 99,3 \lg N}$	1,20	1,21

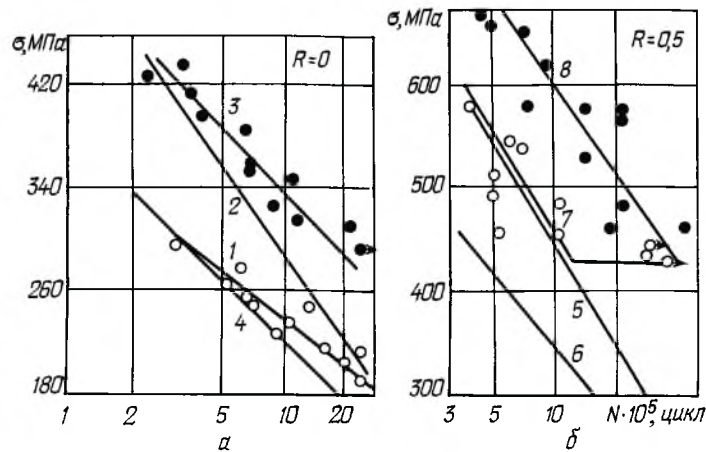


Рис. 2. Кривые усталости стыковых соединений сталей 14Х2ГМР (а) и 12ГН2МФАЮ (б): 1, 2, 3 – после механической обработки; 4, 5, 6 – исходное состояние; 7, 8 – после аргонодуговой обработки. (1, 6, 7 – ударное нагружение при -60°C ; 2, 4, 5, 8 – гармоническое нагружение при комнатной температуре; 3 – гармоническое нагружение при -60°C .)

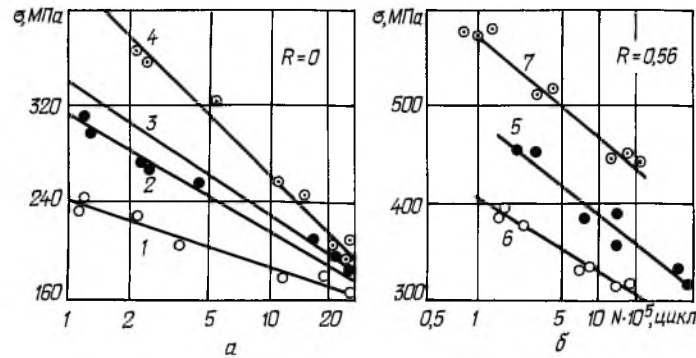


Рис. 3. Кривые усталости тавровых соединений сталей 15XCHD (а) и 09Г2С (б): 1, 2, 5, 6 – исходное состояние; 3, 4 – после взрывной обработки; 7 – после ультразвукового поверхностного наклепа. (1, 3, 6, 7 – ударное нагружение при -60°C ; 2, 4, 5 – гармоническое нагружение при комнатной температуре.)

Для сравнения эффективности вышеупомянутых методов обработки сварных соединений между собой с учетом различных условий испытания на усталость и количественной оценки ввели ряд коэффициентов. Влияние обработки на сопротивление усталости сварных соединений в условиях гармонического нагружения при комнатной температуре оценивали по коэффициенту

$$K_{v_1} = \frac{\sigma_{R_0}}{\sigma_R} = \frac{a_1 - b_1 \lg N}{a_0 - b_0 \lg N}, \quad (1)$$

где σ_R и σ_{R_0} – пределы ограниченной выносливости сварного соединения соответственно в исходном состоянии и после дополнительной обработки, определенные при одинаковой долговечности по уравнениям кривых усталости.

Влияние обработки на сопротивление усталости сварных соединений в условиях ударного нагружения при низкой температуре оценивали по коэффициенту

$$K_{v_2} = \frac{\sigma'_{R_0}}{\sigma'_R} = \frac{a_3 - b_3 \lg N}{a_2 - b_2 \lg N}, \quad (2)$$

где σ'_R , σ'_{R_0} – пределы ограниченной выносливости сварного соединения в исходном состоянии и после дополнительной обработки, полученные при ударном нагружении и -60°C соответственно. Их значения находили по соответствующим уравнениям кривых усталости, представленным в табл. 2. Там же приведены значения коэффициентов K_{v_1} и K_{v_2} при долговечностях $N = 10^6$ и $N = 2 \cdot 10^6$ цикл нагружений. Кривые на рис. 4, а и б характеризуют зависимости коэффициентов K_{v_1} и K_{v_2} соответственно от числа циклов до разрушения при разной технологии упрочнения шва. Анализ

результатов испытаний показывает, что все виды обработок повышают сопротивление усталости сварных соединений при обоих условиях испытаний во всем исследованном диапазоне долговечности в 1,1...1,6 раза. Причем эффект упрочнения при ВЗО и АДО для долговечностей 10^6 и $2 \cdot 10^6$ цикл практически одинаков, т.е. не зависит от условий испытаний. Из рисунков также следует, что по мере увеличения долговечности N эффект упрочнения для разных видов обработок может уменьшаться, увеличиваться или оставаться неизменным. Например, коэффициенты K_{v_1} для соединений, подвергнутых механической обработке (кривая 1), и K_{v_2} для соединений после аргонодуговой обработки (кривая 2) и ультразвукового поверхностного наклепа (кривая 4) практически не зависят от числа циклов. Численные их значения даны в табл. 2. Взрывная обработка приводит к уменьшению коэффициентов K_{v_1} и K_{v_2} в диапазоне изменения долговечности $2 \cdot 10^5 \dots 2 \cdot 10^6$ цикл. Для сварных соединений, подвергнутых аргонодуговой обработке, K_{v_1} увеличивается.

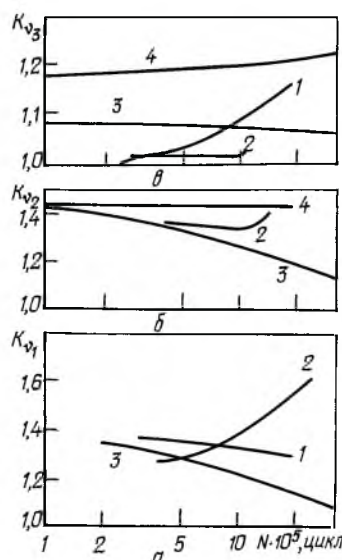


Рис. 4. Зависимости коэффициентов K_{v_1} (а), K_{v_2} (б) и K_{v_3} (в) от долговечности при разных технологиях упрочнения сварного шва сталей 14Х2ГМР (механическая обработка) – 1, 12ГН2МФАЮ (аргонодуговая обработка) – 2, 15ХСНД (взрывная обработка) – 3 и 09Г2С (ультразвуковой поверхностный наклеп) – 4.

Совместное влияние обработки, ударного режима нагружения и низкой температуры на сопротивление усталости вышеупомянутых сварных соединений оценивали по коэффициенту

$$K_{v_3} = \frac{\sigma'_{R_0}}{\sigma_R} = \frac{a_3 - b_3 \lg N}{a_0 - b_0 \lg N}. \quad (3)$$

В табл. 2 указаны значения K_{v_3} при долговечностях 10^6 и $2 \cdot 10^6$ цикл нагружений. Зависимости коэффициента K_{v_3} от долговечности для всех видов обработок представлены на рис. 4,в. Как видно, механическая обработка до долговечностей $3 \cdot 10^5$ цикл и аргонодуговая до $1,15 \cdot 10^6$ цикл практически не влияют на относительное изменение сопротивления усталости сварных соединений, т.е. $K_{v_3} = 1$. Это значит, что положительный эффект от МО и АДО, приводящий к повышению сопротивления усталости стыкового соединения, сводится на нет отрицательным влиянием ударного нагружения и низкой температуры, что может иметь существенное значение для машиностроительных сварных конструкций, предназначенных для работы в условиях Крайнего Севера и рассчитанных на эксплуатацию в области ограниченной долговечности (в частности, до 10^6 цикл). Объяснить полученный результат можно исходя из того, что в условиях ударного нагружения и низкой температуры имеющиеся в сварных швах микропоры, не опасные в стандартных условиях, становятся концентраторами, из которых развивались трещины усталости. Это установлено при проведении исследований сварных соединений стали 14Х2ГМР со снятым усилением шва [12]. По мере повышения долговечности N эффект упрочнения от механической обработки проявляется в большей мере: K_{v_3} увеличивается до 1,16 при $2 \cdot 10^6$ цикл нагружений. Из рис. 2,б видно, что при $N > 1,15 \cdot 10^6$ цикл аргонодуговая обработка также может быть эффективной. Однако последний результат требует проведения дополнительных исследований. Эффект упрочнения от взрывной обработки (кривая 3 на рис. 4,в) в этих условиях испытаний во всем диапазоне долговечности остается практически постоянным и равным $K_{v_3} = 1,07$. Только ультразвуковой поверхностный наклеп в среднем на 20% повышает сопротивление усталости, что свидетельствует о его преимуществе перед другими рассмотренными технологическими обработками стыковых и тавровых сварных соединений низколегированных сталей. Из рис. 4,а,б также видно, что эффект упрочнения практически не зависит от условий испытаний. Это означает, что относительное увеличение сопротивления усталости в случае удара при низкой температуре и гармонического нагружения при комнатной температуре обработанных соединений происходит примерно на одинаковую величину. Сопоставление представленных на рисунке кривых, полученных при одном виде обработки, показывает, что эффективность рассматриваемых обработок по коэффициенту K_{v_3} более чем в два раза меньше (например, на базе 10^6 или $2 \cdot 10^6$ цикл), чем просто при одинаковых условиях испытаний, т.е. в условиях гармонического нагружения при комнатной температуре или ударного нагружения при -60°C .

Проведенные исследования свидетельствуют, что все виды обработок увеличивают сопротивление усталости сварных соединений, но эффектив-

ность их разная и зависит от базы испытаний. Если сравнивать эффективность каждого вида обработки в условиях ударного нагружения при низкой температуре относительно исходного состояния сварного соединения при гармоническом нагружении и комнатной температуре, то видно, что из всех рассмотренных видов обработок наиболее целесообразно использовать ультразвуковой поверхностный наклеп для упрочнения конструкций, эксплуатируемых в условиях холодного климата. Можно также отметить, что испытания сварных соединений на усталость в условиях ударного нагружения при низкой температуре выявляют такие их свойства после технологической обработки, которые не обнаруживаются при испытаниях в условиях гармонического нагружения при комнатной или низкой температурах. Это свидетельствует о том, что испытания при ударе имеют самостоятельное значение, так как свойства сварных соединений не могут быть установлены при других видах испытаний.

Заключение. Из рассмотренных методов обработки сварных соединений наиболее эффективным по критерию повышения их сопротивления усталости в условиях ударного нагружения и низкой температуры является ультразвуковой поверхностный наклеп, который на 20% повышает сопротивление усталости такого же соединения в исходном состоянии, определенное при гармоническом нагружении и комнатной температуре. Сопротивление усталости подвергнутых обработке стыковых и тавровых сварных соединений, полученное в условиях как ударного нагружения при низкой температуре, так и гармонического нагружения при комнатной температуре, повышается примерно одинаково.

Резюме

Проаналізовано експериментальні дані щодо впливу різних зміцнювальних обробок (механічне зняття підсиленого шва, аргонодугова, вибухом, ультразвуковий поверхневий наклеп) на опір втомі зварних з'єднань низьколегованих сталей при гармонічному й ударному навантаженні в умовах кімнатної та низької (-60°C) температур. Установлено кількісне підвищення опору втомі для кожного виду обробки в однакових умовах випробувань. Порівняння ефективності кожного виду обробки в умовах ударного навантаження при низькій температурі відносно початкового стану зварного з'єднання при гармонічному навантаженні та кімнатній температурі показало, що найбільш доцільно використовувати ультразвуковий поверхневий наклеп для зміцнення зварних конструкцій, що експлуатуються в умовах низьких кліматичних температур.

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. РД 50-551-85. Методические указания. Расчеты и испытания на прочность. Расчетно-экспериментальные методы оценки сопротивления усталости сварных соединений. – Введ. 01. 01. 86.
5. Григорьев Р. С., Ларионов В. П., Уржумцев Ю. С. Методы повышения работоспособности техники в северном исполнении. – Новосибирск: Наука, 1987. – 255 с.
6. Шульгинов Б. С. Сопротивление усталости сталей и их сварных соединений с учетом эксплуатации горнодобывающей и транспортной техники в районах Крайнего Севера // Прочность материалов и конструкций при низких температурах. – Киев: Наук. думка, 1990. – С. 248 – 253.
7. Иващенко Г. А. Упрочнение сварных соединений из низколегированных и низкоуглеродистых сталей аргонодуговой обработкой // Аргонодуговая обработка сварных соединений (Сб. науч. статей). – Киев: ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР, 1983. – С. 9 – 21.
8. Статников Е. Ш., Шевцова 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.
9. 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.
10. Шульгинов Б. С., Дегтярев В. А. Установка для испытаний материалов и их сварных соединений на усталость при многоцикловом ударном нагружении // Там же. – 1998. – № 3. – С. 141 – 146.
11. Шульгинов Б. С., Дегтярев В. А., Матвеев В. В. О предельных напряжениях цикла сварных соединений с высокими остаточными напряжениями // Там же. – 1984. – № 3. – С. 58 – 61.
12. Шульгинов Б. С., Матвеев В. В., 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 26. 07. 99