



## ПОВЫШЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С НАКОПЛЕННОЙ ПОВРЕЖДЕННОСТЬЮ ПРИ МНОГОСТУПЕНЧАТОМ И БЛОЧНОМ НАГРУЖЕНИЯХ

**В. В. КНЫШ**, д-р техн. наук, **С. А. СОЛОВЕЙ**, канд. техн. наук, **А. З. КУЗЬМЕНКО**, инж.  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Приведены результаты испытаний на усталость тавровых сварных соединений стали 09Г2С, упрочненных технологией высокочастотной механической проковки после накопления 50% усталостных повреждений, при действии многоступенчатого и блочного нагружений с отличающимися параметрами до и после упрочнения. Установлено, что применение этой технологии позволяет повысить уровни первоначально прикладываемых напряжений к таким соединениям и увеличить их остаточную долговечность.

*Ключевые слова:* накопление усталостных повреждений, высокочастотная механическая проковка, циклическая долговечность, усталость, сварное соединение

В процессе эксплуатации инженерные конструкции, как правило, подвергаются сложным режимам нагружения, когда последовательность значений амплитуд и средних напряжений цикла изменяется случайным образом [1]. В работах [2–4] представлены данные экспериментальных исследований по повышению технологией высокочастотной механической проковки (ВМП) несущей способности сварных элементов эксплуатируемых металлоконструкций, упрочненных после накопления заданного уровня усталостных повреждений вплоть до зарождения трещины. Показано, что после упрочнения соединений технологией ВМП уровни эксплуатационных нагрузок могут быть существенно повышены с обеспечением заданной долговечности. Исследования в данном направлении проводили только при регулярном нагружении. В связи с этим установление эффективности упрочнения сварных соединений элементов конструкций технологией ВМП для повышения несущей способности эксплуатируемых конструкций при воздействии нерегулярного нагружения является актуальной задачей.

Цель настоящей работы — экспериментально установить эффективность упрочнения технологией ВМП тавровых сварных соединений эксплуатируемых металлоконструкций для повышения их несущей способности в условиях действия многоступенчатых и блочных нагружений с отличающимися параметрами до и после обработки.

Экспериментальные исследования проводили на образцах тавровых соединений стали 09Г2С ( $\sigma_T = 370$  МПа,  $\sigma_B = 540$  МПа). Заготовки под

образцы из этой стали вырезали из листового проката так, чтобы длинная сторона была ориентирована вдоль проката. Поперечные ребра приваривали угловыми швами с двух сторон ручной дуговой сваркой электродами марки УОНИ-13/55. Форма и геометрические размеры образца приведены на рис. 1. Толщина образца обусловлена широкой применимостью в сварных конструкциях проката толщиной 12 мм, а ширину рабочей части образца выбирали исходя из мощности испытательного оборудования. При упрочнении соединений технологией ВМП поверхностному пластическому деформированию подвергали узкую зону перехода металла шва к основному металлу. Испытания на усталость образцов проводили на испытательной машине УРС 20 при одноосном переменном растяжении с асимметрией

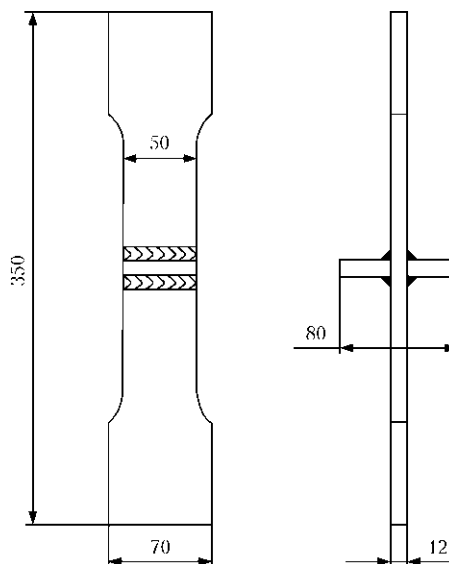


Рис. 1. Форма и размеры образца таврового соединения стали 09Г2С

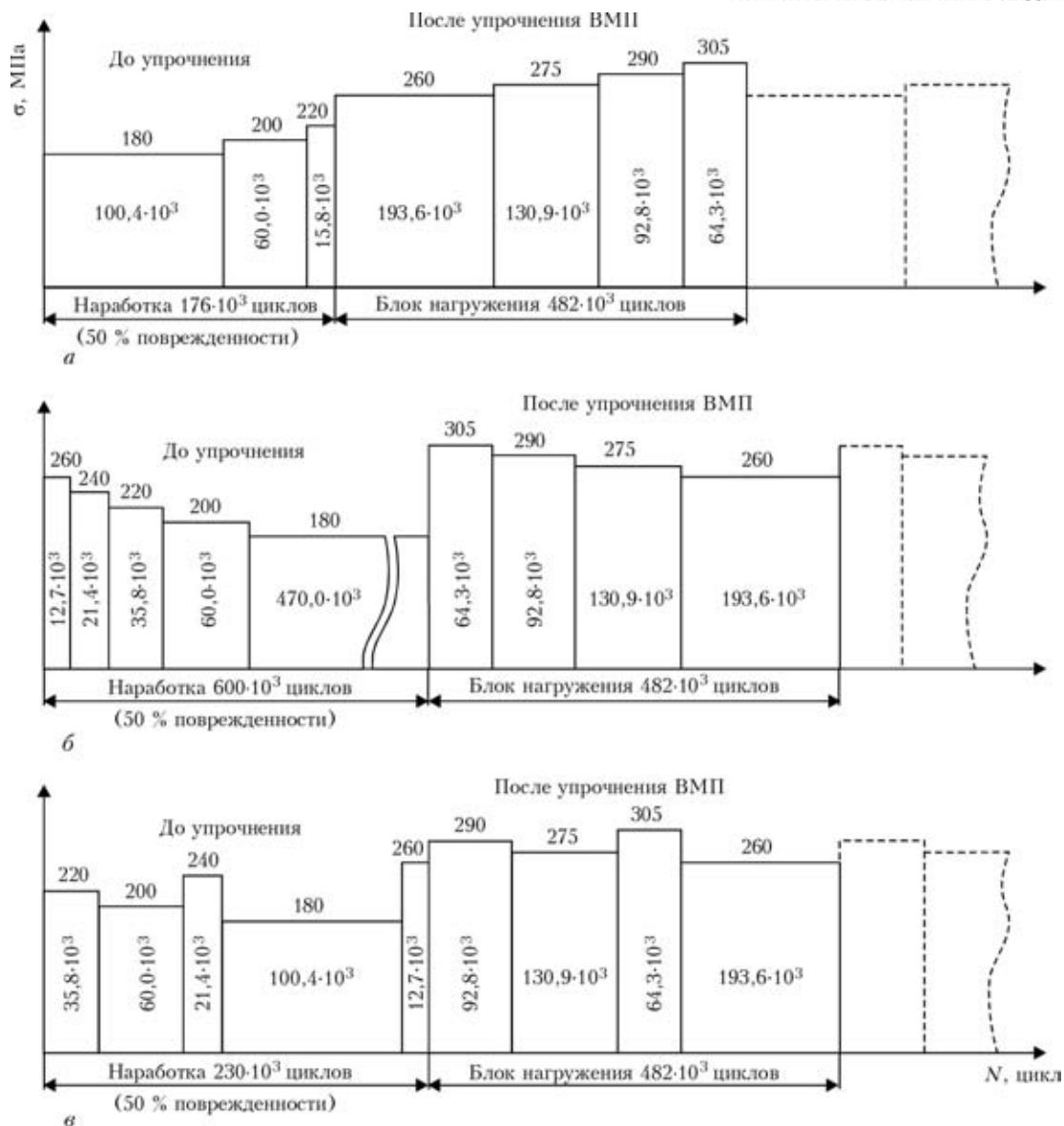


Рис. 2. Схема нагружения образцов таврового сварного соединения стали 09Г2С до и после упрочнения при многоступенчатом нагружении с возрастающей (а), убывающей (б) и квазислучайной (в) последовательностями приложения нагрузки

цикла  $R_\sigma = 0$ . Все образцы испытывали до полного разрушения.

Эффективность повышения технологий ВМП характеристик сопротивления усталости сварных соединений с накопленными усталостными повреждениями при действии отличающихся многоступенчатых и блочных нагружений до и после упрочнения определяли путем сопоставления экспериментальных данных испытаний на усталость сварных соединений в исходном состоянии и упрочненных после наработки заданного количества циклов переменного нагружения. Экспериментальные данные испытаний исследуемых сварных соединений в исходном состоянии при многоступенчатом и блочном нагружениях получены ранее в работах [5, 6].

Испытания на усталость тавровых сварных соединений стали 09Г2С, упрочненных после наработки заданного количества циклов перемен

напряжений, проводили на 18 образцах, по 9 образцов соответственно в условиях многоступенчатого и блочного нагружений с возрастающим, убывающим и квазислучайным порядками приложения нагрузки в блоке. Для каждого порядка приложения нагрузки испытывали три образца в условиях многоступенчатого и три образца в условиях блочного нагружений.

При многоступенчатом и блочном нагружениях сварных соединений в исходном после сварки состоянии порядок приложения нагрузки задавали одними и теми же пятью уровнями (ступенями) прикладываемых максимальных напряжений цикла, но с различной наработкой доли поврежденности (количества циклов перемен напряжений) на каждом уровне. Возрастающий порядок приложения нагрузки в блоке задавали начальными максимальными напряжениями цикла, равными 180 МПа на первой ступени нагружения с пос-

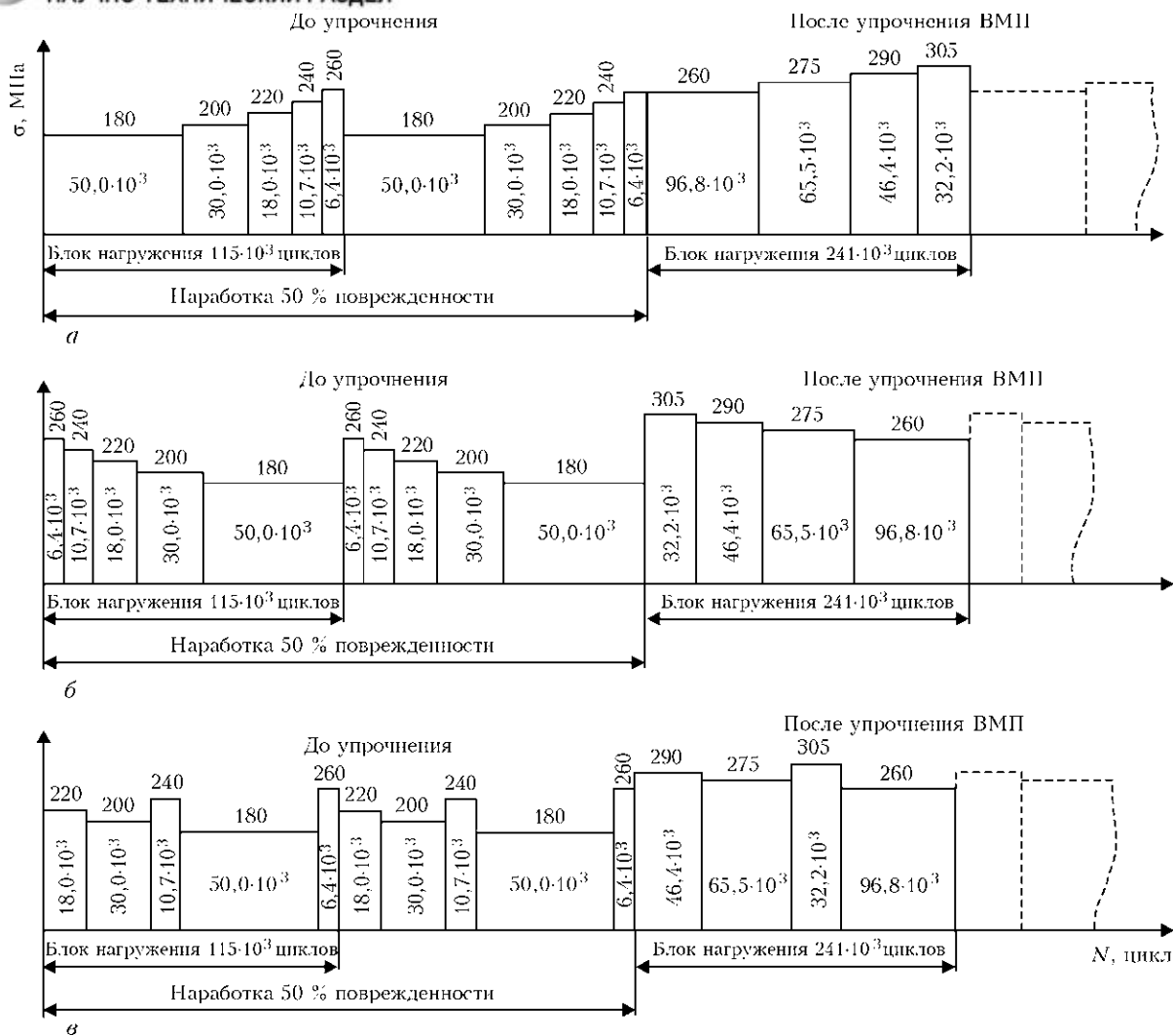


Рис. 3. Схема нагружения образцов таврового сварного соединения стали 09Г2С до и после упрочнения при блочном нагружении с возрастающей (а), убывающей (б) и квазислучайной (в) последовательностями приложения нагрузки в каждом блоке

ледующим увеличением до 260 МПа (пятая ступень нагружения) с шагом 20 МПа. Убывающий порядок приложения нагрузки в блоке задавали начальным уровнем максимальных напряжений цикла 260 МПа с последующим уменьшением до 180 МПа также с шагом 20 МПа. Квазислучайный порядок приложения нагрузки в блоке задавали следующими пятью последовательными уровнями максимальных напряжений цикла в блоке: 220, 200, 240, 180, 260 МПа.

Упрочнение технологией ВМП сварных соединений проводили при накоплении соединениями 50 % усталостных повреждений. Количество циклов перемен напряжений до упрочнения на каждой ступени нагружения в условиях многоступенчатого и блочного нагружений задавали исходя из установленных ранее предельных значений суммы относительных долговечностей (критериев разрушения) тавровых сварных соединений стали 09Г2С в исходном состоянии при аналогичных нагружениях [5, 6]. В условиях многоступенчатого переменного нагружения для всех

порядков приложения нагрузок суммарная поврежденность соединений, равная 50 %, задавалась путем уменьшения в два раза приведенных в работе [5] значений количества циклов наработки на каждой ступени нагружения до разрушения образцов (см. рис. 2). При этом возрастающий порядок приложения нагрузки задавали тремя ступенями нагружения, а убывающий и квазислучайный — пятью. В условиях блочного нагружения для всех порядков приложения нагрузки в блоке суммарную поврежденность соединений, равную 50 %, задавали путем уменьшения в два раза количества блоков нагружения до разрушения сварных образцов, приведенных в работе [6], оставляя неизменным количество циклов в блоке (рис. 3). Все порядки приложения нагрузок при блочном нагружении задавали пятью ступенями нагружения.

После упрочнения технологией ВМП порядок приложения нагрузки в блоке (возрастающий, убывающий или квазислучайный) в условиях многоступенчатого и блочного нагружений оставался неизменным. При этом сам блок нагружения за-



Результаты испытаний на усталость образцов тавровых сварных соединений

Вид нагружения	Порядок приложения нагрузки	$N_{50\%}$ , тыс. циклов	$N_{50\%}^{упр}$ , тыс. циклов	$N_{50\%}^{упр} / N_{50\%}$ , %	Разрушение
Многоступенчатое	Возрастающий	176,2	641,5	364	1 ступень 2 блока
		176,2	930,6	528	4 ступень 2 блока
		176,2	1274,1	723	2 ступень 3 блока
	Убывающий	599,9	1656,0	276	3 ступень 4 блока
		599,9	2075,6	346	2 ступень 5 блока
		599,9	2378,1	396	4 ступень 5 блока
	Квазислучайный	230,3	1202,4	522	3 ступень 3 блока
		230,3	1847,6	802	4 ступень 4 блока
		230,3	2079,1	903	2 ступень 5 блока
Блочное	Возрастающий	230,2	1909,6	830	4 ступень 8 блока
		230,2	2297,2	998	2 ступень 10 блока
		230,2	2409,0	1046	Образец не разрушился
	Убывающий	230,2	1552,6	674	3 ступень 7 блока
		230,2	1761,8	765	2 ступень 8 блока
		230,2	2409,0	1046	Образец не разрушился
	Квазислучайный	230,2	1401,5	609	4 ступень 6 блока
		230,2	2171,9	943	1 ступень 10 блока
		230,2	2409,0	1046	Образец не разрушился

Примечание.  $N_{50\%}$  — долговечность образца в неупрочненном состоянии, отвечающая 50 % накопленной усталостной поврежденности при заданном нагружении [5, 6];  $N_{50\%}^{упр}$  — долговечность образца, упрочненного после наработки 50 % поврежденности в исходном состоянии, при заданном нагружении.

давали уже не пятью, как до упрочнения, а повышенными относительно первоначальных четырьмя ступенями нагружения. Повышенные уровни прикладываемых максимальных напряжений цикла отвечали уровням ограниченных пределов выносливости упрочненных сварных соединений (вследствие ВМП предел выносливости рассматриваемых сварных соединений повышался на 56 %, а долговечность увеличивалась до 10 раз) [5].

После упрочнения ВМП тавровых сварных соединений с 50 % наработкой возрастающий порядок приложения нагрузки в блоке задавали максимальными напряжениями цикла, равными 260 МПа на первой ступени нагружения с последующим увеличением до 305 МПа (четвертая ступень нагружения) с шагом 15 МПа. Убывающий порядок приложения нагрузки в блоке задавали начальным уровнем максимальных напряжений цикла 305 МПа с последующим уменьшением до 260 МПа также с шагом 15 МПа. Квазислучайный порядок приложения нагрузки в блоке задавали следующими четырьмя последовательными уровнями максимальных напряжений цикла в блоке: 290, 275, 305, 260 МПа. Количество циклов перемен напряжений на каждой ступени нагружения образца в условиях многоступенчатого нагружения отвечало 12,5 %, а в условиях блочного нагружения — 6,25 % долговечности упрочненного в исходном состоянии образца [5]. Такой подход обеспечивал суммарную поврежденность за четыре ступени нагружения (блок нагружения) при многоступенчатом нагружении, равную 50 %, а при блочном нагружении — 25 % упрочненного в исходном состоянии образца.

Критерием завершения испытаний в условиях многоступенчатого и блочного нагружений служило полное разрушение образцов. Если в условиях многоступенчатого нагружения упрочненный после 50 % наработки в исходном состоянии сварной образец не разрушался после заданных повышенных относительно первоначальных четырех ступеней нагружения (за один блок нагружения), то данный блок нагружения повторялся. Таким образом, после упрочнения сварные образцы вместо многоступенчатого нагружения фактически испытывали до полного разрушения в условиях блочного нагружения. При этом длина блока (количество циклов перемен напряжений в одном блоке) оставалась неизменной и составляла  $481,6 \cdot 10^3$  циклов (см. рис. 2).

Результаты испытаний на усталость образцов тавровых сварных соединений стали 09Г2С, уп-



роченных технологией ВМП после накопления 50 % поврежденности при действии отличающихся многоступенчатых и блочных нагружений с указанием количества циклов наработки до и после упрочнения, представлены в таблице.

Экспериментально установленные значения долговечностей при многоступенчатом нагружении тавровых сварных соединений, упрочненных технологией ВМП после наработки 50 % поврежденности (см. таблицу), показывают, что остаточная долговечность этих соединений составляет от 276 до 903 % остаточной долговечности неупрочненных сварных соединений. При этом значения остаточной долговечности, полученные при испытании образцов при многоступенчатом нагружении с возрастающей последовательностью приложения нагрузки, находятся в пределах 364...723 %, при убывающей последовательности — в пределах 276...396 %, а при квазислучайной нагрузке — в пределах 522...903 % остаточной долговечности неупрочненных сварных соединений при аналогичных порядках приложения нагрузки. Как следует из полученных результатов, упрочнение технологией ВМП тавровых сварных соединений стали 09Г2С после накопления 50 % поврежденности в условиях многоступенчатого нагружения позволяет повысить уровни первоначально прикладываемых максимальных напряжений в блоке до уровней напряжений, отвечающих значениям ограниченных пределов выносливости области многоциклового усталости упрочненных сварных соединений, и гарантированно увеличить их остаточную долговечность.

При блочном нагружении для всех порядков приложения нагрузки после наработки двух блоков нагружения в исходном состоянии (50 % поврежденности) и последующего упрочнения к образцам прикладывали повышенные относительно первоначальных уровни напряжений (см. рис. 3). Испытания образцов проводили до полного их разрушения или наработки ими 10 блоков нагружения в упрочненном состоянии (см. таблицу). Экспериментально установлено, что после упрочнения технологией ВМП разброс значений остаточной долговечности находится в пределах 609...1046 % остаточной долговечности неупроч-

ненных образцов. При этом значения остаточной долговечности, полученные при испытании образцов в случае блочного нагружения с возрастающей последовательностью приложения нагрузки, находятся в пределах 830...1046 %, при убывающей последовательности — в пределах 674...1046 %, а при квазислучайной нагрузке — 609...1046 % остаточной долговечности неупрочненных сварных соединений при аналогичных порядках приложения нагрузки.

Таким образом, экспериментально установлено, что при многоступенчатом и блочном нагружении (см. таблицу) упрочнение технологией ВМП тавровых сварных соединений после наработки 50 % поврежденности позволяет не только существенно повысить уровни прикладываемых напряжений, но и увеличить их остаточную долговечность в 3...10 раз. При этом в условиях блочного нагружения разброс экспериментальных значений циклической долговечности сварных соединений находится в более узком диапазоне (1401400...2409000 циклов), чем при многоступенчатом нагружении (641500...2378100 циклов) и не зависит от порядка приложения нагрузки в блоке.

1. Троценко В. Т., Сосновский Л. А. Сопротивление усталости металлов и сплавов: Справочник. Ч. 1. — Киев: Наук. думка, 1987. — 521 с.
2. Кныш В. В., Кузьменко А. З., Войтенко О. В. Повышение сопротивления усталости сварных соединений высокочастотной механической проковкой // Автомат. сварка. — 2006. — № 1. — С. 43–47.
3. Гарф Э. Ф., Литвиненко А. Е., Смирнов А. Х. Оценка долговечности трубчатых узлов, подвергнутых ультразвуковой ударной обработке // Там же. — 2001. — № 2. — С. 13–16.
4. Кныш В. В., Кузьменко А. З., Соловей С. А. Влияние предварительного циклического нагружения на эффективность упрочнения сварных соединений высокочастотной проковкой // Там же. — 2011. — № 10. — С. 44–48.
5. Кныш В. В., Кузьменко А. З., Соловей С. А. Накопление усталостных повреждений в тавровых сварных соединениях стали 09Г2С в исходном и упрочненном высокочастотной механической проковкой состояниях // Там же. — 2008. — № 10. — С. 12–18.
6. Кныш В. В., Кузьменко О. З., Соловей С. О. Накопленная в томных пошкоджень в таврових зварних з'єднаннях в початковому і зміцненому високочастотним проковуванням станах при блоковому навантаженні // Машинознавство. — 2009. — № 9. — С. 27–31.

The paper gives the results of fatigue testing of tee welded joints of 09G2S steel strengthened by the technology of high-frequency mechanical peening after accumulation of 50 % of fatigue damage, at application of multistep and block loading with differing parameters before and after strengthening. It is established that application of this technology allows increasing the levels of stresses initially applied to such joints and improving their residual fatigue life.

Поступила в редакцию 20.03.2012