

ПОВЫШЕНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С НАКОПЛЕННЫМИ УСТАЛОСТНЫМИ ПОВРЕЖДЕНИЯМИ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ПРОКОВКОЙ

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

Приведены результаты исследований эффективности применения высокочастотной механической проковки (ВМП) с многоступенчатым и блочным нагружениями для продления остаточной долговечности сварных соединений низколегированных сталей с 50%-м уровнем накопленных усталостных повреждений. Установлено, что применение технологии ВМП позволяет в 9...12 раз повысить циклическую долговечность таких соединений.

Ключевые слова: сварные конструкции, накопление усталостных повреждений, высокочастотная механическая проковка, циклическая долговечность, эффективность

Увеличение активности хозяйственной деятельности вызывает необходимость продления срока службы различных инженерных конструкций. Важная роль отводится организации действенных мер по восстановлению несущей способности сварных металлоконструкций. При ремонтно-восстановительных работах большое внимание необходимо уделять повышению характеристик сопротивления усталости сварных узлов и элементов. Наиболее эффективного продления долговечности сварных соединений с накопленными усталостными повреждениями можно достичь обработкой зон швов сварных соединений высокочастотной механической проковкой (ВМП). В работах [1–3] представлены данные экспериментальных исследований повышения характеристик сопротивления усталости технологией ВМП натурных трубчатых узлов и образцов сварных соединений после накопления заданного уровня усталостного повреждения вплоть до образования поверхностной трещины. Исследования в данном направлении в основном проводили при регулярном нагружении. Инженерные конструкции в процессе эксплуатации подвергаются сложным режимам нагружения, когда последовательность значений амплитуд и средних напряжений цикла изменяется случайно, поэтому в лабораторных условиях важно оценить остаточную долговечность соединений при нерегулярном нагружении [4].

Цель настоящей работы — установить эффективность применения технологии ВМП для повышения циклической долговечности сварных соединений с 50 % накопленными усталостными повреждениями при действии многоступенчатых

и блочных нагружений с идентичными параметрами до и после упрочнения.

Экспериментальные исследования проводили на образцах сварных соединений стали 09Г2С ($\sigma_T = 370$ МПа, $\sigma_B = 540$ МПа), представляющих собой пластину с приваренными к ней с двух сторон поперечными ребрами. Заготовки под образцы вырезали из листового проката так, чтобы длинная сторона была ориентирована вдоль проката. Поперечные ребра приваривали угловыми швами с двух сторон ручной электродуговой сваркой электродами марки УОНИ-13/55. Форма и геометрические размеры образца приведены на рис. 1. Толщина образца согласуется с 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 подвергалась узкая зона перехода металла шва к основному металлу. Усталостные испытания образцов проводили на испытательной машине УРС 20 при одноосном переменном растяжении с асимметрией цикла $R_\sigma = 0$. Все образцы испытывали до полного разрушения.

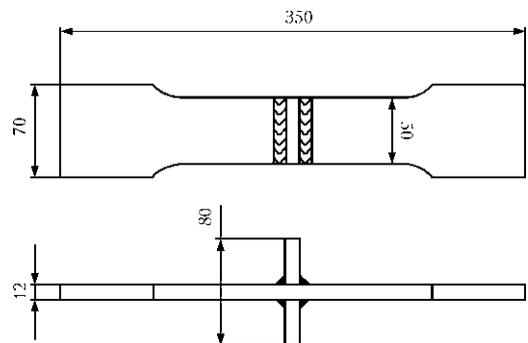


Рис. 1. Схема образца сварного соединения стали 09Г2С

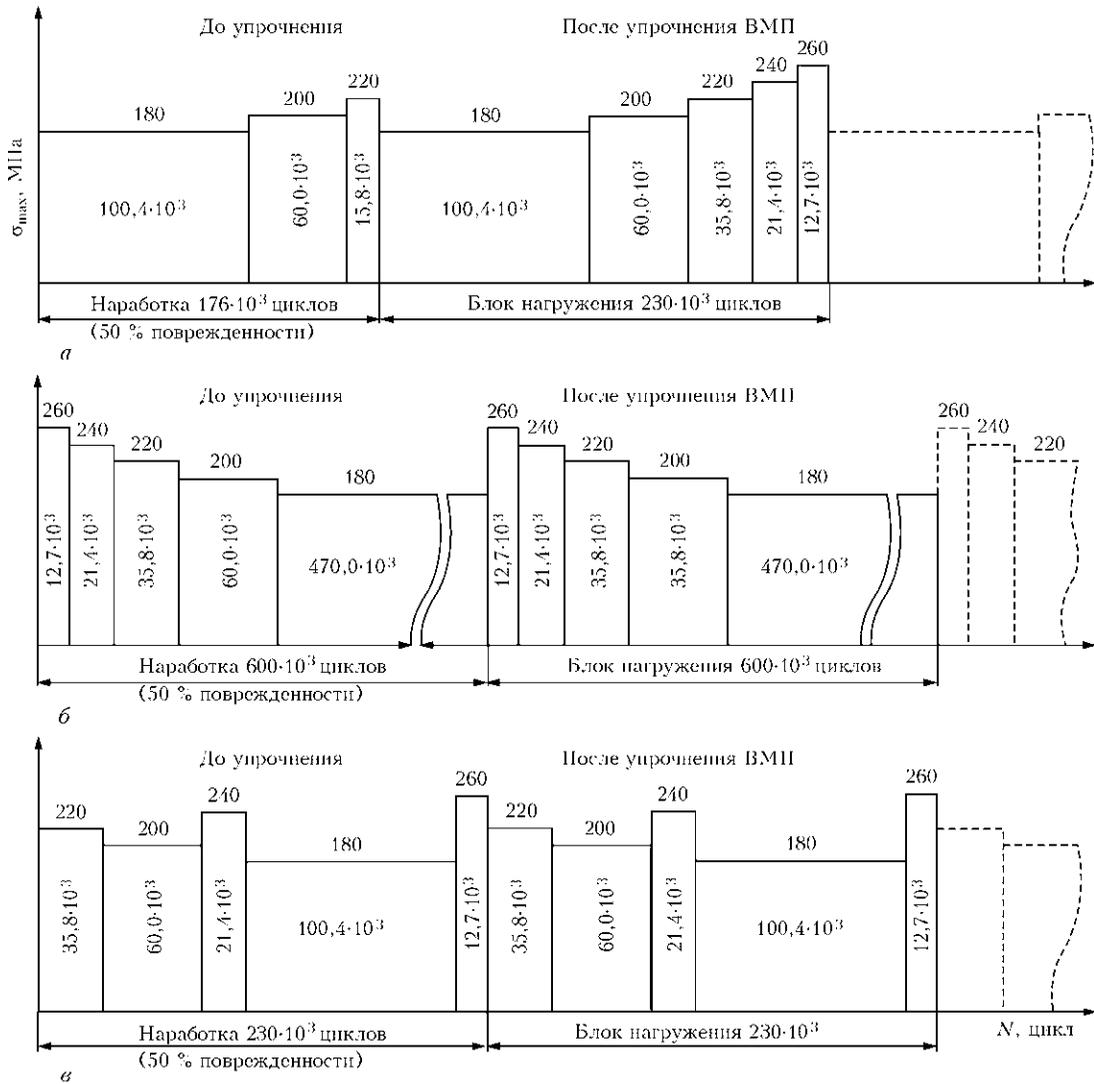


Рис. 2. Схема многоступенчатого нагружения образцов сварного соединения стали 09Г2С с возрастающей (а), убывающей (б) и квазислучайной (в) последовательностями приложения нагрузок в каждом блоке

Испытания на усталость сварных соединений стали 09Г2С, упрочненных при накоплении 50 % доли поврежденности, проводили на 18 образцах, по 9 образцов соответственно в условиях многоступенчатого и блочного нагружений с возрастающим, убывающим и квазислучайным порядком приложения нагрузок. Таким образом, для каждого порядка приложения нагрузок испытывали по три образца в условиях многоступенчатого и блочного нагружений.

При многоступенчатом и блочном нагружении порядок приложения нагрузок задавали одними и теми же пятью уровнями (ступенями) прикладываемых максимальных напряжений цикла, но с различной наработкой доли поврежденности (количество циклов перемен напряжений) на каждом уровне (рис. 2, 3).

Так, возрастающий порядок приложения нагрузок в блоке задавали максимальными напряжениями цикла, равными 180 МПа на первой ступени нагружения, с последующим увеличением до 260 МПа (пятая ступень нагружения) с шагом

20 МПа. Убывающий порядок приложения нагрузок в блоке задавали начальным уровнем максимальных напряжений цикла 260 МПа с последующим уменьшением до 180 МПа также с шагом 20 МПа. Квазислучайный порядок приложения нагрузок задавали следующими пятью последовательными уровнями максимальных напряжений цикла в блоке: 220, 200, 240, 180, 260 МПа.

Упрочнение технологией ВМП сварных соединений проводили при наработке соединениями 50 % своей долговечности. Количество циклов перемен напряжений до упрочнения на каждой ступени нагружения в условиях многоступенчатого и блочного нагружений задавали, исходя из установленных ранее в работах [5, 6] критериев разрушения таких образцов сварных соединений стали 09Г2С в неупрочненном состоянии при аналогичных нагружениях. Так, при многоступенчатом переменном нагружении для всех порядков приложения нагрузок суммарную поврежденность соединений, равную 50 %, задавали путем уменьшения в 2 раза приведенных в работе [5]

значений количества циклов наработки на каждой ступени нагружения. При блочном нагружении для всех порядков приложения нагрузок в блоке 50 %-ю поврежденность задавали путем уменьшения в 2 раза количества блоков нагружения до разрушения сварных образцов, полученных ранее [6], оставляя неизменным количество циклов в блоке. После упрочнения соединений нагрузки при многоступенчатом и блочном нагружении оставались такими же, как и до упрочнения, за исключением многоступенчатого нагружения с возрастающим порядком приложения нагрузок. При данном типе нагружения разрушение образцов сварного соединения в неупрочненном состоянии происходило уже на второй или третьей ступени нагружения [5]. Так как упрочнение сварного соединения технологией ВМП значительно повышает характеристики сопротивления усталости, то после упрочнения к образцу прикладывали все пять ступеней нагружения (рис. 2, а).

Критерием завершения испытаний в условиях многоступенчатого и блочного нагружений служило полное разрушение образцов. Если в условиях многоступенчатого нагружения упрочненный при накоплении 50%-й поврежденности свар-

ной образец не разрушался после заданных пяти ступеней нагружения (за один блок нагружения), то данный блок нагружения повторяли. Таким образом, после упрочнения сварные образцы вместо многоступенчатого нагружения фактически доводились до полного разрушения в условиях блочного нагружения. При этом длина блока (количество циклов перемен напряжений в одном блоке) упрочненных ВМП соединений была равна сумме циклов, отвечающих 50 %-й поврежденности сварных соединений в исходном после сварки состоянии (см. рис. 2). Исключением являлось многоступенчатое нагружение с возрастающим порядком приложения нагрузок, в котором после упрочнения длину блока увеличивали с 176 до 230 тыс. циклов перемен напряжений (см. рис. 2, а).

При многоступенчатом нагружении сварных соединений после накопления 50 %-й поврежденности и последующего упрочнения все три серии образцов подвергли девяти блокам нагружения в упрочненном состоянии. При этом образцы сварного соединения, которые испытывали при убывающей последовательности приложения нагрузок, после девяти блоков нагружения наработали примерно $5,5 \cdot 10^6$ циклов перемен напряжений.

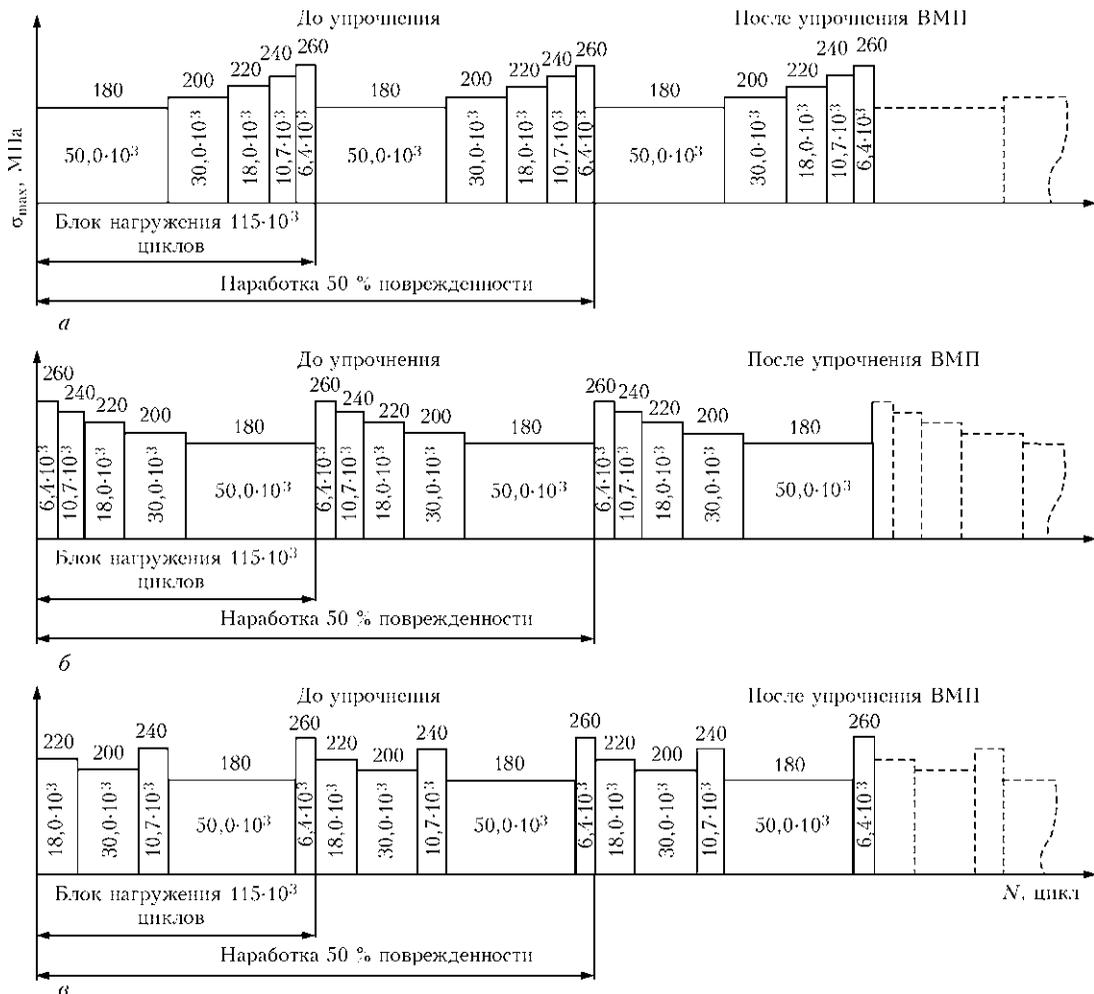


Рис. 3. Схема блочного нагружения образцов сварного соединения стали 09Г2С с возрастающей (а), убывающей (б) и квазислучайной (в) последовательностями приложения нагрузок в каждом блоке



Усталостных трещин ни в одном из сварных образцов выявлено не было. Поскольку упрочнение технологией ВМП гарантированно продлило остаточную долговечность соединений в 9 раз, дальнейшие испытания образцов до разрушения было принято проводить при более высоких уровнях максимальных напряжений цикла (310 МПа) в условиях регулярного нагружения. Долговечность образцов, которые испытывали ранее при многоступенчатом нагружении с возрастающей последовательностью приложения нагрузок, при регулярном нагружении составила 97,8...301,2 тыс. циклов, с убывающей последовательностью 109,8...276,4 тыс. циклов и с квазислучайной 156,1...377,8 тыс. циклов перемен напряжений. Таким образом, циклическая долговечность всех трех серий образцов при повышенном максимальном напряжении цикла 310 МПа находилась в диапазоне 97,8...377,8 тыс. циклов перемен напряжений, что составило 21...83 % долговечности сварных соединений, упрочненных технологией ВМП в исходном после сварки состоянии. При этом различие примерно в $3,5 \cdot 10^6$ циклов перемен напряжений в количестве циклов наработки на уровне максимальных напряжений цикла 180 МПа в условиях многоступенчатого нагружения в этих трех сериях образцов не оказало влияния на разброс циклической долговечности при повышенном регулярном нагружении. Таким образом, после обработки технологией ВМП сварного соединения даже с 50%-й поврежденностью, уровни максимальных напряжений цикла (180 МПа), которые значительно ниже предела выносливости упрочненного соединения (260 МПа), повреждающего эффекта не оказывают. Это же подтверждается экспериментальными данными, полученными в работе [2].

При блочном нагружении, после двух блоков нагружения в неупрочненном состоянии (накопление 50%-й доли поврежденности) и последующего упрочнения все три серии образцов подвергли 25 блокам нагружения в упрочненном состоянии. При этом ни в одном из сварных образцов усталостных трещин выявлено не было. Учитывая, что упрочнение ВМП сварных соединений с накопленной 50 %-й поврежденностью гарантированно продлевает их остаточную долговечность более чем в 12 раз при неизменных параметрах блочного нагружения, дальнейшие ус-

талостные испытания до разрушения образцов было принято проводить при повышенном до 310 МПа уровне максимальных напряжений цикла в условиях регулярного нагружения. Разброс значений долговечностей для испытанных при повышенной нагрузке девяти образцов находился в диапазоне 115...284 тыс. циклов, что составило 25...62 % долговечности сварных соединений, упрочненных технологией ВМП в исходном после сварки состоянии.

Выводы

1. Установлено, что упрочнение технологией ВМП сварных соединений после накопления 50%-й поврежденности позволяет гарантированно (без образования трещин) продлить их остаточную долговечность в 9...12 раз при условии действия неизменных многоступенчатых и блочных нагружений до и после упрочнения. При этом долговечность испытанных образцов сварных соединений составила от $2 \cdot 10^6$ до $5 \cdot 10^6$ циклов перемен напряжений.

2. После обработки ВМП сварных соединений с 50%-й долей накопленных усталостных повреждений уровни прикладываемых максимальных напряжений цикла в блоке нагружения, которые значительно ниже предела выносливости упрочненного сварного соединения, повреждающего эффекта не оказывают.

1. Кныш В. В., Кузьменко А. З., Войтенко О. В. Повышение сопротивления усталости сварных соединений высокочастотной механической проковкой // Автомат. сварка. — 2006. — № 1. — С. 43–47.
2. Гарф Э. Ф., Литвиненко А. Е., Смирнов А. Х. Оценка долговечности трубчатых узлов, подвергнутых ультразвуковой ударной обработке // Там же. — 2001. — № 2. — С. 13–16.
3. Кныш В. В., Кузьменко А. З., Соловей С. А. Повышение циклической долговечности сварных тавровых соединений с поверхностными трещинами // Там же. — 2009. — № 1. — С. 38–43.
4. Троценко В. Т., Сосновский Л. А. Сопротивление усталости металлов и сплавов: Справ. Ч. 1. — Киев: Наук. думка, 1987. — 521 с.
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 // Автомат. сварка. — 2008. — № 10. — С. 12–18.
6. Кныш В. В., Кузьменко О. З., Соловей С. О. Накоплення втомних пошкоджень у таврових зварних з'єднаннях у початковому і зміцненому високочастотним проковуванням станом при блоковому навантаженні // Машинознавство. — 2009. — № 9. — С. 27–31.

The paper gives the results of investigation of the effectiveness of application high-frequency mechanical peening (HFMP) with multistep and block loading to improve residual fatigue life of tee welded joints of low-alloyed steels with 50 % level of accumulated fatigue damages. It is established that application of HFMP technology allows 9...12 times improvement of cyclic fatigue life of such joints.

Поступила в редакцию 14.04.2010