



ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ УПРОЧНЕНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ 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 для повышения остаточной долговечности тавровых сварных соединений низколегированных сталей с накопленными усталостными повреждениями. Показано, что в зависимости от длительности наработки и уровня приложенных напряжений в процессе эксплуатации эффективность упрочнения этой технологией сварных соединений может изменяться в широком диапазоне.

Ключевые слова: сварные соединения, усталость, усталостные повреждения, высокочастотная механическая проковка, циклическая долговечность, эффективность упрочнения

Сопrotивление усталости сварных соединений значительно повышается путем применения различных послесварочных обработок, известных как методы поверхностного пластического деформирования металла. Систематические исследования, проводимые в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, позволяют сделать вывод о том, что высокочастотная механическая проковка (ВМП) обеспечивает наиболее высокие физико-механические показатели упрочненного слоя металла и на современном этапе развития ресурсосберегающих технологий является наиболее эффективным способом упрочнения сварных конструкций, работающих в условиях переменного нагружения. Эффективность применения данного способа обработки сварных соединений на стадии изготовления конструкций достаточно хорошо изучена, результаты исследований широко представлены в литературе. Ряд работ посвящен исследованию эффективности упрочнения сварных соединений эксплуатируемых металлоконструкций, т. е. при наработке соединениями заданной доли поврежденности [1–5]. Экспериментально установлено, что после обработки ВМП сварных соединений с накопленными усталостными повреждениями (вплоть до момента образования поверхностной усталостной трещины) уровни прикладываемых максимальных напряжений цикла в блоке нагружения, которые значительно ниже предела выносливости упрочненного сварного соединения, повреждающего эффекта не оказывают. В то же время полученные в этих работах данные по повышению циклической долговечности сварных соединений с нара-

боткой существенно различаются между собой, что свидетельствует о необходимости проведения дальнейших исследований в этом направлении.

Так, в работе [1] о влиянии предварительного циклического нагружения на эффективность упрочнения технологией ВМП обработку проводили после наработки сварными трубчатыми узлами 25...60 % долговечности в исходном состоянии. Долговечность узлов авторы работы предлагают определять линейным суммированием усталостных повреждений до и после упрочнения:

$$\sum \frac{n_i}{N_i} + \sum \frac{n_j}{N_j} \geq a,$$

где n_p , N_i — соответственно количество циклов наработки и число до разрушения при напряжении σ_i сварного соединения в исходном состоянии после сварки; n_j , N_j — соответственно количество циклов наработки и число до разрушения при напряжении σ_j сварного соединения в упрочненном технологией ВМП сразу после сварки состоянии; a — предельная накопленная усталостная поврежденность.

На основании экспериментальных данных авторами предлагается использовать в качестве предельного значения суммы относительных долговечностей единицу, т. е. эффективность повышения долговечности сварных соединений с накопленными усталостными повреждениями технологией ВМП снижается с увеличением количества циклов наработки до упрочнения, а максимальное повышение долговечности достигается при упрочнении сразу после сварки.

В работе [2] исследована эффективность применения технологии ВМП к тавровым сварным соединениям стали Ст3 после наработки ими 50 % долговечности в исходном состоянии при нагрузках $0,7...0,9\sigma_r$. Полученные кривые усталости демонстрируют повышение долговечности таких

образцов более чем в 2 раза по сравнению с образцами, упрочненными технологией ВМП в исходном состоянии. Такое повышение долговечности у образцов, предварительно испытанных в исходном состоянии до наработки 50 % их долговечности, авторы объясняют тем, что высокие уровни прикладываемых напряжений приводят к образованию в зонах концентраторов пластических деформаций, а следовательно, к наведению остаточных напряжений сжатия. Последующая обработка ВМП дополнительно увеличивает остаточные напряжения сжатия в зонах концентраторов. Если использовать приведенную выше формулу применительно к результатам, полученным в данной работе, то предельная суммарная поврежденность a находилась бы в диапазоне 2,5...3,1.

В работе [5] обработку технологией ВМП сварных трубчатых узлов из стали 20 проводили как в исходном состоянии, так и после предварительного статического нагружения при высоких уровнях напряжений. Из приведенных кривых усталости следует, что упрочнение после предварительного статического нагружения более эффективно (долговечность увеличивается примерно в 4 раза) по сравнению с упрочнением сварных соединений в исходном после сварки состоянии. Такое повышение авторы данной работы, как и авторы работы [2], объясняют более высоким уровнем наведенных остаточных напряжений сжатия в зоне обработки.

Основываясь на результатах работ [1, 2], при прогнозировании эффективности упрочнения технологией ВМП сварных соединений с предварительной наработкой на основе линейного суммирования усталостных повреждений, по-видимому, необходимо учитывать уровни приложенных переменных напряжений до и после обработки.

Цель настоящей работы — установить влияние предварительного циклического нагружения на эффективность упрочнения тавровых сварных соединений высокочастотной проковкой.

Экспериментальные исследования проводили на образцах тавровых соединений низколегированных сталей 09Г2С ($\sigma_T = 370$ МПа, $\sigma_B = 540$ МПа) и 10ХСНД ($\sigma_T = 450$ МПа, $\sigma_B = 570$ МПа). Заготовки под образцы из этих сталей 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 (рис. 1). Толщина экспериментального образца обусловлена широкой применимостью в сварных конструкциях проката толщиной 12 мм, а ширину его рабочей части выбирали исходя из мощности испытательного оборудования. При упрочнении соединений технологией ВМП поверхностному

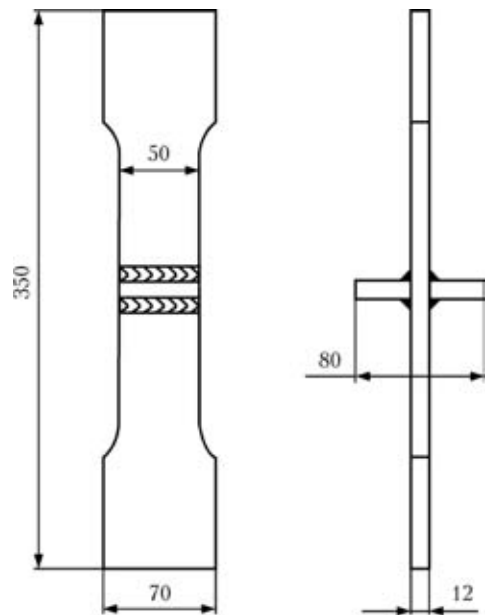


Рис. 1. Схема экспериментального образца таврового соединения стали 09Г2С

пластическому деформированию подвергали узкую зону перехода металла шва к основному металлу. Испытания на усталость образцов проводили на машине УРС 20 при одноосном переменном растяжении с асимметрией цикла $R_\sigma = 0$. Все образцы испытывали до полного разрушения или наработки ими $2 \cdot 10^6$ циклов переменных напряжений. Расчет долей поврежденности сварных соединений сталей 09Г2С и 10ХСНД в исходном и упрочненном состоянии осуществляли по кривым усталости, полученным ранее и приведенным в работах [6, 7].

Двенадцать сварных образцов из стали 09Г2С испытывали в неупрочненном состоянии при максимальных напряжениях цикла 180 и 260 МПа до наработки 50 % долговечности от полного разрушения. После этого все образцы упрочняли технологией ВМП и испытания на усталость продолжали при более высоких уровнях максимальных напряжений цикла.

Первоначально приложенные к сварным образцам максимальные напряжения, равные 180 МПа, повышали до уровней 260, 278 и 296 МПа (по два образца на каждом уровне напряжений). В шести образцах, которые испытывали в исходном состоянии при заданных начальных максимальных напряжениях цикла 260 МПа, после обработки ВМП приложенные напряжения повышали до уровней 275, 290 и 305 МПа (по два образца на каждом уровне напряжений). Выбор уровней максимальных напряжений цикла до и после упрочнения осуществляли так, чтобы охватывался весь диапазон прикладываемых нагрузок, характерных для области многоциклового усталости упрочненных и неупрочненных тавровых сварных соединений.



Шесть образцов из стали 10ХСНД в неупрочненном состоянии испытывали при регулярном нагружении с максимальными напряжениями цикла 280, 290 и 300 МПа (по два образца на каждом уровне напряжений) до наработки 50 % поврежденности. После упрочнения технологией ВМП сварных образцов из стали 10ХСНД при продолжении испытаний на усталость прикладываемые нагрузки оставались неизменными.

Результаты испытаний на усталость сварных образцов сталей 09Г2С и 10ХСНД приведены в таблице.

Предельные значения суммы относительных долговечностей, полученные на шести образцах тавровых сварных соединений стали 09Г2С, упрочненных технологией ВМП после наработки 50 % долговечности при максимальных напряжениях 180 МПа, находятся в диапазоне 0,77...1,21. При этом один образец не разрушился после наработки $2 \cdot 10^6$ циклов перемен напряжений в упрочненном состоянии (его суммарная поврежденность составила более 1,80). Предельные значения суммарной поврежденности, полученные на шести образцах из стали 09Г2С, упрочненных технологией ВМП после наработки 50 % долговеч-

ности при максимальных напряжениях 260 МПа, находятся в диапазоне 1,51...2,13. Испытания одного из шести образцов были остановлены после наработки $2 \cdot 10^6$ циклов перемен напряжений в упрочненном состоянии (суммарная поврежденность более 2,37). Суммарная поврежденность тавровых сварных соединений стали 10ХСНД, испытанных при неизменном регулярном нагружении до и после упрочнения, находится в диапазоне 2,37...2,87. Три образца из стали 10ХСНД не разрушились после наработки $2 \cdot 10^6$ циклов перемен напряжений в упрочненном состоянии.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что в условиях регулярного нагружения предельные значения суммы относительных долговечностей тавровых сварных соединений низколегированных сталей, упрочненных технологией ВМП при накоплении 50% поврежденности в неупрочненном состоянии, зависят от уровней приложенных переменных напряжений к сварным соединениям до их упрочнения. Это связано с тем, что высокие уровни прикладываемых напряжений к сварным соединениям до упрочнения могут приводить к частичной или полной релаксации остаточных сварочных напряжений растяжения по

Результаты испытаний на усталость образцов тавровых сварных соединений сталей 09Г2С и 10ХСНД, упрочненных технологией ВМП после наработки 50 % долговечности в исходном состоянии

Номер образца	Исходное состояние			Упрочненное состояние			$\sum \frac{n_i}{N_i}, \%$
	$\sigma_{1max}, \text{МПа}$	$n_1, \text{тыс. циклов}$	$n_1/N_1, \%$	$\sigma_{2max}, \text{МПа}$	$n_2, \text{тыс. циклов}$	$n_2/N_2, \%$	
Сталь 09Г2С							
1	180	500,0	50,0	260	798,8	51,6	101,6
2	180	500,0		260	>2000,0*	>130,0	>180,0
3	180	500,0		278	707,0	70,7	120,7
4	180	500,0		278	357,5	35,8	85,8
5	180	500,0		296	174,7	27,2	77,2
6	180	500,0		296	185,3	28,9	78,9
7	260	64,0		275	>2000,0*	>186,5	>236,5
8	260	64,0		275	1315,6	122,7	172,7
9	260	64,0		290	751,1	101,1	151,1
10	260	64,0		290	1011,0	136,1	186,1
11	260	64,0		305	839,5	163,2	213,2
12	260	64,0		305	580,8	112,9	162,9
Сталь 10ХСНД							
1	280	79,7	50,0	280	>2000,0*	>172,8	>222,8
2	280	79,7		280	>2000,0*	>172,8	>222,8
3	290	67,8		290	1820,3	215,5	265,5
4	290	67,8		290	>2000,0*	>236,9	286,9
5	300	57,7		300	1153,5**	187,3	237,3
6	300	57,7		300	1314,8	213,4	263,4

* — образец не разрушился; ** — разрушение по основному металлу.

всему сечению образца, а в некоторых случаях — вызывать наведение остаточных напряжений сжатия в зонах концентраторов напряжений. Для приближенного определения максимальных напряжений цикла σ_{\max} , при которых достигается полная релаксация остаточных напряжений растяжения, можно исходить из неравенства $\sigma_{\max} > \sigma_r / \alpha_\sigma$, где α_σ — коэффициент концентрации напряжений. Как видно из таблицы, такая релаксация остаточных сварочных напряжений перед выполнением ВМП сварных соединений с накопленными 50 % повреждениями повышает их остаточную долговечность примерно в 1,1...2,4 раза по сравнению с долговечностью соединений, упрочненных в исходном состоянии.

Обобщая полученные результаты испытаний на усталость и результаты работ [1, 5, 6], можно предположить, что длительность наработки при высоких уровнях приложенного внешнего нагружения до упрочнения также оказывает существенное влияние на эффективность упрочнения ВМП. Дополнительно были испытаны шесть образцов таврового сварного соединения из стали 09Г2С по следующей методике. Сварные соединения испытывали в неупрочненном состоянии при максимальных напряжениях цикла 260 МПа до наработки 10, 30 и 70 % долговечности от полного разрушения, по два образца для каждого уровня наработки, а затем упрочняли технологией ВМП. После упрочнения образцов испытания на усталость продолжали при уровне максимальных напряжений цикла 305 МПа.

Разрушение первого образца с предварительной наработкой 10 % долговечности произошло после 1871300 циклов перемен напряжений по основному металлу, т. е. долговечность сварного соединения повысилась более чем в 3,5 раза по сравнению с упрочнением в исходном после сварки состоянии. Второй образец разрушился (рис. 2) по зоне перехода металла шва на передающее нагрузку ребро жесткости после 1614600 циклов перемен напряжений. Как видно из рис. 2, инициирование усталостной трещины и последующее разрушение сварного образца произошло из-за неполного проплавления одного из приваренных угловыми швами ребер жесткости.

После предварительной наработки третьим и четвертым образцами 30 % долговечности до упрочнения при заданных максимальных напряжениях цикла 260 МПа их разрушение произошло при 1168500 и 1407200 циклов перемен напряжений, т. е. долговечность соединений повысилась в 2...3 раза по сравнению с упрочнением в исходном после сварки состоянии.

Предварительная наработка 70 % долговечности при заданных максимальных напряжениях цикла не привела к заметному повышению долговечности. Разрушение пятого и шестого образца произошло при наработке соответственно 452900 и 628400 циклов перемен напряжений в упрочненном состоянии, т. е. остаточная долговечность соединений с такой наработкой после упрочнения ВМП остается на уровне долговечности соединений, упрочненных в исходном после сварки состоянии.

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что в условиях регулярного нагружения эффективность упрочнения технологией ВМП сварных соединений с накопленными усталостными повреждениями повышается с увеличением уровня приложенных переменных напряжений до упрочнения и с уменьшением длительности наработки в исходном состоянии. Последнее может быть объяснено следующим. Высокие уровни приложенных напряжений приводят к релаксации остаточных сварочных напряжений в зонах концентраторов уже после первых циклов нагружения без существенного накопления усталостных повреждений. Последующие циклы нагружения (увеличение длительности наработки) приводят лишь к интенсивному накоплению усталостных повреждений. Поэтому для повышения эффективности ВМП целесообразно стремиться к уменьшению длительности воздействия высоких уровней нагружения до упрочнения. Следовательно, максимальных характеристик сопротивления усталости сварных соединений можно достичь при упрочнении ВМП после предварительной статической перегрузки. Подтверждением этого служат данные работы [5], где установлено, что после предварительного статического нагружения, вызывающего в зонах концентраторов напряжения, близкие к пределу текучести, долговечность упрочненных ВМП сварных трубчатых уз-

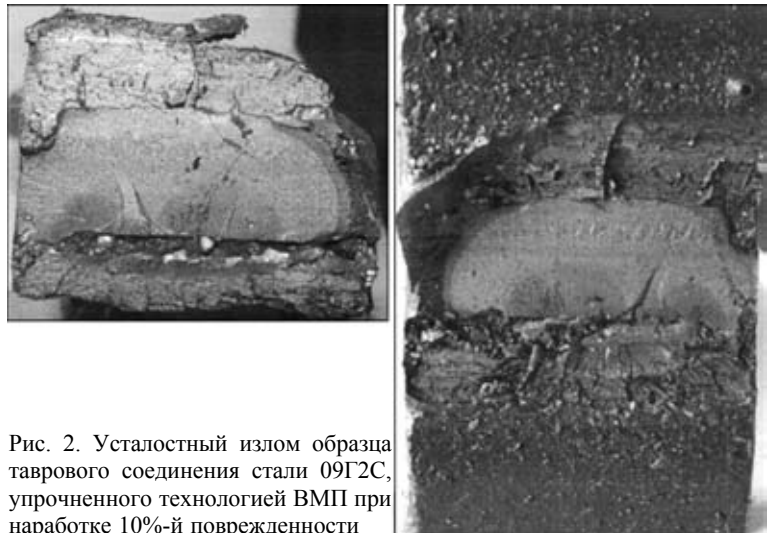


Рис. 2. Усталостный излом образца таврового соединения стали 09Г2С, упрочненного технологией ВМП при наработке 10%-й поврежденности



лов из стали 20 увеличивается в 4 раза по сравнению с упрочнением в состоянии после сварки.

Таким образом, в зависимости от длительности наработки и уровня релаксации остаточных сварочных напряжений в зоне концентратора в процессе эксплуатации эффективность упрочнения технологией ВМП сварных соединений может изменяться в широком диапазоне (предельные значения суммы относительных долговечностей $a = 0,77...4,0$). Для приближенной оценки эффективности упрочнения технологией ВМП сварных соединений, которые в процессе эксплуатации до упрочнения не подвергались высоким уровням нагружения, в качестве предельного значения суммы относительных долговечностей можно принимать единицу.

Выводы

1. Установлено, что в условиях регулярного нагружения эффективность упрочнения технологией ВМП сварных соединений с накопленными усталостными повреждениями зависит от уровня и длительности воздействия приложенного нагружения.

2. Показано, что остаточная долговечность высоконагруженных тавровых сварных соединений низколегированных сталей после упрочнения ВМП при 70 % накопленной поврежденности не уступает долговечности соединений, упрочнен-

ных в состоянии после сварки. Уменьшение длительности наработки таких соединений с 70 до 10 % их долговечности повышает эффективность упрочнения соединений до 3,5 раза по сравнению с упрочнением в исходном состоянии.

1. Гарф Э.Ф., Литвиненко А. Е., Смирнов А. Х. Оценка долговечности трубчатых узлов, подвергнутых ультразвуковой ударной обработке // Автомат. сварка. — 2001. — № 2. — С. 13–16.
2. Кныш В. В., Кузьменко А. З., Войтенко О. В. Повышение сопротивления усталости сварных соединений высокочастотной механической проковкой // Там же. — 2006. — № 1. — С. 43–47.
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. Кныш В. В., Кузьменко А. З., Соловей С. А. Повышение циклической долговечности сварных соединений с накопленными усталостными повреждениями высокочастотной проковкой // Там же. — 2010. — № 10. — С. 41–44.
5. Xiaohui Z., Dongpo W., Lixing H. Analysis of the S–N curves of welded joints enhanced by ultrasonic peening treatment // Materials & Design. — 2011. — 32, № 1. — P. 88–96.
6. 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.
7. Сопротивление коррозионной усталости сварных соединений, упрочненных высокочастотной механической проковкой / В. В. Кныш, И. И. Вальтерис, А. З. Кузьменко, С. А. Соловей // Там же. — 2008. — № 4. — С. 5–8.

The paper gives the results of studying the effectiveness of application of high-frequency mechanical peening to improve the residual fatigue life of tee welded joints on low-alloyed steels with accumulated fatigue damage. It is shown that the effectiveness of strengthening welded joints by this technology can vary in a broad range depending on the operation duration and level of applied stresses during operation.

Поступила в редакцию 21.06.2011

СТЫКОВАЯ СВАРКА ДАВЛЕНИЕМ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ.

— Киев: ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, 2011. — 132 с. Мягкий переплет, 200×290 мм.

Сборник включает 24 статьи, опубликованные в журнале «Автоматическая сварка» за период 2005–2010 гг., по проблемам контактной стыковой сварки оплавлением и другим способам сварки давлением. Разделы сборника посвящены разработке технологии и оборудования для контактной сварки рельсов, стальных труб, арматуры и проката из высокопрочного алюминия. Рассматриваются также технологии прессовой сварки магнитоуправляемой дугой и сварки трением. Авторами статей являются известные в Украине и за рубежом ученые и специалисты в области сварки давлением.

Сборник предназначен для научных сотрудников, инженеров, технологов, конструкторов и аспирантов, занимающихся проблемами сварки давлением сталей, алюминиевых и титановых сплавов, интерметаллидов и других материалов.

Заказы на книгу просьба направлять
в редакцию журнала «Автоматическая сварка»:
тел./факс: (38044) 200-82-77, 200-54-84, E-mail: journal@paton.kiev.ua.

