



## ПОВЫШЕНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СВАРНЫХ ТАВРОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ С ПОВЕРХНОСТНЫМИ ТРЕЩИНАМИ

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

Приведены результаты исследований эффективности применения высокочастотной механической проковки для повышения сопротивления усталости тавровых сварных соединений низколегированных сталей с поверхностными усталостными трещинами. Рассмотрены два подхода к упрочнению тавровых соединений, поврежденных усталостными трещинами.

*Ключевые слова:* сварные конструкции, конструкционные стали, тавровые сварные соединения, циклическая долговечность, высокочастотная механическая проковка, усталостная трещина, упрочняющая технология

На этапе проектирования сварных изделий или конструкций, работающих в условиях переменного нагружения, предусматривается отсутствие в них усталостных повреждений в течение ресурсного срока эксплуатации. Однако практика показала, что в сварных конструкциях различного назначения, отвечающих требованиям норм на их проектирование и изготовление, усталостные трещины начинают появляться даже на ранней стадии работы сооружений или машин [1]. Являясь наиболее опасным видом дефектов, усталостные трещины существенно снижают циклическую долговечность поврежденных элементов и конструкции в целом. Замена поврежденных конструкций новыми требует значительных материальных затрат и времени, поэтому все чаще поврежденные элементы крупногабаритных конструкций вместо замены подвергаются различным ремонтно-восстановительным работам. К широко распространенным видам таких ремонтных работ можно отнести следующие: засверливание отверстий в вершинах трещин с последующей установкой с затяжкой высокопрочных болтов, ремонтную сварку с последующим упрочнением, перераспределение послесварочных напряжений и рабочих нагрузок, наведение вблизи вершин трещин благоприятных остаточных напряжений сжатия и пр. [2, 3]. В основном данные виды работ применяются в крупногабаритных сварных конструкциях, в которых наличие сквозных усталостных трещин длиной 20 мм и более не приводит к существенному снижению несущей способности. В то же время нельзя ограничиваться ремонтно-восстановительными работами только поврежденных частей, так как с большой вероят-

ностью трещины могут появиться в аналогичных узлах и элементах. Поэтому при ремонте сварных изделий и конструкций их наиболее нагруженные бездефектные сварные соединения или соединения, содержащие поверхностные усталостные трещины незначительной глубины, необходимо подвергать упрочнению. Известно, что высокочастотная механическая проковка (ВМП) бездефектных соединений с уровнем накопленных усталостных повреждений 50 % и более, значительно повышает их характеристики сопротивления усталости [4]. Упрочнение другими технологиями поверхностного пластического деформирования (ППД) сварных соединений, содержащих поверхностные полуэллиптические трещины незначительной глубины, вызывает повышение циклической долговечности до 10 раз в зависимости от вида упрочняющей обработки и глубины трещины. Так, в работе [5] отмечается, что обработка дробью образцов сплава Waspaloy с усталостными трещинами длиной 0,67 мм и менее увеличивает долговечность образца в 3 раза, а при обработке трещин длиной свыше 1 мм повышение долговечности не происходит. В работе [6] показано, что проковка пневмомолотом тавровых сварных соединений с усталостными трещинами способствует повышению циклической долговечности в 1...10 раз в зависимости от размеров трещины. Так, при проковке пневмомолотом трещины глубиной 1...1,5 мм циклическая долговечность повышается в 10 раз, при проковке трещины глубиной около 3 мм — в 1...2,5 раза, а при проковке трещины глубиной свыше 5 мм увеличение долговечности не происходит. Такое различие в результатах обусловлено различной глубиной зоны наведения остаточных напряжений сжатия при обработках дробью и пневмомолотом соответственно 0,33 и 2,5 мм. Повышение долговечности наблюдается и при применении упрочняющих обработок к образцам со сквозными усталостны-

ми трещинами, их эффективность существенно зависит от толщины металла [7, 8]. Так, в работе [7] результаты исследования циклической трещиностойкости, полученные на компактных образцах толщиной 12,5 мм с начальной трещиной 3 мм, указывают на незначительное увеличение долговечности образца: после применения обработки дробью — в 1,2, а проковкой однобойковым пневмомолотом — в 2 раза. При малых толщинах металла технологии ППД вызывают более существенное повышение циклической долговечности. Так, в работе [8] после обработки дробью компактных образцов толщиной 4,2 мм с начальной трещиной 4 мм отмечается увеличение их долговечности в 2...4 раза в зависимости от расположения зоны проковки относительно вершины трещины. Приведенные выше публикации демонстрируют повышенный интерес к ремонтно-восстановительным работам сварных соединений с поверхностными усталостными трещинами путем упрочнения технологиями ППД.

В литературе отсутствуют экспериментальные данные по повышению циклической долговечности сварных соединений с поверхностными усталостными трещинами технологией ВМП. В то же время в работе [9] отмечается, что после упрочнения технологией ВМП на поверхности основного металла наводятся остаточные напряжения сжатия на глубину до 1,7 мм. Применительно к сварным соединениям (вследствие взаимодействия с остаточными напряжениями растяжения) слой наведенных ВМП сжимающих напряжений уменьшается до глубины порядка 1 мм. Одновременно отмечается увеличение в 2...3 раза порогового коэффициента интенсивности напряжений при обработке ВМП сварных соединений в состоянии после сварки. Все это дает основания предполагать, что ВМП окажется эффективной технологией повышения сопротивления усталости сварных соединений с поверхностными трещинами незначительной глубины.

Цель настоящей работы — определить эффективность применения технологии ВМП для повышения сопротивления усталости тавровых сварных соединений низколегированных сталей с поверхностными усталостными трещинами и установить особенности упрочнения таких соединений.

Экспериментальные исследования проводили на образцах тавровых соединений стали 09Г2С ( $\sigma_T = 370$  МПа,  $\sigma_B = 540$  МПа) и 10ХСНД ( $\sigma_T = 457$  МПа,  $\sigma_B = 565$  МПа). Заготовки под образцы вырезали из листового проката таким образом, чтобы длинная сторона была ориентирована вдоль проката. Поперечные ребра приваривали угловыми швами с двух сторон ручной электродуговой сваркой с полным проваром электродами марки УОНИ-13/55. Форма и геометрические

размеры образца (рис. 1) 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 отнулевом переменном растяжении.

Первоначально устанавливали эффективность применения технологии ВМП для повышения циклической долговечности соединений в зависимости от глубины трещины. Сварной образец стали 10ХСНД испытывали при максимальных напряжениях цикла  $\sigma_{max} = 280$  МПа, а три образца из стали 09Г2С — при  $\sigma_{max} = 180$  МПа. После образования усталостной трещины заданной длины в одной из зон перехода шва на основной металл в образце таврового соединения испытания останавливали и выполняли упрочнение технологией ВМП всех четырех зон (рис. 2). После упрочнения испытания продолжали до полного разрушения образца или наработки им  $2 \cdot 10^6$  циклов перемен напряжений в упрочненном состоянии. Определение параметров несквозных поверхностных трещин проводили с помощью фрактурграфического и капиллярного методов контроля. Сочетание обоих методов позволяло определить параметры несквозной усталостной трещины в соединении до его упрочнения по излому образца. В качестве индикаторной жидкости использовали смесь керосина с синтетическим маслом. После упрочнения технологией ВМП введение индикаторной жидкости в полость трещины прекращалось. В первом образце усталостная трещина длиной 5 мм возникла при наработке образцом

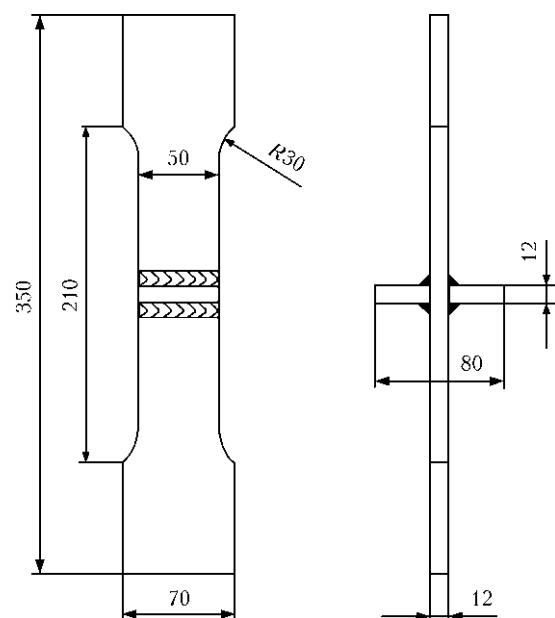


Рис. 1. Схема образца таврового сварного соединения с двумя поперечными ребрами

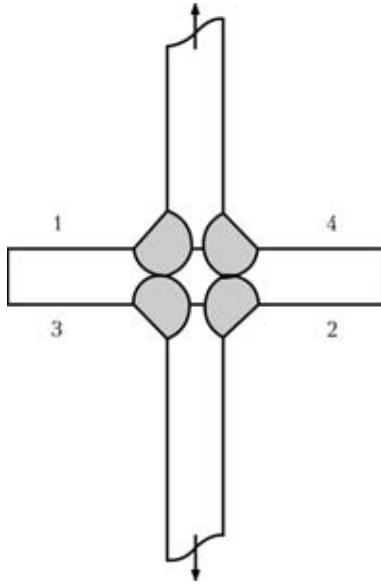


Рис. 2. Схема фрагмента таврового сварного соединения с нумерацией околошовных зон

232800 циклов перемен напряжений. После упрочнения всех четырех околошовных зон новые трещины не зарождались до наработки образцом  $2 \cdot 10^6$  циклов перемен напряжений в упрочненном состоянии. Во втором образце усталостная трещина длиной 10 мм возникла в одной из околошовных зон после наработки 344100 циклов перемен напряжений. После упрочнения ВМП усталостные трещины в других зонах сварного соединения не зарождались. В третьем образце тре-

щина длиной около 23 мм образовалась вблизи одного из угловых швов после наработки 428600 циклов перемен напряжений. После упрочнения ВМП разрушение образца произошло по поврежденному сварному шву после наработки 418200 циклов перемен напряжений в упрочненном состоянии. В сварном соединении из стали 10ХСНД (четвертый образец) усталостная трещина длиной 7 мм образовалась в зоне перехода шва на основной металл после 178400 циклов перемен напряжений. После упрочнения ВМП образование усталостных трещин в других зонах не наблюдалось до наработки  $2 \cdot 10^6$  циклов перемен напряжений. Для измерения глубины трещин в тех образцах, которые не разрушились до наработки ими  $2 \cdot 10^6$  циклов перемен напряжений в упрочненном состоянии, лом образцов проводили путем увеличения максимальных напряжений цикла до 320 МПа. На рис. 3 приведены изломы образцов тавровых соединений стали 09Г2С, упрочненные технологией ВМП после образования на поверхности образца трещин разной длины. Фрактографический анализ изломов показал, что соотношение между длиной усталостной трещины на поверхности образца и ее глубиной составляет 5:1. Исходя из полученных результатов в дальнейших исследованиях пластическому деформированию будем подвергать поверхностные усталостные трещины глубиной примерно 1 мм (длина трещины на поверхности 5 мм).

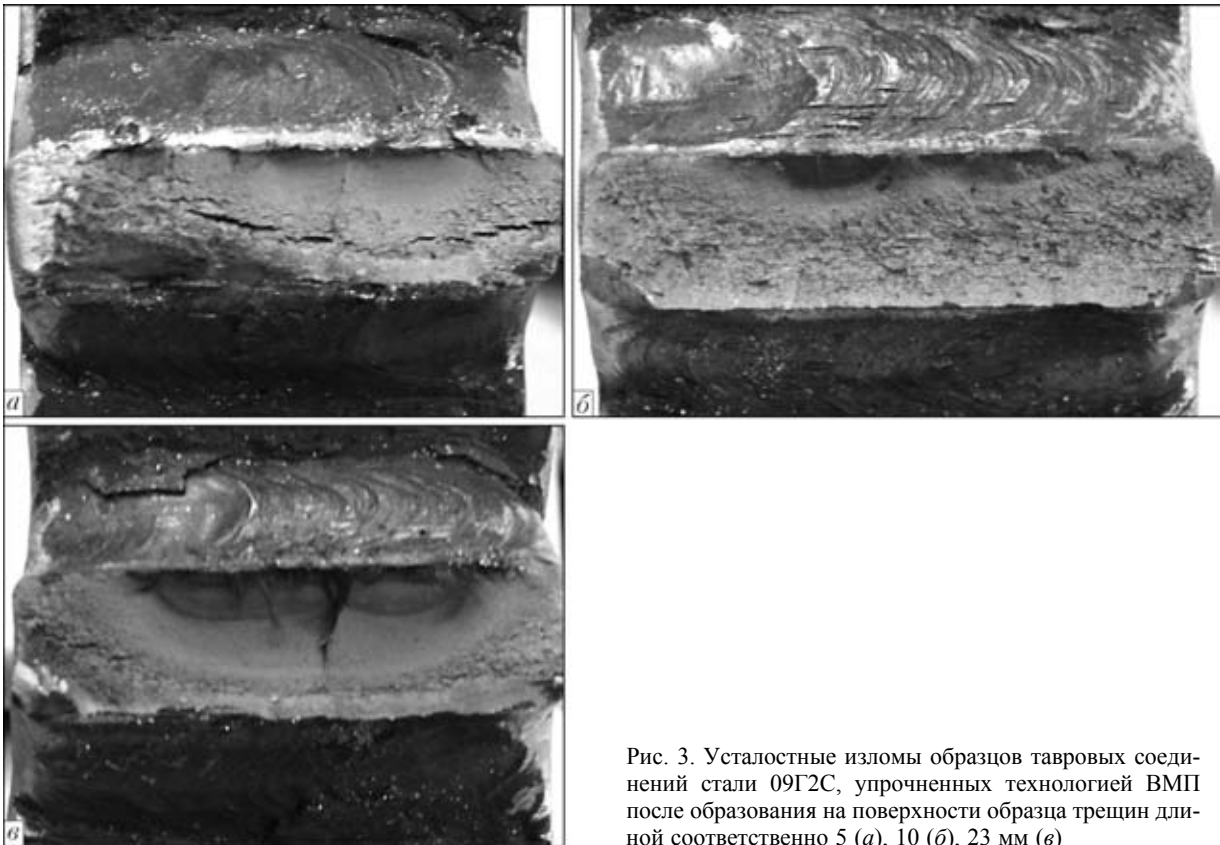


Рис. 3. Усталостные изломы образцов тавровых соединений стали 09Г2С, упрочненных технологией ВМП после образования на поверхности образца трещин длиной соответственно 5 (а), 10 (б), 23 мм (в)

Результаты усталостных испытаний образца таврового сварного соединения стали 09Г2С при блочном нагружении

№ образца	1-е нагружение			2-е нагружение			3-е нагружение		
	$\sigma_{1\max}$ , МПа	$n_1$ , тыс. цикл	$n_1/N_1$ , %	$\sigma_{2\max}$ , МПа	$n_2$ , тыс. цикл	$n_2/N_2$ , %	$\sigma_{3\max}$ , МПа	$n_3$ , тыс. цикл	$n_3/N_3$ , %
1	260	12,7	10,0	240	21,4	10,0	220	35,8	10,0
2	260	12,7	10,0	240	21,4	10,0	220	35,8 <sup>2</sup>	10,0
3	260	12,7	10,0	240	21,4	10,0	220	35,8	10,0
4	260	12,7	10,0	240	21,4	10,0	220	35,8	10,0
5	260	12,7	10,0	240	15,6 <sup>5</sup>	7,3	—	—	—

Окончание таблицы

№ образца	4-е нагружение			5-е нагружение			Особенности испытаний
	$\sigma_{4\max}$ , МПа	$n_4$ , тыс. цикл	$n_4/N_4$ , %	$\sigma_{5\max}$ , МПа	$n_5$ , тыс. цикл	$n_5/N_5$ , %	
1	200	60,0	10,0	180	500,0 <sup>1</sup>	50,0	<sup>1</sup> ВМП зоны 1 (рис. 2) после 118000 циклов
2	200	60,0	10,0	180	500,0	50,0	<sup>2</sup> ВМП зоны 2 (рис. 2) после 13100 циклов
3	200	60,0	10,0	180	500,0	50,0	—
4	200	60,0	10,0	180	500,0 <sup>4</sup>	50,0	<sup>4</sup> Трещина глубиной 1 мм в зоне 3 после 400000 циклов
5	—	—	—	—	—	—	<sup>5</sup> Разрушение образца

Примечание.  $n_i$  — количество циклов наработки неупрочненным образцом при  $i$ -м уровне напряжений;  $N_i$  — количество циклов до разрушения неупрочненного образца при  $i$ -м уровне напряжений.

Для исследования эффективности применения ВМП с целью повышения сопротивления усталости сварных конструкций, элементы которых содержат усталостные трещины глубиной около 1 мм, были проведены усталостные испытания двух тавровых сварных соединений из низколегированной стали по следующей методике. Один образец из стали 10ХСНД в исходном состоянии испытывали при одноосном переменном растяжении с постоянным максимальным напряжением цикла, второй из стали 09Г2С — при блочном нагружении (рис. 4). Образцы испытывали до появления трещины глубиной примерно 1 мм в одной из четырех зон перехода металла углового шва на основной металл (см. рис. 2). После этого зону, поврежденную трещиной, упрочняли по технологии ВМП. Усталостные испытания упрочненного образца продолжали до появления следующей трещины глубиной примерно 1 мм в одной из зон углового шва, неупрочненных ВМП. Поврежденную усталостной трещиной зону также упрочняли по технологии ВМП и усталостные испытания образца продолжали. После аналогичного упрочнения третьей и четвертой поврежденных усталостной трещиной зон упрочненный образец испытывали дальше при неизменном уровне напряжений до разрушения или до наработки  $2 \cdot 10^6$  циклов. Испытанный на усталость по описанной выше методике первый сварной образец стали 10ХСНД при максимальных напряжениях цикла

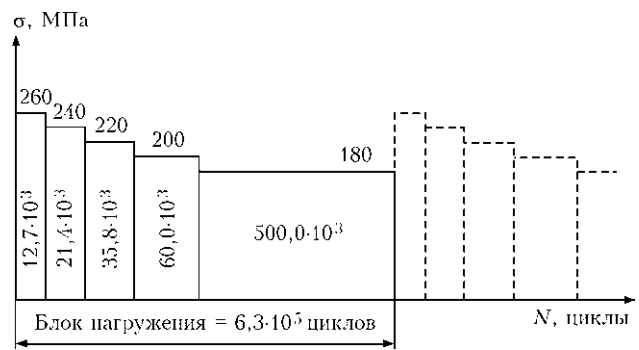


Рис. 4. Схема блочного нагружения таврового сварного образца стали 09Г2С

$\sigma_{\max} = 220$  МПа показал следующее. Первая усталостная трещина появилась в зоне перехода углового шва к основному металлу (см. рис. 2, зона 1) после 267300 циклов перемен напряжений. Как следует из кривой усталости этих образцов, приведенной в работе [10], долговечность образца до образования первой трещины глубиной примерно 1 мм составляет 69 % долговечности образца до полного разрушения. Вторая усталостная трещина образовалась в переходной зоне около противоположного ребра (зона 2) после 587200 циклов перемен напряжений, что составляет 145 % долговечности образца до полного разрушения. Третья трещина появилась после 1318300 циклов перемен напряжений (зона 3), что составляет 330 % долговечности образца до полного разрушения.

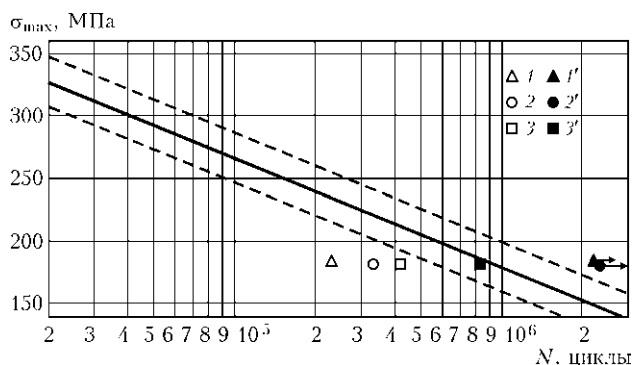


Рис. 5. Кривая усталости тавровых соединений стали 09Г2С в исходном состоянии с 95%-м доверительным интервалом и результаты усталостных испытаний трех образцов: 1–3 — до образования трещины глубиной 1, 2 и 4,5 мм соответственно; 1'–3' — после упрочнения ВМП

шения. После обработки ВМП трех зон перехода угловых швов к основному металлу, где поочередно образовывались усталостные трещины, образование четвертой трещины в неупрочненной ВМП зоне углового шва (см. рис. 2, зона 4) не наблюдалось до наработки образцом общей долговечности 2226100 циклов перемен напряжений. После этого усталостные испытания образца были остановлены. Второй образец испытывали при пятиступенчатом блочном нагружении при начальном уровне напряжений 260 МПа с последующим уменьшением до 180 МПа с шагом 20 МПа. Количество циклов на каждой ступени нагружения указано на схеме, приведенной на рис. 4. После последовательного упрочнения ВМП всех зон, поврежденных усталостными трещинами, испытания продолжали по заданному блочному нагружению до разрушения. Результаты испытаний приведены в таблице. Учитывая, что до появления третьей трещины общая долговечность образца составила примерно  $2,6 \cdot 10^6$  циклов перемен напряжений (350 % долговечности образца в исходном состоянии до полного разрушения), упрочнение технологией ВМП третьей и четвертой зон не проводили. Разрушение образца произошло по неупрочненной зоне после 2723200 циклов перемен напряжений на второй ступени пятого блока нагружения (таблица). Установленные значения циклической долговечности таврового соединения, отвечающие образованию усталостных трещин заданной длины (глубины) в четырех околошовных зонах угловых швов, указывают на существенное различие характеристик сопротивления усталости этих зон.

Как видно из приведенных результатов испытаний тавровых образцов, последовательное упрочнение зон перехода угловых швов на основной металл, поврежденных усталостными трещинами глубиной примерно 1 мм, существенно повышает циклическую долговечность соединений. Однако при выполнении ремонтных работ нецелесообразно

ограничиваться упрочнением только поврежденной усталостной трещиной зоны таврового сварного соединения, так как в дальнейшем трещины будут зарождаться в неупрочненных околошовных зонах соединения в процессе их дальнейшей эксплуатации. Более эффективным является упрочнение всех четырех околошовных зон сварного соединения после образования в одной из них усталостной трещины глубиной около 1 мм. Подтверждением этого служат результаты усталостных испытаний, представленные в начале статьи, для образцов тавровых сварных соединений стали 09Г2С, которые приведены на рис. 5 в виде темных и светлых точек. На рис. 5 также приведена кривая усталости тавровых сварных соединений стали 09Г2С в исходном состоянии с 95%-м доверительным интервалом. Учитывая, что кривая усталости построена по полному разрушению образцов, упрочнение ВМП зоны перехода металла шва на основной металл с усталостной трещиной глубиной 4,5 мм не приводит к повышению циклической долговечности таврового сварного соединения, поскольку долговечность упрочненного образца до его разрушения попадает в 95%-й доверительный интервал кривой усталости неупрочненных образцов в исходном состоянии (рис. 5, точки 3 и 3'). Обработка околошовной зоны на более ранних стадиях развития усталостной трещины (глубина трещины 1 и 2 мм) существенно увеличивает циклическую долговечность сварного соединения (точки 1 и 1', 2 и 2' на рис. 5). Как показано выше, после наработки образцами с усталостными трещинами глубиной 1 и 2 мм  $2 \cdot 10^6$  циклов перемен напряжений в упрочненном состоянии развитие существующих и образование новых трещин не наблюдалось. Эти образцы были разрушены при более высоких уровнях максимальных напряжений цикла, равных 320 МПа после наработки еще 35100 и 37200 циклов перемен напряжений соответственно, что составило около 130 % долговечности сварного образца в исходном состоянии, отвечающей данному уровню нагружения (см. кривую усталости на рис. 5).

Таким образом, упрочнение всех четырех околошовных зон сварного соединения после образования в одной из них усталостной трещины глубиной примерно 1 мм позволяет не только восстановить долговечность поврежденного образца до исходного уровня, но и существенно повысить циклическую долговечность.

## Выводы

1. Установлено существенное различие сопротивления усталости четырех околошовных зон угловых швов тавровых сварных соединений низколегированных сталей. Различие между цик-

лической долговечностью околошовных зон угловых швов этих соединений до образования усталостной трещины глубиной примерно 1 мм может составлять более 9 раз.

2. Последовательное упрочнение технологий ВМП околошовных зон с образовавшимися усталостными трещинами глубиной около 1 мм более чем в 3,5 раза повышает циклическую долговечность таврового сварного соединения при постоянном или блочном нагружении по сравнению с исходным состоянием.

3. При ремонте с целью максимального увеличения циклической долговечности тавровых сварных соединений целесообразно упрочнять технологией ВМП все четыре околошовные зоны таких соединений после образования в одной из них усталостной трещины глубиной около 1 мм. Упрочненные по такой методике три образца с образовавшимися усталостными трещинами после 178400, 232800 и 344100 циклов перемен напряжений не разрушились при наработке  $2 \cdot 10^6$  циклов в упрочненном состоянии.

1. Труфяков В. И. Повышение сопротивления усталости сварных соединений и конструкций // Автомат. сварка. — 1998. — № 11. — С. 11–19.

2. Патон Б. Е. Современные направления повышения прочности и ресурса сварных конструкций // Там же. — 2000. — № 9/10. — С. 3–9.
3. Кныш В. В., Ковальчук В. С. Повышение ресурса металлоконструкций из низколегированных сталей высокочастотной механической проковкой после ремонтной сварки // Там же. — 2007. — № 11. — С. 39–42.
4. Кныш В. В., Кузьменко А. З., Войтенко О. В. Повышение сопротивления усталости сварных соединений высокочастотной механической проковкой // Там же. — 2006. — № 1. — С. 43–47.
5. Improving the fatigue crack resistance of waspaloy by shot peening / A. Turnbull, E. R. De Los Rios, R. B. Tait et al. // Fatigue & Fract. of Eng. Materials and Struct. — 1998. — 21. — P. 1513–1524.
6. Branko C. M., Infante V., Bartista R. Fatigue behaviour of the welded joints with cracks, repaired by hammer peening // Ibid. — 2004. — 27. — P. 785–798.
7. Experimental evaluation of the effect of residual stress field on crack growth behaviour in C(T) specimen / G. H. Farrahi, G. H. Majzoobi, F. Hosseinzadeh, S. M. Harati // Eng. Fract. Mechanics. — 2006. — 73. — P. 1772–1782.
8. Song P. S., Wen C. C. Crack closure and growth behaviour in shot peened fatigue specimen // Ibid. — 1999. — 63. — P. 295–304.
9. Residual stress modification by post-weld treatment and its beneficial effect on fatigue strength of welded structures / C. Xiaohua, J. W. Fisher, H. J. Prask et al. // Intern. J. of Fatigue. — 2003. — 25. — P. 1259–1269.
10. Сопротивление коррозионной усталости сварных соединений, упрочненных высокочастотной механической проковкой / В. В. Кныш, И. И. Вальтерис, А. З. Кузьменко, С. А. Соловей // Автомат. сварка. — 2008. — № 4. — С. 5–8.

Investigation results on the efficiency of using high-frequency mechanical peening (HMP) to increase fatigue resistance of welded T-joints on low-alloy steels containing fatigue cracks on their surface are presented. Two approaches to strengthening of the T-joints damaged with fatigue cracks are considered.

Поступила в редакцию 14.07.2008



## СВАРКА И РЕЗКА

**9-я Международная специализированная выставка оборудования, приборов и инструментов для сварки и резки**

24–27 марта 2009

г. Минск Выставочный комплекс

В рамках выставки будет работать международный специализированный салон

## ЗАЩИТА ОТ КОРРОЗИИ. ПОКРЫТИЯ

Организатор: МинскЭкспо, тел./факс: +37517 226 98 58 (83)  
E-mail: e\_fedorova@solo.by