



ЭФФЕКТИВНОСТЬ УПРОЧНЕНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОКОВКОЙ СТЫКОВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С ДЛИТЕЛЬНОЙ НАРАБОТКОЙ

В. В. КНЫШ, С. А. СОЛОВЕЙ, А. З. КУЗЬМЕНКО

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: otde13@ukr.net

Исследована циклическая долговечность стыковых сварных соединений низколегированной стали 09Г2С, упрочненных технологией высокочастотной механической проковки (ВМП) на различных стадиях усталостного разрушения: в исходном после сварки состоянии, при накоплении 70 % усталостных повреждений, при образовании поверхностных трещин усталости. Цель данных исследований — установление эффективности применения обработки ВМП стыковых сварных соединений с длительной наработкой в условиях переменного нагружения. Показано, что упрочнение технологией ВМП стыковых сварных соединений сразу после сварки повышает предел ограниченной выносливости (база 2 млн циклов) на 50 % — со 180 до 270 МПа, а циклическую долговечность — в 5...10 раз. Экспериментально подтверждено, что эффективность упрочнения сварных соединений с 70 % накопленными усталостными повреждениями зависит от уровней прикладываемых максимальных напряжений до упрочнения. Так, остаточная циклическая долговечность образцов, испытанных в диапазоне максимальных напряжений 240...260 МПа, находится в пределах разброса экспериментальных данных для сварных соединений в неупрочненном состоянии, а испытанных в диапазоне максимальных напряжений 280...300 МПа — в пределах разброса экспериментальных данных для сварных соединений, упрочненных технологией ВМП сразу после сварки. Установлено, что применение технологии ВМП повышает остаточную циклическую долговечность сварных соединений с поверхностными трещинами усталости (глубиной до 2 мм) в 2,5 раза по сравнению с долговечностью до образования трещины. Библиогр. 11, рис. 5.

Ключевые слова: высокочастотная механическая проковка, повышение циклической долговечности, усталость, сварное соединение, накопленные усталостные повреждения

Применение методов поверхностного пластического деформирования (ППД) металла позволяет значительно повысить характеристики сопротивления усталости сварных соединений. Эффективным способом упрочнения сварных конструкций, работающих в условиях переменного нагружения, является высокочастотная механическая проковка (ВМП). Применение данного способа обработки сварных соединений на стадии изготовления конструкций достаточно хорошо изучено: установлены основные закономерности повышения циклической долговечности и пределов выносливости сварных соединений в зависимости от класса прочности стали, типа соединения, характеристик цикла переменного нагружения; определены его преимущества сравнительно с другими способами поверхностного пластического деформирования металла [1–6]. В этом комплексе исследований ряд работ посвящен оценке эффективности упрочнения сварных узлов и элементов эксплуатируемых металлоконструкций, выполненных угловыми швами [7–11]. Показано, что увеличение остаточной долговечности сварных соединений с накопленными усталостными повреждениями после упрочнения технологией ВМП существенно зависит от уровня и длительности прикладываемых максимальных напряжений до упрочнения.

© В. В. Кныш, С. А. Соловей, А. З. Кузьменко, 2014

Что касается экспериментальных данных по эффективности применения технологии ВМП для повышения характеристик сопротивления усталости стыковых сварных соединений эксплуатируемых конструкций, то такие данные в известной литературе отсутствуют.

Цель настоящей работы — установить эффективность упрочнения ВМП стыковых сварных соединений с длительной наработкой в условиях переменного нагружения.

Материал и методика исследований. Экспериментальные исследования проводили на образцах стыковых соединений низколегированной стали 09Г2С ($\sigma_T = 375$ МПа, $\sigma_B = 510$ МПа) толщиной 12 мм. Заготовки под образцы 600×180 мм вырезали из горячекатаного листового проката 12 категории. Двухстороннюю автоматическую сварку под флюсом ОК Flux 10.71 осуществляли без разделки проволокой 08ГА диаметром 4 мм. Параметры сварки: сварочный ток 590...620 А, сварочное напряжение 30...32 В, скорость сварки 28,2 м/ч. После сварки с каждой пластины вырезали 8 образцов. Форма и геометрические размеры образцов приведены на рис. 1. Толщина образца обусловлена широкой применимостью в сварных конструкциях проката толщиной 12 мм, а ширина рабочей части образца выбиралась исходя из мощности испытательного оборудования. Изго-

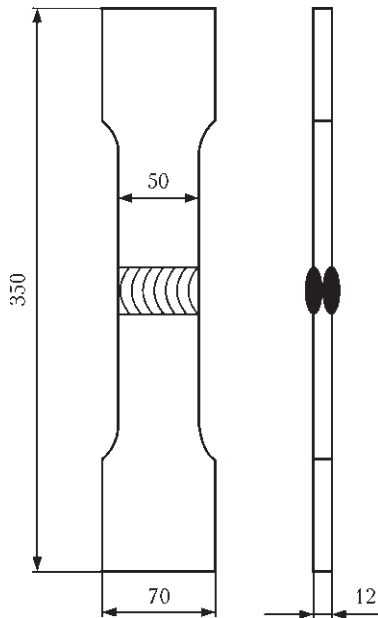


Рис. 1. Форма и размеры образца стыкового сварного соединения стали 09Г2С

тавливали четыре серии образцов для испытаний на усталость: исходное состояние (первая серия), ВМП сразу после сварки (вторая), ВМП после накопления 70 % усталостных повреждений (третья) и ВМП после образования поверхностных усталостных трещин заданной длины (четвертая серия). При упрочнении соединений технологией ВМП поверхностному пластическому деформированию подвергали узкую зону перехода металла шва к основному металлу. Упрочнение производили ручным ударным инструментом с пьезокерамическим преобразователем, соединенным с ультразвуковым генератором выходной мощностью 500 Вт. В качестве упрочнителя использовали однорядную четырехбойковую насадку, диаметр бойков 3 мм. Скорость выполнения ВМП 3 мм/с, амплитуда колебаний торца волновода ручного ударного инструмента 25 мкм. Усталостные испытания образцов проводили на испытательной машине УРС 20 при одноосном переменном растяжении с асимметрией цикла $R_\sigma = 0$. В качестве критериев завершения испытаний принимали полное разрушение образца и превышение базы испытаний $2 \cdot 10^6$ циклов перемен напряжений.

Результаты исследований. Первоначально по результатам испытаний образцов первой и второй серий были установлены кривые усталости стыковых сварных соединений стали 09Г2С в исходном и в упрочненном технологией ВМП сразу после сварки состояниях, соответственно (рис. 2). Упрочнение технологией ВМП повышает предел ограниченной выносливости (база 2 млн циклов) стыковых сварных соединений на 50 % — со 180 до 270 МПа, а циклическую долговечность — в 5...10 раз. При этом существенно уменьшается разброс экспериментальных данных.

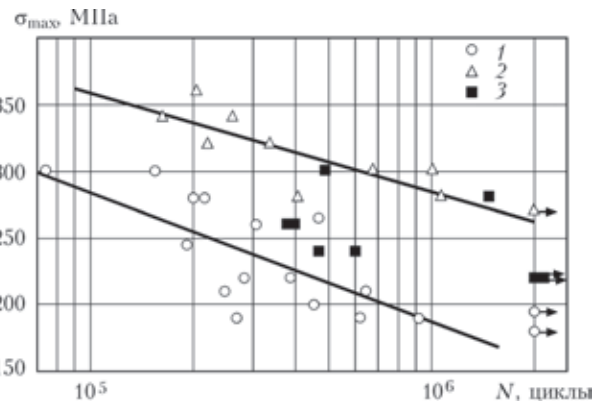


Рис. 2. Результаты усталостных испытаний стыковых сварных соединений стали 09Г2С в исходном (1), упрочненном технологией ВМП после сварки (2) и в упрочненном технологией ВМП при накоплении 70 % усталостных повреждений (3) состояниях

Образцы третьей серии подвергали предварительному циклическому нагружению до наработки 70 % долговечности от установленной кривой усталости сварных соединений в неупрочненном состоянии, а затем обрабатывали технологией ВМП. После упрочнения технологией ВМП усталостные испытания продолжали при тех же уровнях нагружения, что и до упрочнения. Результаты усталостных испытаний приведены на рис. 2. Упрочнение технологией ВМП стыковых сварных соединений с 70 % накопленными усталостными повреждениями повышает предел ограниченной выносливости (база 2 млн циклов) на 22 % — со 180 до 220 МПа. При этом остаточная циклическая долговечность образцов, испытанных в диапазоне максимальных напряжений 240... 260 МПа, находится в пределах разброса экспериментальных данных для сварных соединений в неупрочненном состоянии, а испытанных в диапазоне максимальных напряжений 280...300 МПа — в пределах разброса экспериментальных данных для сварных соединений, упрочненных технологией ВМП сразу после сварки. Следует отметить, что большинство образцов третьей серии разрушились по основному металлу вдали от линии сплавления (рис. 3). Аналогичное повышение характеристик сопротивления усталости сварных соединений было получено при исследовании влияния предварительного циклического нагружения на эффективность упрочнения технологией ВМП тавровых сварных соединений [8, 10]. Полученные экспериментальные данные на стыковых сварных соединениях подтверждают, что при предварительном циклическом нагружении сварных соединений с максимальными напряжениями цикла, отвечающими соотношению $\sigma_T > \sigma_T / \alpha_\sigma$ (где σ_T — предел текучести материала, α_σ — коэффициент концентрации напряжений), последующее упрочнение технологией ВМП приводит к более высокому повышению характеристик сопротивления

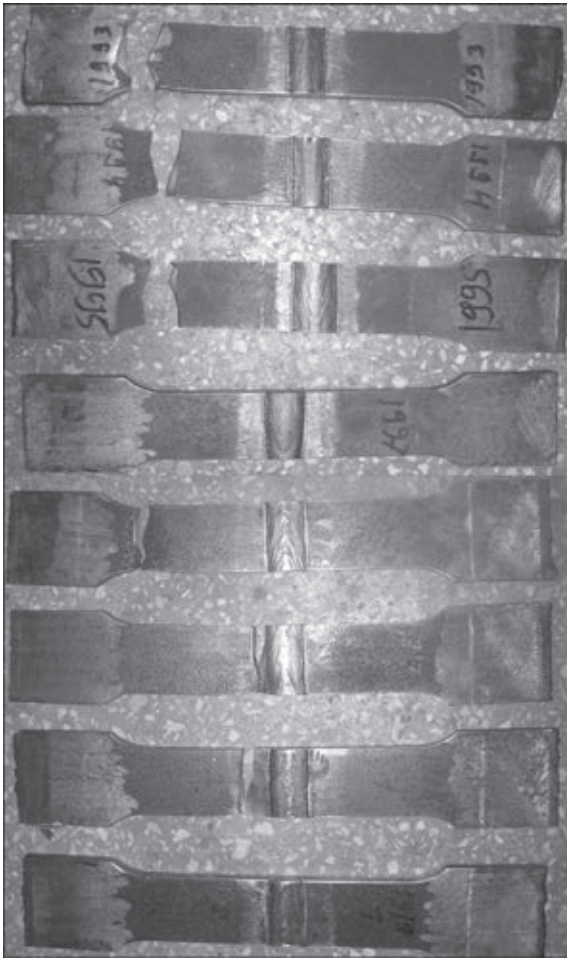


Рис. 3. Внешний вид образцов стыкового соединения стали 09Г2С, упрочненных при накоплении 70 % усталостных повреждений, после испытаний на усталость

усталости соединений в сравнении с упрочнением сразу после сварки. Это вызвано тем, что при уровнях максимальных напряжений, отвечающих указанному выше неравенству, в зонах концентраторов сварных соединений происходит полная релаксация остаточных сварочных напряжений растяжения. Способ повышения характеристик

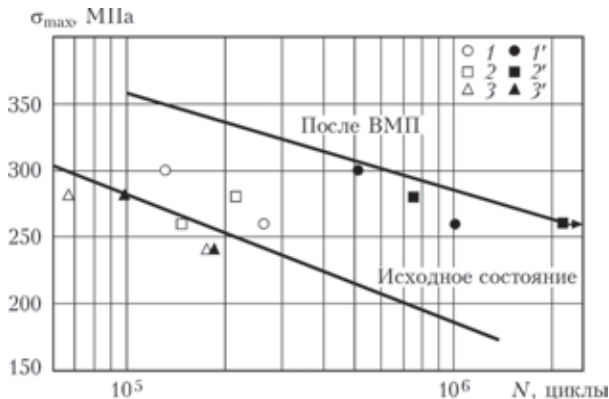


Рис. 4. Кривые усталости стыковых соединений стали 09Г2С в исходном и упрочненном технологией ВМП состояниях, а также результаты усталостных испытаний образцов: 1–3 — до образования трещины длиной 5, 20 и 50 мм соответственно; 1'–3' — после упрочнения ВМП трещин длиной 5, 20 и 50 мм соответственно

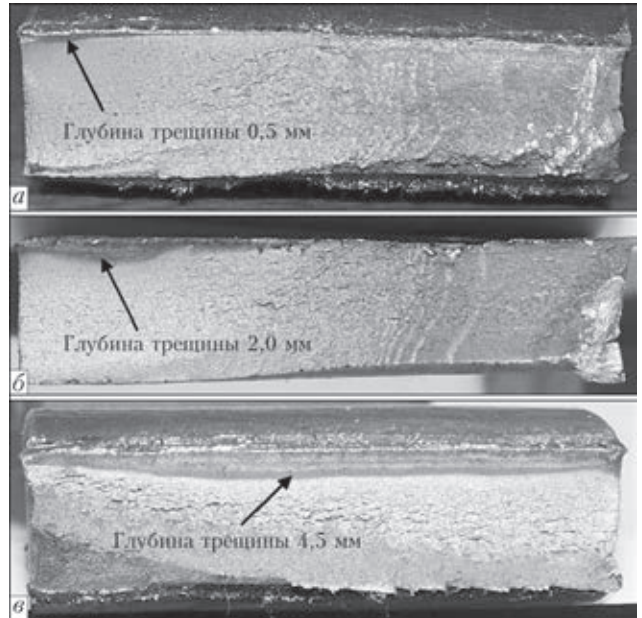


Рис. 5. Усталостные изломы образцов стыкового соединения стали 09Г2С, упрочненных при образовании усталостных трещин длиной 5 (а), 20 (б) и 50 мм (в)

сопротивления усталости сварных соединений предварительным нагружением более высокими уровнями напряжений получил в научной литературе название «перегрузка». Полученные результаты показывают высокую эффективность применения технологии ВМП для повышения циклической долговечности стыковых сварных соединений с длительной наработкой.

Четвертую серию образцов упрочняли технологией ВМП после образования поверхностных усталостных трещин длиной 5 мм (2 образца), 20 мм (2 образца) и 50 мм (2 образца). Для определения фронта трещины сварное соединение в исходном состоянии смазывали индикаторной жидкостью, состоящей из керосина и тонера. После образования трещины заданной длины (все трещины образовывались по линии перехода металла шва на основной металл) остатки индикаторной жидкости удаляли продувкой сжатым воздухом. Упрочнению технологией ВМП подвергали не только линию сплавления, содержащую трещину, а все четыре линии перехода металла шва на основной металл. После упрочнения ВМП индикаторную жидкость не применяли. Таким образом, на изломах образцов после испытаний на усталость четко виден фронт трещины, которую обрабатывали технологией ВМП. Результаты усталостных испытаний приведены на рис. 4, а фотографии разрушенных образцов на рис. 5.

Обработка технологией ВМП образцов сварных соединений с трещинами длиной 50 мм (глубиной до 5 мм) не привела к увеличению циклической долговечности. Образцы разрушились в пределах разброса экспериментальных данных неупрочненных сварных соединений. Упрочнение

сварных соединений с усталостными трещинами длиной 5 мм (глубиной 0,5 мм) и 20 мм (глубиной 2 мм) увеличило их остаточную долговечность в 2,5 раза по сравнению с долговечностью до образования трещины. При этом один из образцов с трещиной длиной 5 мм после упрочнения технологией ВМП не разрушился в пределах базы испытаний $2 \cdot 10^6$ циклов перемен напряжений (увеличение остаточной циклической долговечности более чем в 10 раз по сравнению с долговечностью до образования трещины). Аналогичное повышение технологией ВМП остаточной долговечности сварных соединений с поверхностными усталостными трещинами незначительной глубины было получено на тавровых сварных соединениях [11]. Таким образом, подтверждена высокая эффективность применения технологии ВМП для повышения циклической долговечности сварных соединений с трещинами усталости до 2 мм.

Выводы

1. Установлено, что упрочнение технологией ВМП стыковых сварных соединений стали 09Г2С с 70 % накопленными усталостными повреждениями (трещины усталости отсутствовали) повышает предел ограниченной выносливости (база 2 млн циклов) на 22 % — со 180 до 220 МПа. При этом циклическая долговечность образцов, испытанных в диапазоне максимальных напряжений 240... 260 МПа, находится в пределах разброса экспериментальных данных для сварных соединений в неупрочненном состоянии, а испытанных в диапазоне максимальных напряжений 280...300 МПа — в пределах разброса экспериментальных данных для сварных соединений, упрочненных технологией ВМП сразу после сварки.

2. Показано, что упрочнение технологией ВМП всех четырех околошовных зон стыковых сварных соединений с поверхностными усталостными трещинами длиной 5...20 мм (глубиной от 0,5 до 2 мм) в 2,5 раза увеличивает их остаточную долговечность по сравнению с долговечностью до образования трещины.

1. *Verlängerung der lebensdauer von schweißkonstruktion aus höher festen baustählen durch Anwendung der UIP-technologie* / U. Kuhlmann, A. Dürr, P. Günther et al. // Schweissen und Schneiden. — 2005. — Vol. 57, № 8. — P. 384–391.
2. *Повышение сопротивления усталости сварных соединений металлоконструкций высокочастотной механической проковкой (Обзор)* / Л. М. Лобанов, В. И. Кирьян, В.В. Кныш, Г. И. Прокопенко // Автомат. сварка. — 2006. — № 9. — С. 3–11.
3. *The effects of ultrasonic peening treatment on the ultra-long life fatigue behavior of welded joints* / D. Yin, D. Wang, H. Jing, L. Huo // Materials & Design. — 2010. — Vol. 31, № 7. — P. 3299–3307.
4. *Martines L. L. Fatigue life extension procedure by ultrasonic peening.* — [2010]. — 14 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XIII-2316–10).
5. *Yildirim H. C., Marquis G. B. Overview of fatigue data for high frequency treated welded joints.* — [2011].— 22 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XIII-2362r1–11).
6. *Abdullah A., Malaki M., Eskandari A. Strength enhancement of the welded structures by ultrasonic peening* // Materials & Design. — 2012. — Vol. 38. — P. 7–18.
7. *Гарф Э. Ф., Литвиненко А. Е., Смирнов А. Х. Оценка долговечности трубчатых узлов, подвергнутых ультразвуковой ударной обработке* // Автомат. сварка. — 2001. — № 2. — С. 13–16.
8. *Fatigue life improvement of tubular welded joints by ultrasonic peening* / Y. Kudryavtsev, J. Kleiman, A. Lugovskoy, G. Prokopenko. — [2006]. — 15 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XIII-2117–06.)
9. *Zhao X., Wang D., Huo L. Analysis of the S–N curves of welded joints enhanced by ultrasonic peening treatment* // Materials & Design. — 2011. — Vol. 32, № 1. — P. 88–96.
10. *Кныш В. В., Кузьменко А. З., Соловей С. А. Влияние предварительного циклического нагружения на эффективность упрочнения сварных соединений высокочастотной проковкой* // Автомат. сварка. — 2011. — №10. — С. 44–48.
11. *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.

Поступила в редакцию 04.04.2014

НОВАЯ КНИГА

Г. А. Цыбулькин. Адаптивное управление в дуговой сварке. — Киев: Сталь, 2014. — 171 с.

Монография посвящена вопросам построения систем специального класса — электродуговых адаптивных систем, главное назначение которых заключается в том, чтобы придать сварочному автомату или роботу способность самостоятельно, без вмешательства человека-оператора, корректировать свое поведение в зависимости от изменения условий дуговой сварки и геометрических параметров свариваемых изделий. Изложение теоретических положений иллюстрируется примерами и результатами компьютерного моделирования. Даны практические рекомендации по выбору и расчету основных характеристик рассматриваемых систем.

Адресована широкому кругу инженеров и научных работников, интересующихся вопросами автоматизации и роботизации сварочных процессов.

