

# ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ИЗ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОКОВКОЙ ПОСЛЕ РЕМОНТНОЙ СВАРКИ

**В. В. КНЫШ**, канд. физ.-мат. наук, **В. С. КОВАЛЬЧУК**, канд. техн. наук  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Для повышения ресурса металлоконструкций при ремонте с использованием сварки по стандартной технологии рекомендуется зону сплавления ремонтных швов с основным металлом обрабатывать высокочастотной механической проковкой (ВМП). После упрочнения ВМП сварных соединений стали 09Г2С в исходном состоянии, а также после ремонта с использованием сварки их циклическая долговечность при одночастотном отнулевом осевом растяжении повышается в 3...5 раз.

*Ключевые слова:* ремонт сваркой, сварные соединения, сталь, высокочастотная механическая проковка, повышение ресурса

В процессе создания сварных металлоконструкций, работающих в условиях переменного нагружения, используются различные конструктивно-технологические способы повышения циклической долговечности соединений [1–3]. Однако после определенного периода эксплуатации иногда до исчерпания назначенного при проектировании срока службы в сварных соединениях элементов конструкций возникают усталостные трещины. Замена поврежденных конструкций новыми требует значительных материальных затрат и времени, поэтому в отдельных случаях их эксплуатация временно, до выполнения ремонта, продолжается и после появления в них усталостных трещин. При этом для увеличения долговечности используют известные способы торможения усталостных трещин, а также дополнительные упрочняющие технологии. Как правило, они основаны на снятии растягивающих или искусственном наведении благоприятных сжимающих остаточных напряжений вблизи вершин развивающихся трещин местным нагревом, взрывной или ударной обработками, засверливанием отверстий в вершинах трещин и установкой в отверстия с затяжкой высокопрочных болтов [3–6]. Более эффективного восстановления несущей способности соединений с усталостными трещинами можно достичь полным удалением поврежденного металла с трещиной и последующим выполнением ремонта с использованием дуговой сварки. Однако и в этом случае для существенного повышения циклической долговечности соединений с использованием традиционных сварочных технологий и материалов следует различными способами снижать концентрацию напряжений в

зонах перехода швов к основному металлу, снимать или перераспределять растягивающие и создавать благоприятные сжимающие остаточные напряжения в ремонтных швах или прилегающих к ним ЗТВ. Полного или частичного снятия остаточных напряжений можно добиться соответствующей термической обработкой всего элемента или отдельных его зон [7]. Создание сжимающих остаточных напряжений в сварных соединениях представляется возможным в процессе их изготовления или ремонта сваркой, при использовании в качестве сварочной проволоки материала с аустенитно-мартенситной структурой. Для этих целей можно применять проволоку с содержанием в основе, мас. %: 10 Cr, 10 Ni и 80 Fe [8]. При остывании такого металла шва или наружного (облицовочного) слоя на последней стадии охлаждения происходит превращение кристаллической структуры аустенита в мартенсит, в результате чего увеличивается объем металла и возникают остаточные напряжения сжатия [9]. При сварке традиционными материалами остаточные напряжения сжатия в зоне сварного соединения могут наводиться искусственно после изготовления или ремонта сваркой путем общего или местного поверхностного пластического деформирования в результате статической перегрузки, взрывной или ударной обработок [10, 11]. Могут применяться и комбинированные способы упрочнения, способствующие в наибольшей мере повышению ресурса металлоконструкций.

Одним из наиболее эффективных, производительных и экономичных способов повышения циклической долговечности соединений в результате поверхностного пластического деформирования металла шва или зоны перехода сварного шва к основному металлу является высокочастотная механическая проковка (ВМП) с использованием ультразвуковых преобразователей [12–15]. Для оценки эффективности такой обработки, нап-



равленной на повышение циклической долговечности соединений после ремонта сваркой, были проведены усталостные испытания крупномасштабных образцов крестообразной формы (рис. 1), изготовленных из низколегированной стали 09Г2С. Такие образцы имеют высокие значения коэффициента концентрации напряжений и уровня растягивающих остаточных напряжений в исходном состоянии, соизмеримые с их значениями в реальных сварных металлоконструкциях. Сварные швы продольных ребер образцов были выполнены ручной дуговой сваркой штучными электродами УОНИ-13/55 с полным проваром. После сварки образцов на длине 70 мм от края ребра с одной стороны от оси  $OO'$  зоны перехода швов к основному металлу были обработаны ВМП. Такая конструкция образцов позволила определять сопротивление усталости сварных соединений в исходном состоянии, упрочненных технологией ВМП в состоянии после сварки, а также после их ремонтов сваркой без упрочнения и с упрочнением ВМП на одних и тех же образцах и режимах нагружения.

Усталостные испытания образцов выполняли при мягком режиме отнулевого осевого растяжения на сервогидравлической машине УРС 200/20 с частотой нагружения 5 Гц. Критерием завершения испытаний принимали развивающуюся усталостную трещину на поверхности образца длиной 20 мм. В процессе испытаний усталостные трещины, как правило, зарождались по линии сплавления лобового шва с основным металлом. Первыми зарождались трещины в неупрочненных сварных соединениях. При достижении трещиной критической длины испытания прерывали, металл с трещиной усталости удаляли пальцевой фрезой и заваривали образовавшееся углубление электродами УОНИ-13/55. После ремонта испытания образцов продолжали на первоначально заданных режимах нагружения до образования усталостных трещин критических размеров в отремонтированных или исходно упрочненных технологией ВМП соединениях. Вновь образовавшиеся трещины повторно ремонтировали сваркой. Часть образцов

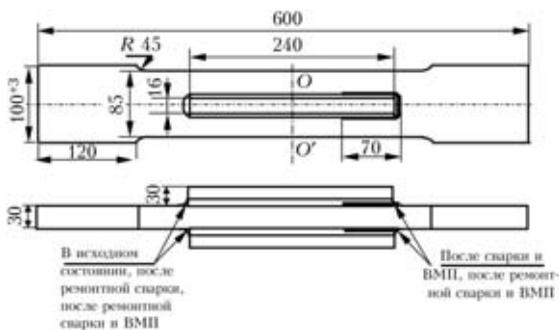


Рис. 1. Размеры образца для оценки эффективности применения ВМП изготовленных и отремонтированных сварных соединений

испытывали на первоначально заданных режимах нагружения до образования усталостных трещин в исходном после ремонта состоянии, а часть — после дополнительного упрочнения ремонтных швов технологией ВМП.

Полученные в работе результаты усталостных испытаний приведены на рис. 2 и 3. Оценка эффективности применения ремонтов для увеличения циклической долговечности сварных соединений представлена на рис. 4 коэффициентом повышения долговечности  $K_{п.д}$  в виде отношения

$$K_{п.д} = N_y / N_{и},$$

где  $N_y$  — циклическая долговечность соединения на определенном уровне напряжений после упрочнения ВМП в исходном состоянии, после ремонта сваркой, после ремонта сваркой с применением ВМП упрочненных и неупрочненных в исходном состоянии соединений;  $N_{и}$  — циклическая долговечность соединения на том же уровне напряжений в исходном состоянии после сварки.

Поскольку кривые усталости исследованных сварных соединений упрочненных и неупрочненных в исходном состоянии, а также после их ремонтов сваркой с применением технологии ВМП и без ее применения располагаются практически параллельно (рис. 2 и 3), то  $K_{п.д}$  для каждого конкретного соединения на всех уровнях напряжений одинаков. Сопоставление установленных значений  $K_{п.д}$  показывает (рис. 4), что после первого и второго ремонтов сваркой циклическая долговечность неупрочненных образцов практически восстанавливается до исходного уровня. После третьей ремонтной сварки циклическая долговечность достигает примерно 74 % исходной. Дополнительная ВМП сварных соединений повышает циклическую долговечность образцов после первого ремонтного сваривания в 4,6 раза, а после второго и третьего — соответственно в 3,9 и 3,6 раза. ВМП сварных соединений в состоянии после

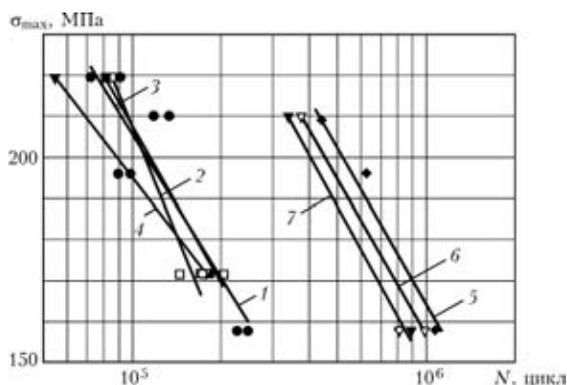


Рис. 2. Кривые усталости сварных соединений стали 09Г2С с двумя продольными ребрами без упрочнения: 1 — исходное состояние; 2–4 — соответственно первый, второй и третий ремонт сваркой; 5–7 — соответственно первый, второй, третий ремонт сваркой с последующей обработкой ВМП

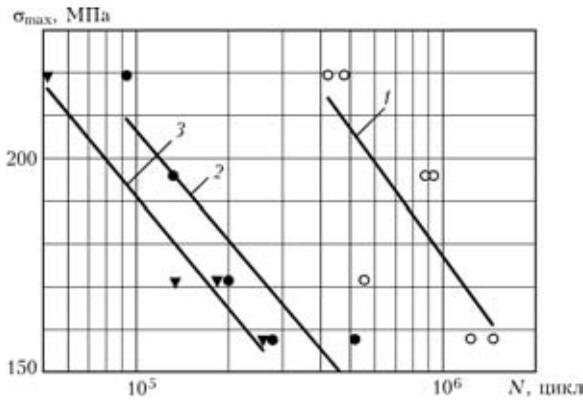


Рис. 3. Кривые усталости сварных соединений стали 09Г2С с продольными ребрами, упрочненных технологией ВМП в исходном состоянии: 1 — сварка и проковка; 2, 3 — соответственно первый и второй ремонт сваркой с последующей обработкой ВМП

сварки повысила циклическую долговечность образцов почти в 5 раз.

После первого и второго ремонтов сваркой с последующей обработкой ремонтных швов технологией ВМП соединений, упрочненных проковкой в состоянии после сварки, циклическая долговечность составила около 95 и 63 % долговечности образцов в исходном состоянии. Следовательно, эффективность применения технологии ВМП после ремонта сваркой поврежденных усталостными трещинами исходно неупрочненных ВМП соединений данного типа выше, чем соединений, упрочненных проковкой в исходном состоянии. Такая закономерность может быть связана с существенно большим количеством циклов накопления усталостных повреждений в объеме металла вблизи окончания продольного ребра при более высокой концентрации напряжений в условиях двухосного растяжения в упрочненных соединениях по сравнению с неупрочненными. Указанное различие количества циклов связано с тем, что в неупрочненных после изготовления сварных соединениях исследуемого типа усталостные трещины зарождаются при долговечностях, примерно в 5 раз меньших, чем в соединениях, упрочненных ВМП в состоянии после сварки. Условия двухосного растяжения на некотором удалении от лобового шва в исходно упрочненных соединениях обусловлены появлением там реактивных растягивающих напряжений, уравновешивающих остаточные напряжения сжатия в пластически деформированном металле околшовной зоны после его наклепа, которые ориентированы перпендикулярно направлению приложенного переменного нагружения. При этом особенности ремонтов сваркой соединений данного типа таковы, что после удаления материала с трещиной и заварки образовавшейся полости зона перехода ремонтных швов к основному металлу (место образования усталостной трещины) в каждом ремонте перемещается дальше от места окончания

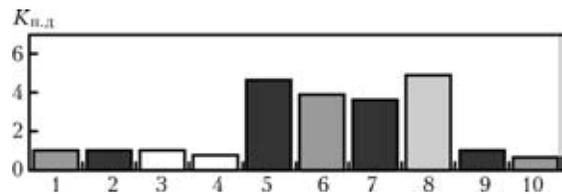


Рис. 4. Коэффициенты повышения долговечности  $K_{п.д.}$  сварных соединений стали 09Г2С: 1 — исходное состояние; 2–4 — соответственно первый, второй и третий ремонт сваркой; 5–7 — соответственно первый, второй и третий ремонт сваркой и проковка неупрочненных соединений; 8 — сварка и проковка соединений в исходном состоянии; 9, 10 — соответственно первый и второй ремонт сваркой и проковка упрочненных соединений

продольного ребра на ширину ремонтного шва в зону меньшей концентрации напряжений. Что касается оптимального количества ремонтов сваркой исследуемого типа сварного соединения, то необходимо отметить, что уже после второго ремонта с последующей проковкой ремонтных швов как для упрочненных, так и для неупрочненных в состоянии после сварки соединений их основной материал исчерпывает несущую способность и усталостные разрушения возникают вдали или непосредственно в ранее наложенных швах соединений. В этой связи выполнять ремонтную сварку с упрочняющей обработкой более двух раз на одном соединении нецелесообразно.

### Выводы

1. Первый и второй ремонты сваркой поврежденных усталостными трещинами неупрочненных соединений практически восстанавливают их циклическую долговечность до уровня исходного состояния, а уже после третьего ремонта долговечность не превышает 75 % исходного значения.
2. Дополнительная ВМП зон перехода ремонтных швов к основному металлу повышает циклическую долговечность соединений после первой ремонтной сварки не менее чем в 4 раза, а после второй и третьей не менее чем в 3 раза по сравнению с долговечностью соединений в исходном состоянии.
3. ВМП сварных соединений в состоянии после сварки повышает циклическую долговечность упрочненных соединений в 5 раз по сравнению с их исходным состоянием.
4. Ремонтную сварку с упрочняющей обработкой технологией ВМП целесообразно выполнять не более двух раз на одном сварном соединении из-за исчерпания несущей способности основного материала и ранее выполненных швов вследствие достижения ими ограниченных пределов выносливости.

1. Патон Б. Е., Труфяков В. И. О повышении несущей способности и долговечности сварных конструкций // Автомат. сварка. — 1982. — № 2. — С. 1–6.

2. Труфяков В. И. Повышение сопротивления усталости сварных соединений и конструкций // Там же. — 1998. — № 11. — С. 11–19.
3. Патон Б. Е. Современные направления повышения прочности и ресурса сварных конструкций // Там же. — 2000. — № 9/10. — С. 3–9.
4. Указания по осмотру и усилению эксплуатируемых сварных пролетных строений. Мин-во путей сообщения. Главное управление путей. НИИ мостов ЛИИЖТа. — М., 1990. — 28 с.
5. Кныш В. В. Определение циклической долговечности элементов конструкций при торможении усталостных трещин // Автомат. сварка. — 2000. — № 9/10. — С. 73–75.
6. Исследование эффективности торможения усталостных трещин полем остаточных напряжений сжатия / В. А. Бродовой, П. П. Михеев, В. В. Кныш и др. // Там же. — 2003. — № 8. — С. 50–51.
7. Винокуров В. А. Отпуск сварных конструкций для снижения напряжений. — М.: Машиностроение, 1973. — 213 с.
8. Ohta A., Suzuki N, Maeda Y. Effective means for improving the fatigue strength of welded structures // Welding World. — 1996. — 37. — Р. 84–89.
9. Способ повышения циклической долговечности и ресурса сварных стальных конструкций / В. С. Ковальчук, В. В. Кныш, В. Д. Позняков, С. Б. Касаткин // Автомат. сварка. — 2007. — № 3. — С. 44–47.
10. Труфяков В. И. Усталость сварных соединений. — Киев: Наук. думка, 1973. — 216 с.
11. Труфяков В. И., Михеев П. П., Кудинов В. М. Повышение сопротивления усталости взрывным нагружением // Автомат. сварка. — 1984. — № 12. — С. 50–52.
12. Михеев П. П. Повышение сопротивления усталости сварных соединений конструкций ультразвуковой ударной обработкой // Проблемы сварки и специальной электрометаллургии: Сб. науч. тр. — Киев: Наук. думка, 1990. — С. 41–47.
13. Кныш В. В., Кузьменко А. З. Повышение сопротивления усталости сварных соединений высокочастотной механической проковкой // Сварщик. — 2005. — № 2. — С. 19–21.
14. Кныш В. В., Кузьменко А. З., Войтенко О. В. Повышение сопротивления усталости сварных соединений высокочастотной механической проковкой // Автомат. сварка. — 2006. — № 1. — С. 43–47.
15. Лобанов Л. М., Кир'ян В. І., Кныш В. В. Підвищення ресурсу сварних металоконструкцій високочастотною механічною проковкою // Фіз.-хім. механіка матеріалів. — 2006. — № 1. — С. 56–61.

To extend the life of metal structures in repair welding using the standard technology, it is recommended to treat the fusion zone between the repair weld and base metal by high-frequency mechanical peening (HFMP). Strengthening of the welded joints on steel 09G2S in the as-welded condition and after repair welding by the HFMP method provides a 3-5 times increase of their service life in fixed-frequency zero-to-tension stress cycle.

Поступила в редакцию 30.03.2007



22–23 ноября 2007 г., Подмоскowie  
(Солнечногорский район, отель Foresta Tropicana)

## МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «СВАРОЧНЫЕ И РОДСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ, РЕКОНСТРУКЦИИ И РЕМОНТЕ ГАЗОНЕФТЕПРОВОДОВ»

**Организаторы:** Журнал «Территория НЕФТЕГАЗ» РГУ нефти и газа им. Губина  
**С участием:** ВНИИГАЗ, ВНИИСТ

### Программа конференции

- ✓ *Состояние и перспективные направления развития сварочных и родственных технологий.*
- ✓ *Современные сварочные материалы, оборудование и технологии.*
- ✓ *Врезка отводов, перемычек, лупингов при ремонте газонефтепроводов под давлением.*
- ✓ *Ремонт дефектных участков труб и сварных соединений сваркой, наплавкой, заваркой, вваркой «заплат», приваркой патрубков, вантузов, стальными сварными муфтами газонефтепроводов.*
- ✓ *Современные технологии сварки при строительстве морских газонефтепроводов и ремонте находящихся в эксплуатации подводных переходов через реки.*
- ✓ *Современные материалы, оборудование и методы неразрушающего контроля сварных соединений.*
- ✓ *Современное оборудование и методы размагничивания конструктивных элементов сварных соединений газонефтепроводов.*
- ✓ *Оценка неразрушающими методами контроля напряженно-деформированного состояния отремонтированных газонефтепроводов.*
- ✓ *Методы снижения остаточных сварочных напряжений с применением термических и альтернативных технологий.*
- ✓ *Перспективные методы защиты от наружной и внутренней коррозии сварных швов газонефтепроводов.*
- ✓ *Современные методы диагностики для выявления потенциально опасных участков газонефтепроводов.*
- ✓ *Жизнеобеспечение при проведении сварочных работ.*
- ✓ *Нормативная база по сварке, родственным технологиям и неразрушающему контролю.*

Сазонова Наталья +7(495) 787-85-29; natasha@neftegas.info