

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ НА ХАРАКТЕР СНИЖЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПО ГЛУБИНЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина*

Повышение эксплуатационной надежности (ресурса) сварных металлоконструкций – одна из насущных проблем современного промышленного производства [1].

Особенно актуальны вопросы повышения ресурса сварных конструкций для нефте- и газодобывающей промышленности, где промышленное оборудование, технологические и магистральные трубопроводы подвергаются интенсивному коррозионному растрескиванию при комплексном воздействии коррозионно-активных сред и остаточных напряжений (ОН).

Радикальным средством предупреждения коррозионного разрушения под напряжением сварных соединений является устранение его энергетической основы – напряженности металла [2]. Снижение или перераспределение ОН по толщине металла во многих случаях может оказывать положительное влияние на эксплуатационную надежность сварных металлоконструкций. При этом основное внимание уделяется состоянию поверхностных слоев металла со стороны, непосредственно контактирующей с агрессивной средой. Поэтому обычно той или иной обработке подвергают в основном указанную сторону.

Для регулирования остаточных сварочных напряжений в последнее время широко применяются деформационные методы, реализуемые механическим воздействием. К ним относятся вибрационная обработка, ультразвуковая обработка, метод ударного и взрывного нагружения. Особое место среди них занимает электрогидроимпульсная обработка (ЭГИО), которая включает действие на обрабатываемый объект комплекса ударно-волновых и силовых нагрузок, генерируемых высоковольтным разрядом в жидкости. Снижение остаточных напряжений при ЭГИО происходит в результате активации возбуждаемыми в металле волнами напряжений естественных дислокационно-сдвиговых релаксационных процессов [3]. Поскольку упругие волны в металлах затухают относительно слабо, их активирующее действие на релаксацию остаточных напряжений проявляется на значительных расстояниях от зоны разрядов: по площади радиус достаточно эффективного воздействия составляет 200–250 мм, по глубине – до 100 мм [4]. Целесообразность и эффективность малоэнергоемкого, экологически чистого технологического процесса ЭГИО сварных и литых конструкций с целью снижения в них остаточных напряжений подтверждены практически [5, 6].

При ЭГИО, если это позволяет конструкция, разряд с рабочих электродов производится непосредственно на сварной шов поверхности, которая контактирует с агрессивной средой. Так могут обрабатываться емкости или сосуды относительно большого диаметра [7]. Сварные же швы трубопроводов могут обрабатываться только снаружи, тогда как агрессивная среда действует на внутреннюю их поверхность. Учитывая результаты экспериментальных исследований [3], можно предположить, что при ЭГИО снижение ОН неравномерно по толщине сварных соединений. Поэтому представляют интерес изучение влияния ЭГИО на характер снижения ОН по глубине сварного соединения, а также определение его изменения от технологических режимов обработки, то есть параметров ЭГИО.

Цель работы – исследовать изменение остаточных макронапряжений по глубине сварных соединений при учете суммарной энергии разрядов при ЭГИО.

При решении вопроса о размерах зоны изменения остаточных макронапряжений по глубине сварных соединений на основе технологических параметров ЭГИО были использованы как результа-

ты ранее проведенных исследований [8], так и вновь полученные авторами о влиянии энергии обработки и толщины сварных соединений на эффективность снижения в них ОН.

Эксперименты проводились на образцах, в качестве которых были взяты сварные пластины из малоуглеродистой стали Ст.3 размером 500x500x δ мм (где δ – толщина образцов, которая выбиралась различной, а именно: 6, 10, 16, 20, 22 и 30 мм) со стыковым соединением вдоль оси.

Обработку образцов производили на лабораторной электрогидроимпульсной установке с одной стороны, при этом электрический разряд осуществлялся с электрода непосредственно на сварной шов. Для равномерного распределения нагрузки электрод перемещался вдоль сварного шва с определенным шагом $l_{ш}$ ($l_{ш} \approx 50$ мм). ЭГИО образцов проводили на двух уровнях суммарной энергии, проходящей на 1 мм сварного шва, а именно: $W \cdot n = 2,7$ и $22,5$ кДж/мм (здесь W – энергия единичного импульса, одинаковая для обоих уровней, равная 7,5 кДж [9], и n – количество импульсов).

Для исключения образования прогиба, который мог бы внести искажения в получаемые результаты, образцы при обработке опирали на три жестких ребра, расположенных вдоль шва: два – по краям и одно – непосредственно под швом.

Остаточные напряжения в сварных соединениях определяли разрушающим методом [11] на базах 100 мм, расположенных посередине длины шва. При этом применялись съемные механические деформометры с индикаторной головкой с точностью $\pm 0,01$ мм, погрешность метода определения ОН с помощью применяемого деформометра не превышала 7%.

Эффективность снижения ОН вычислялась в относительных единицах: по отношению абсолютного изменения $\Delta\sigma$ к исходному значению σ (здесь σ – продольные остаточные напряжения, близкие к пределу текучести металла) – и выражалась в процентах, то есть $\Delta\sigma/\sigma \cdot 100\%$.

Полученные экспериментально зависимости эффективности снижения макронапряжений от выбранных уровней суммарной удельной энергии для различных толщин сварных соединений свидетельствуют (рис. 1), что с повышением энергии обработки эффективность снижения макронапряжений возрастает, а с увеличением толщины сварных соединений при фиксированной энергии – уменьшается. Кроме того, при уровне суммарной удельной энергии, равной 2,7 кДж/мм, наблюдается более высокий градиент падения эффективности снижения ОН в зависимости от толщины сварных соединений, чем при $W \cdot n = 22,5$ кДж/мм. Так, из рис. 1 следует, что при $W \cdot n = 2,7$ кДж/мм эффективность снижения ОН понизилась от 39% при толщине сварной пластины 10 мм до 22% – при толщине 30 мм, а при суммарной энергии $W \cdot n = 22,5$ кДж/мм – с 63 до 50% соответственно. Иными словами, при $W \cdot n = 2,7$ кДж/мм это уменьшение почти в два раза больше, чем при $W \cdot n = 22,5$ кДж/мм.

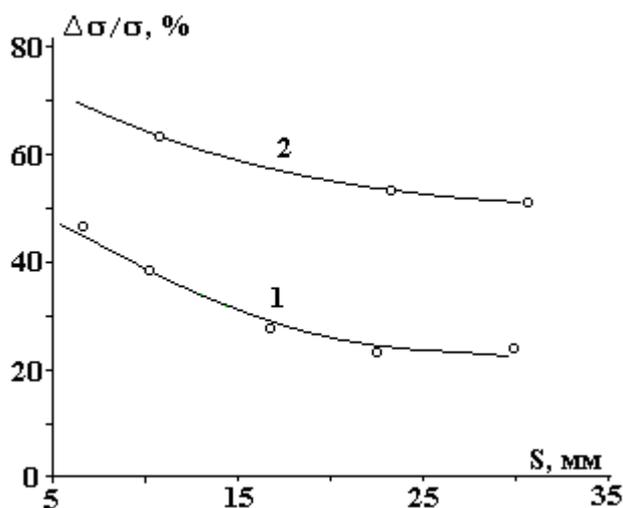


Рис. 1. Зависимость эффективности снижения макронапряжений от толщины сварных соединений: 1 – $W \cdot n = 2,7$ кДж/мм; 2 – $W \cdot n = 22,5$ кДж/мм

Данные о величинах снижения ОН в соединениях различной толщины позволяют построить зависимости распределения ОН по глубине металла. Для этого из экспериментальных точек на оси координат были опущены перпендикуляры, в результате чего образовались прямоугольники, условно характеризующие равномерное по глубине снижение ОН в соединениях соответствующих толщин (см. рис. 2). Поскольку в действительности их распределение неравномерное, то вместо прямоугольников должны быть геометрические фигуры типа прямоугольных трапеций, наклонная сторона у

которых является кривой, характеризующей распределение ОН по глубине металла. Поскольку упомянутые прямоугольники построены по усредненным по толщине данным, то положение и форму этой кривой можно найти из условия равенства площадей соответствующих прямоугольников и трапеций.

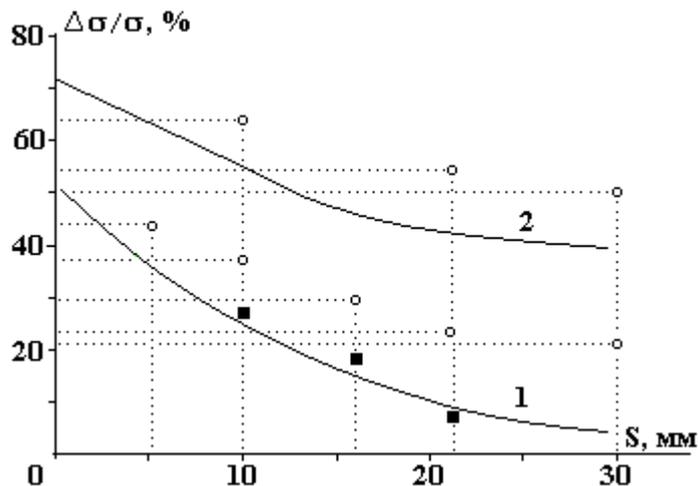


Рис. 2. Распределение эффективности снижения макронапряжений по глубине сварных соединений: 1 – $W \cdot n = 2,7$ кДж/мм; 2 – $W \cdot n = 22,5$ кДж/мм; круглые точки, перенесенные из рис. 1; квадратики – экспериментальные точки

Допустим, что на обрабатываемой поверхности эффективность снижения ОН у всех образцов одинаковая, а по глубине металла характер ее изменения не зависит от конечной толщины образцов. Тогда дополнительным условием для построения кривой распределения ОН по глубине обработанных соединений может быть то, что она должна быть единой для всех трапеций.

Построенные с учетом вышеприведенных предположений кривые характера снижения остаточных растягивающих напряжений по глубине металла сварных соединений представлены на рис. 2.

Полученные зависимости свидетельствуют о том, что при ЭГИО на непосредственно обрабатываемой поверхности сварных образцов эффективность снижения макронапряжений при относительно невысокой суммарной удельной энергии значительно выше, чем на глубине или с обратной стороны. Например, при $W \cdot n = 2,7$ кДж/мм эффективность снижения ОН со стороны обработки составила приблизительно 50%, а на глубине 10, 20 и 30 мм от обрабатываемой поверхности она снизилась до значений ~ 25, ~ 10 и 5% соответственно (рис. 2, кривая 1).

С увеличением суммарной энергии разрядов кривая эффективности снижения ОН по глубине образцов (рис. 2, кривая 2) становится более пологой, то есть эффективность снижения ОН по глубине металла изменяется в значительно меньшей степени. Так, при $W \cdot n = 22,5$ кДж/мм эффективность снижения ОН от значения ~ 70% со стороны обработки уменьшается до значений 55, 43 и 41% по глубине образцов, соответствующих расстоянию 10, 20 и 30 мм от поверхности обработки.

При этом следует отметить, что при разных уровнях суммарной энергии разрядов характер образующегося распределения остаточных напряжений по глубине металла – нелинейный и с увеличением расстояния от обрабатываемой поверхности падение эффективности снижения ОН замедляется.

Правомерность использования результатов изменения эффективности снижения ОН при ЭГИО сварных образцов конечных толщин для оценки характера распределения ОН по глубине толстостенных сварных конструкций проверялась экспериментально. Для этого были проведены дополнительные исследования определения ОН по глубине в сварных пластинах размером 500x500x30 мм.

ЭГИО этих образцов производилась при уровне суммарной удельной энергии, равной 2,7 кДж/мм. Для получения сравнимых результатов ОН определялось на глубинах 10, 16 и 22 мм согласно методике, описанной в [11]. Экспериментальные результаты хорошо согласуются с зависимостями, приведенными на рис. 2 (экспериментальные точки нанесены на кривой 1), что подтверждает правомочность принятого допущения.

Таким образом, полученные результаты показали, что с увеличением суммарной удельной энергии обработки повышается эффективность снижения макронапряжений. Этот процесс интенсивно протекает в месте непосредственного воздействия импульсов давления, распространяясь по всей глубине сварного соединения, причем тем эффективнее, чем выше суммарная энергия импульсов.

При более высоком уровне энергии обработки (22,5 кДж/мм) происходит практически выравнивание эффективности снижения ОН в объеме сварных соединений, в частности на глубине 30 мм.

Зная характер распределения остаточных напряжений по глубине обработанных сварных соединений, можно определять режимы ЭГИО, обеспечивающие необходимый эффект воздействия на остаточные напряжения как с непосредственно обрабатываемой поверхности, так и с обратной. Полученные кривые распределения эффективности снижения ОН по глубине обработанных сварных соединений можно использовать для оценки уровня остаточных напряжений на внутренней поверхности толстостенных трубопроводов при ЭГИО их наружной поверхности.

Вывод. На примере малоуглеродистой стали Ст.3 толщиной 30 мм показано, что изменением суммарной удельной энергии при ЭГИО можно управлять эффективностью снижения уровня макро-напряжений не только на поверхности, но и по глубине сварных толстостенных конструкций до безопасного с точки зрения коррозионного разрушения уровня. Причем этот процесс тем эффективнее, чем выше суммарная энергия обработки.

Полученные зависимости распределения эффективности снижения ОН по глубине обработанных сварных соединений могут использоваться для оценки уровня ОН в толстостенных сварных соединениях, например на внутренней поверхности трубопроводов при ЭГИО их наружной поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патон Б.Е. Современные направления повышения прочности и ресурса сварных конструкций // Автоматическая сварка. 2000. № 9–10. С. 3–9.
2. Стеклов О.И. Стойкость материалов и конструкций к коррозии под напряжением. М.: Машиностроение, 1990. 384с.
3. Петушков В.Г., Опара В.С., Юрченко Е.С. Влияние электрогидроимпульсной обработки на дислокационную структуру сварных соединений // Сварочное производство. 1984. № 10. С. 10–11.
4. Опара В.С., Онацкая Н.А., Резникова Л.Я. Зона распространения релаксационных процессов при электрогидроимпульсном снижении напряжений // Сварочное производство. 1988. № 7. С. 36–38.
5. Мериин Б.В. Электрогидравлическая обработка машиностроительных изделий. Л.: Машиностроение, 1985. 119с.
6. Снижение остаточных напряжений в сварных конструкциях кузнечно-прессового оборудования электрогидроимпульсной обработкой / А.С. Крыжановский, Л.И. Бокланченко, В.С. Опара и др. // Кузнечно-штамповочное производство. 1986. № 1. С. 26–27.
7. Вовченко А.И., Демиденко Л.Ю., Юрченко Е.С. Пути повышения эффективности электрогидроимпульсного метода снижения остаточных напряжений в сварных соединениях // Тяжелое машиностроение. 2003. № 12. С. 34–36.
8. Влияние толщины сварных соединений на снижение остаточных напряжений электрогидроимпульсным методом / В.С. Опара, Е.С. Юрченко, Б.Я. Мазуровский, В.С. Кириченко // Сварочное производство. 1983. № 8. С. 9–10.
9. Опара В.С., Юрченко Е.С., Петушков В.Г. Влияние параметров разрядного контура на эффект снижения остаточных напряжений при электрогидроимпульсной обработке // Автоматическая сварка. 1982. № 12. С. 60–61.
10. Винокуров В.А. Сварочные деформации и напряжения. М.: Машиностроение, 1968. 236 с.
11. Жданов И.М., Гончар А.К. Определение остаточных сварочных напряжений в глубине металла // Автоматическая сварка. 1978. № 9. С. 26–27, 36.

Поступила 07.04.06

Summary

Experimental study on the influence of welding joints thickness on the decrease in residual stresses (RS) under electrohydropulse treatment (EHPT) has been conducted. Diagrams have been plotted for the RS distributions in the joints thickness. They can be used for testing the reduction in RS in thick-walled welding joints, for example, when it is impossible to apply EHPT for processing inner surfaces of pipelines with little cross sections.