

## **ОЦЕНКА ВКЛАДА СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В УПРОЧНЕНИЕ НАПРЯЖЕННОГО МЕТАЛЛА ПРИ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКЕ**

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

Электрогидроимпульсная обработка (ЭГИО) является весьма эффективным способом снижения остаточных напряжений в сварных соединениях [1]. Физическая сущность ЭГИО заключается в импульсном высоковольтном электрическом разряде в жидкости. При этом в канале разряда, представляющем собой плотную низкотемпературную плазму, возникают высокие температуры и давления [2]. В практике при электрогидроимпульсной обработке сварных конструкций с целью снижения остаточных напряжений традиционно используется схема обработки разрядом на изделие. При этом обычно изделие погружают в рабочий бак с жидкостью, где оно находится чаще всего в неподвижном состоянии на заземленной опоре, а положительный электрод движется вдоль его поверхности, осуществляя обработку равномерно распределенными по длине шва электрическими разрядами. В этом случае при ЭГИО импульсный нагрев и силовое воздействие на напряженный металл сварного соединения продолжаются в течение  $10^{-5}$ – $10^{-4}$  с, давление в канале достигает более  $10^2$ – $10^3$  МПа, температура –  $2 \cdot 10^4$  К [3].

ЭГИО наряду с эффективным снижением остаточных напряжений благоприятно влияет на дислокационную структуру металла соединений, способствует ее стабилизации с одновременным уменьшением плотности дислокаций [4]. Под электрогидроимпульсным воздействием крайне неравновесная в исходном состоянии дислокационная структура сварных соединений эволюционирует в направлении образования более стабильных структур – вплоть до ячеистой структуры, причем достаточно существенная стабилизация дислокационной структуры обеспечивается в относительно большом объеме металла [5].

Отмеченные изменения в дислокационной структуре, согласно [6], должны влиять на механические свойства металла обрабатываемых сварных соединений, в связи с чем представляло интерес определить влияние структурных изменений на механические свойства металла.

Проведенные ранее экспериментальные исследования механических свойств сварных соединений, прошедших ЭГИО с целью снижения остаточных напряжений, свидетельствуют о повышении прочностных характеристик металла [7–9]. Как следует из данных, приведенных в работе [7], ЭГИО вызывает неравномерное по толщине локальное деформирование материала в зоне обработки, а именно: зафиксировано увеличение твердости на глубине 2–3 мм со стороны импульсного воздействия. При этом на поверхности ее увеличение составило 15%. В работе [8] отмечается тенденция к повышению твердости образцов из стали марки Ст3 после ЭГИО, однако увеличение твердости незначительное (не более 2,7%). Сравнение механических свойств металла сварного соединения из стали 09Г2С до и после ЭГИО также свидетельствует о повышении предела текучести материала после обработки [9].

Цель работы – оценка вклада структурных изменений в упрочнение металла сварных соединений при ЭГИО.

Изменения прочностных свойств напряженного металла в связи с совершенствованием дислокационной структуры исследовались на различном удалении от зоны разрядов на тех же режимах и участках, где изучалось поведение дислокационной структуры [5]. Образцами служили сварные пластины из низколегированной стали 09Г2С размером 600×200×40 мм. Их электрогидроимпульсная обработка производилась сосредоточенной нагрузкой, в частности разряды осуществлялись на сварной шов у одного из краев образцов при энергии единичного разряда 7,5 кДж. При этом максимальное давление в канале разряда, согласно расчетам [10], составляло 230 МПа, а длительность – 25 мкс.

Прочностные испытания образцов проводились с помощью разрывной машины УМЭ-10ТМ в соответствии с требованиями ГОСТ 1497-73. Результаты определения механических свойств металла сварных соединений соответственно до и после ЭГИО представлены в табл. 1.

Таблица 1. Механические характеристики металла сварного соединения до и после ЭГИО

Состояние образцов	Предел текучести $\sigma_T$ , МПа	Предел прочности $\sigma_B$ , МПа	Удлинение $\delta$ , %	Сужение $\psi$ , %
После сварки	320	472	24,9	57,0
После ЭГИО в месте разрядов	342	470	23,0	57,6
После ЭГИО на расстоянии 200 мм от места разрядов	326	478	25,0	57,5
То же на расстоянии 400 мм от места разрядов	319	477	24,5	58,7

Анализ полученных результатов показывает, что ЭГИО не оказывает существенного влияния на механические свойства сварного соединения из стали 09Г2С, поскольку они относительно слабо отреагировали на обработку. Наиболее заметные изменения произошли с пределом текучести. Так, в месте ЭГИО его значение повысилось до 342 МПа по сравнению с 320 МПа в исходном состоянии ( $\Delta\sigma_T = 22$  МПа), а на расстоянии 200 мм составило 326 МПа, то есть  $\Delta\sigma_T = 6$  МПа. На расстоянии же 400 мм упрочнения не зафиксировано.

Предполагая, что достигаемое при ЭГИО увеличение предела текучести (упрочнение) напряженного металла является следствием изменений дислокационной структуры, для четкого представления о взаимосвязи между механическими свойствами металла сварного соединения и состоянием его структуры произведена оценка вклада различных факторов, ответственных за упрочнение. Этими факторами являются: размер зерен и субзерен, плотность дислокаций [11]. Исследования проводились только для зоны вблизи разрядов (в пределах круга радиусом 25–30 мм), где ранее зафиксировано образование субзеренной структуры (образование внутренних границ зерен) [5].

Увеличение предела текучести стали можно рассматривать как сумму следующих компонентов [11]:

- сопротивление трения решетки железа  $\sigma_0$  ( $\sigma_0 = 2 \cdot 10^{-4} G$ ), где  $G$  – модуль сдвига;
- упрочнение твердого раствора – феррита  $\sigma_{ТВ,Р}$ ;
- упрочнение за счет формирования перлита  $\sigma_{П}$ ;
- упрочнение за счет изменения величины зерна  $\Delta\sigma_3$  ( $\Delta\sigma_3 = k_3 \cdot D^{-1/2}$ ), где  $k_3$  – коэффициент, учитывающий барьерный эффект границ зерен;  $D$  – величина зерна;
- упрочнение за счет образования внутренних границ зерен  $\Delta\sigma_C$  ( $\Delta\sigma_C = k_C \cdot \lambda^{-1}$ ), где  $\lambda$  – величина субзерна;  $k_C$  – коэффициент, учитывающий барьерный эффект субграниц;
- дислокационного упрочнения  $\Delta\sigma_D$  ( $\Delta\sigma_D = \alpha \cdot b \cdot G \cdot \rho^{1/2}$ ),

где  $\alpha$  – коэффициент дислокационного упрочнения для стали, равный 0,5 [11];  $b$  – вектор Бюргера, для стали равен  $2,5 \cdot 10^{-8}$  см [12];  $\rho$  – плотность дислокаций.

Значит, увеличение предела текучести стали  $\Delta\sigma_T$  в результате обработки можно записать выражением

$$\Delta\sigma_T = \sigma_0 + \sigma_{ТВ,Р} + \sigma_{П} + \Delta\sigma_3 + \Delta\sigma_C + \Delta\sigma_D.$$

Проведенный анализ структурных параметров приведенного выражения показывает, что сумма первых трех слагаемых, то есть  $\sigma_M = \sigma_0 + \sigma_{ТВ,Р} + \sigma_{П}$ , обуславливает прочность матрицы, которая не подвергается изменению в результате ЭГИО, поэтому ее можно принять постоянной.

Кроме того, при ЭГИО также не зафиксировано изменение размеров зерен, соответственно упрочнение за счет зерен не имеет места, тогда  $\Delta\sigma_3 = 0$ . С учетом отмеченного можно записать, что изменение предела текучести при ЭГИО в случае образования субзеренной структуры связано с изменением плотности дислокаций и образованием субструктуры  $\Delta\sigma_T = \Delta\sigma_C + \Delta\sigma_D$ .

Результаты расчета изменения предела текучести по изложенной зависимости представлены в табл. 2.

Таблица 2. Вклад структурных изменений в упрочнение металла после ЭГИО

За счет изменения плотности дислокаций				За счет образования субзерен		Упрочнение		
после сварки		после ЭГИО		$\Delta\sigma_{\text{д}} = \sigma_{\text{д2}} - \sigma_{\text{д1}}$ , МПа	величина субзерен $\lambda$ , мкм	$\Delta\sigma_{\text{с}}$ , МПа	$\Delta\sigma_{\text{д+д}}$	$\Delta\sigma_{\text{т}}$
$\rho_1$ , см <sup>-2</sup>	$\sigma_{\text{д1}}$ , МПа	$\rho_2$ , см <sup>-2</sup>	$\sigma_{\text{д2}}$ , МПа				расч. МПа	эксп. МПа
$(5,8-6,2) \cdot 10^{10}$	246	$(4,0-6,0) \cdot 10^9$	71	-175	0,7-0,8	200	25	22

Как видно из таблицы 2, ЭГИО приводит как к разупрочнению за счет снижения плотности дислокаций на -175 МПа, так и упрочнению на 200 МПа за счет образования субзерен. Алгебраическое суммирование обоих слагаемых дает результирующее расчетное изменение предела текучести ( $\Delta\sigma_{\text{т}}^{\text{расч}} = 25$  МПа), которое близко к экспериментально полученному упрочнению стали ( $\Delta\sigma_{\text{т}}^{\text{эксп}} = 22$  МПа).

Видно, что для случая развитой субструктуры при ЭГИО сварных образцов необходимо учитывать вклад в упрочнение, связанный с образованием субзерен. Хорошее совпадение расчетного и экспериментального приращений предела текучести подтверждает правильность в оценке отдельных факторов, ответственных за упрочнение низколегированной стали 09Г2С.

#### Выводы

На примере низколегированной стали 09Г2С произведена оценка вклада структурных изменений в упрочнение металла сварных соединений при ЭГИО. Показано, что при формировании совершенной субструктуры необходимо учитывать вклад в упрочнение, связанный с образованием субзерен. Получена хорошая корреляция между экспериментальным и расчетным значениями увеличения предела текучести.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Крыжановский А.С., Бокланченко Л.И., Опара В.С. и др. Снижение остаточных напряжений в сварных конструкциях кузнечно-прессового оборудования электрогидроимпульсной обработкой // Кузнечно-штамповочное производство. 1986. № 1. С. 26–27.
2. Наугольных К.А., Рой Н.А. Электрические разряды в воде. М., 1971.
3. Гулый Г.А. Научные основы разрядноимпульсных технологий. Киев, 1990.
4. Петушков В.Г., Опара В.С., Юрченко Е.С. Влияние электрогидроимпульсной обработки на дислокационную структуру сварных соединений // Сварочное производство. 1984. № 10. С. 10–11.
5. Маркашова Л.И., Опара В.С., Онацкая Н.А. и др. Изменения дислокационной структуры в сварных соединениях в результате электрогидроимпульсного воздействия // Автоматическая сварка. 1995. № 11. С. 16–18.
6. Гордиенко Л.К. Субструктурное упрочнение металлов. М., 1973.
7. Петушков В.Г., Кудинов В.М., Опара В.С. и др. Снижение остаточных напряжений в сварных соединениях электрогидроимпульсной обработкой // Автоматическая сварка. 1979. № 1. С. 21–22.
8. Мершин Б.В. Электрогидравлическая обработка машиностроительных изделий. Ленинград, 1985.
9. Опара В.С., Онацкая Н.А., Демиденко Л.Ю. Некоторые примеры неоднозначного влияния электрогидроимпульсной обработки на механические свойства металлов // Теория, эксперимент, практика электроразрядных технологий. Николаев, 2002. Вып.4. С.123–125.
10. Кривицкий Е.В., Шамко В.В. Переходные процессы при высоковольтном разряде в воде. Киев, 1979.
11. Гольдштейн М.Н., Литвинов В.С., Бронфин Б.М. Металлофизика высокопрочных сплавов. М., 1986.
12. Иванова В.С., Гордиенко Л.К., Геминев В.Н. Роль дислокаций в упрочнении металлов. М., 1965.

Поступила 18.04.05

#### Summary

The estimation of the contribution of structural alteration to the strengthening of the metal of weld under ЭГИО was made by the example of low-alloy steel 09G2S. It was shown that it is necessary to take the contribution to the strengthening, connected with the formation of subgrains into account at the formation of perfect substructure. Good correlation between experimental and calculated values of yield point increase was found.