



# ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛИ Ст3

Академик НАН Украины **Л. М. ЛОБАНОВ**, **Н. А. ПАЩИН**, канд. техн. наук,  
**В. П. ЛОГИНОВ**, **В. Н. СМИЛЕНКО**, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Исследовано влияние электродинамической обработки (ЭДО) импульсами тока на напряженное состояние низкоуглеродистой стали Ст3 и ее сварных соединений. Разработана экспериментальная методика, с помощью которой изучен механизм дискретного падения усилия нагружения плоских образцов при одноактном электродинамическом воздействии. Установлено, что ЭДО стыковых сварных соединений стали Ст3 позволяет снизить уровень остаточных сварочных напряжений более чем на 50 %.

*Ключевые слова:* сварные конструкции, низкоуглеродистая сталь, электродинамическая обработка, импульс тока, основной металл, сварное соединение, усилие растяжения, плоский образец, оценка напряжений, остаточные напряжения

Прогресс в современной технике обусловлен применением сварных конструкций с высокими заданными технологическими и эксплуатационными характеристиками. При этом проблемы снижения себестоимости и металлоемкости сварных изделий весьма актуальны. Для изготовления сварных элементов конструкций ответственного назначения широко применяют низкоуглеродистые стали, что требует разработки новых подходов к повышению механических свойств их сварных соединений.

Одной из причин снижения работоспособности металлических конструкций являются остаточные сварочные напряжения (ОН), отрицательно влияющие на прочность конструкций при циклических нагрузках, их коррозионностойкость и пр. Это вызывает необходимость исследования эффективных способов регулирования напряженного состояния сварных соединений.

Установлено, что воздействие импульсов тока на металл, который подвергается растяжению до уровня пластичности, приводит к релаксации его напряженного состояния [1]. В сварном соединении имеют место напряжения растяжения, близкие к пределу текучести материала; обработка его импульсами тока может инициировать снижение уровня ОН в металле шва и околошовной зоне (ОШЗ).

Одним из способов воздействия на металлы и сплавы является электродинамическая обработка (ЭДО), основанная на инициировании в материале электродинамических сил, возникающих при переходных процессах, которые сопровожда-

ют прохождением в материале импульсов тока [2]. При суммировании электродинамических сил с ОН сварных соединений обрабатываемой конструкции в ней могут формироваться локальные области макропластических деформаций, что приводит к снижению общего уровня напряженного состояния материала.

Целью настоящей работы является исследование влияния ЭДО на напряженное состояние низкоуглеродистой стали Ст3 и ее сварных соединений.

Для оценки влияния ЭДО на релаксацию механических напряжений в материале проводили обработку плоских образцов лопаточного типа [3]. Для создания одиночных импульсов тока в металле использовали лабораторную установку, созданную на базе конденсаторной машины, принцип работы которой изложен в [1]. При этом разряды батареи конденсаторов передавались на образец посредством контакта медного электрода с поверхностью металла в зоне ЭДО.

Испытания материалов выполняли на разрывной машине ЦДМ-10 с максимальным усилием растяжения 10 т при скорости деформирования 6 мм/мин. В течение всего цикла нагружения образцов проводили запись изменения растягивающего усилия до достижения материалом требуемого напряженного состояния.

В настоящей работе изучали пики электродинамического эффекта, наблюдаемого в виде резкого снижения сопротивления материала деформированию под влиянием импульсов тока. Электродинамический эффект проявлялся в виде характерных сбросов деформирующего усилия на диаграммах растяжения.

В экспериментах образец, закрепленный в захватах испытательной машины, предварительно растягивали до заданного значения предварительного напряжения  $\sigma_{пр}$ , а затем производили



**Изменение параметров напряженного состояния после ЭДО в образцах основного металла из стали Ст3 и ее сварных соединений**

Вид образца	<i>n</i>	$\sigma_{пр}$ , МПа	$\sigma_n$ , МПа	$\Delta\sigma_n$ , МПа	$\Delta\sigma\% = \frac{\Delta\sigma_n}{\sigma_{пр}} \cdot 100\%$	$\Sigma\Delta\sigma\%$ , МПа	Вид нагружения
Основной металл	—	186,0	—	—	—	~40	Упругое
	1		144,3	41,7	22,4		
	2		130,4	13,90	7,47		
	3		116,6	13,80	7,42		
	4		111,0	5,600	3,00		
	—	230,0	—	—	—	~38	Упруго-пластическое
	1		180,37	49,63	21,57		
	2		155,40	24,97	10,85		
	3		141,52	13,88	6,030		
	—	310,0	—	—	—	~18	Пластическое
	1		255,0	55,0	17,74		
	Сварное соединение	—	205,0	—	—	—	~36
1			185,9	19,10	9,31		
2			155,4	30,50	14,80		
3			141,52	13,88	6,77		
4			130,42	11,10	5,41		
—		230,0	—	—	—	~39	Упруго-пластическое
1			183,15	46,85	20,36		
2			160,95	22,20	9,65		
3			144,30	16,65	9,09		
—		310,8	—	—	—	~18	Пластическое
1			255,30	55,50	17,85		

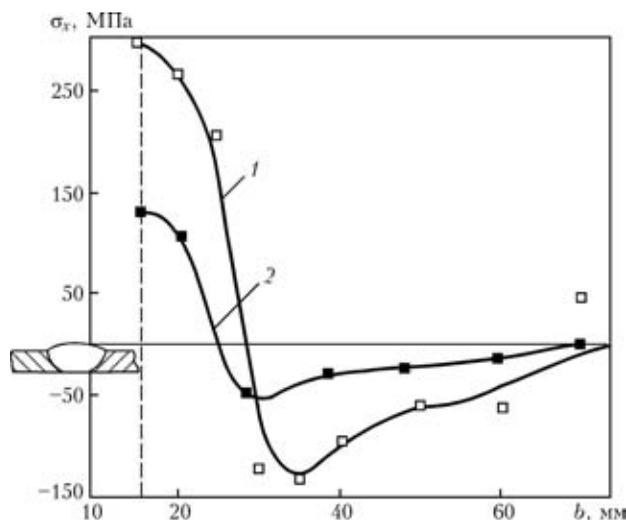
разряд. Падение деформирующего усилия  $\Delta\sigma_n$  фиксировали с помощью самописца, который входит в состав разрывной машины ЦДМ-10. Растяжение осуществляли дискретно, с остановкой для ЭДО одиночными импульсами тока количеством *n* и фиксацией падения деформирующего усилия  $\Delta\sigma_n = \sigma_n - \sigma_{n+1}$ , где  $\sigma_n$  и  $\sigma_{n+1}$  — напряжения в материале образца соответственно до и после выполнения одиночного импульса.

Характеристики падения деформирующего усилия исследовали в широком диапазоне предварительного нагружения. Основное внимание при этом уделяли изучению электродинамического эффекта при предварительных напряжениях, близких по значению к ОН в сварных соединениях стали Ст3. Обработку выполняли на следующем режиме: ток на электроде  $I_э = 3200$  А; напряжение  $U_э = 480$  А; продолжительность воздействия тока  $t_{имп} = 0,0012...0,80036$  с; емкость батареи конденсаторов  $C = 4400$  мкФ.

Исследовали дискретные характеристики падения растягивающего усилия на основном металле и стыковых сварных соединениях, геометрические характеристики и схема обработки которых представлены в [3]. Образцы сварных соединений выполняли за один проход ручной сваркой покрытым электродом марки АНО-4И диаметром 4 мм на следующем режиме: ток дуги  $I_д = 150$  А; напряжение на дуге  $U_д = 70$  В; скорость сварки  $v_{св} = 5$  м/ч.

Данные о предварительном напряжении  $\sigma_{пр}$  и его дискретном падении в основном металле и сварных соединениях стали Ст3 при ЭДО представлены в таблице. Из таблицы можно заключить, что ЭДО образцов из стали Ст3 последовательными импульсами тока вызывает в материале падение усилия растяжения во всех диапазонах нагружения. При этом максимальные значения падения растягивающего усилия  $\Delta\sigma\%$  достигаются при первом токовом разряде ( $n = 1$ ) в цикле ЭДО. При последующих воздействиях импульсами тока снижение эффективности обработки материала происходит таким образом, что при  $n \geq 5$  в цикле ЭДО значения  $\Delta\sigma\%$  не превышают 1...2 %.

Суммарное относительное падение растягивающего усилия в упругой области  $\Sigma\Delta\sigma\%$  в образцах основного металла (сталь Ст3) составляет около 40, а в сварном соединении — до 36 %. Это можно объяснить тем, что при сварке низкоуглеродистых сталей имеет место незначительное упрочнение участка перегрева ОШЗ [4], подвергаемого ЭДО, что снижает эффективность такой обработки. При предварительных нагрузках, значительно превышающих предел упругости стали Ст3 ( $\sigma_{пр} = 310$  МПа), в основном металле и сварном соединении наблюдается наличие деформационного упрочнения, что также приводит к снижению эффективности ЭДО в пластической области нагружения, где  $\Sigma\Delta\sigma\% \leq 18$  %.



Распределение продольных  $\sigma_x$  остаточных напряжений в сварных соединениях стали Ст3 без (1) и после ЭДО (2);  $b$  — полуширина сварного соединения

Напряжение плоского образца при  $\sigma_{пр} = 230$  МПа примерно соответствует уровню остаточных растягивающих напряжений в ОШЗ сварного соединения стали Ст3. Таким образом, электродинамическое воздействие на нагруженный до 230 МПа образец может вызвать в нем суммарное падение растягивающего усилия  $\Sigma\Delta\sigma_{\%}$ , аналогичное снижению уровня ОН в реальных сварных соединениях металлоконструкций. Как следует из таблицы, с помощью ЭДО можно снизить уровень растягивающих напряжений «активной» зоны соединений стали Ст3 до 40 % первоначального.

Для подтверждения влияния электродинамического эффекта на изменение напряженного состояния тонколистовых сварных металлоконструкций выполняли ЭДО пластин размером 500×500×3 мм с расположенным по центру продольным стыковым швом.

Уровень ОН определяли неразрушающим ультразвуковым методом (УЗ), основанным на зависимости скорости распространения ультразвуковых волн от напряжений в металле [5]. Этот метод позволяет анализировать плоское напряженное состояние, при этом целостность исследуемого объекта не нарушается.

Применяемый УЗ метод позволил провести многократные измерения текущих значений ОН после каждого импульса в цикле ЭДО. С помощью указанного метода оценивали эффективность ЭДО в зависимости от количества импульсов тока. Из-

мерения ОН проводили в центральном поперечном сечении пластин. Определяли продольную  $\sigma_x$  компоненту плоского напряженного состояния материала пластины до и после ЭДО. Обработку каждой пластины с продольным швом выполняли на режиме, ранее используемом при ЭДО плоских образцов. Пластина в момент ЭДО находилась в свободном состоянии, т. е. без приложения к ней статических нагрузок. Это позволило оценить влияние импульсного воздействия разрядов тока на релаксацию ОН, являющихся следствием термического цикла сварки. ЭДО выполняли точечными воздействиями на металл шва по направлению от его середины к краям с шагом 90...100 мм. Всего было произведено четыре разряда, что соответствует условиям обработки плоских образцов лопаточного типа. Выбор направления ЭДО обусловлен тем, что, согласно данным таблицы, максимально эффективными являются первый и второй разряды в серии, которые целесообразно выполнять в центральной части пластины, где уровень ОН максимальный.

Распределение продольных остаточных сварочных напряжений  $\sigma_x$  в обработанных и необработанных пластинах показано на рисунке. На основании эпюры ОН можно заключить, что ЭДО стыковых сварных соединений приводит к снижению продольной  $\sigma_x$  компоненты плоского напряженного состояния более чем на 50 %.

Приведенные данные свидетельствуют об эффективности применения ЭДО для регулирования напряженного состояния стали Ст3 и ее стыковых сварных соединений.

1. Влияние электродинамической обработки на напряженно-деформированное состояние теплоустойчивых сталей / Л. М. Лобанов, Н. А. Пашин, В. Ю. Скульский, В. П. Логинов // Автомат. сварка. — 2006. — № 5. — С. 28–32.
2. Теория электрических аппаратов / Г. Н. Александров, В. В. Борисов, В. Л. Иванов и др. — М.: Высш. шк., 1985. — 312 с.
3. Влияние электродинамической обработки на напряженно-деформированное состояние сварных соединений алюминиевого сплава АМг6 / Л. М. Лобанов, Н. А. Пашин, В. П. Логинов, В. Н. Смиленко // Автомат. сварка. — 2007. — № 6. — С. 11–19.
4. Грабин В. Ф. Металловедение сварки плавлением. — Киев: Наук. думка, 1982. — 416 с.
5. Основы ультразвукового неразрушающего метода определения напряжений в твердых телах / А. Н. Гузь, Ф. Г. Махорт, О. Н. Гуца и др. — Киев: Наук. думка, 1974. — 108 с.

The effect of electrodynamic treatment (EDT) with electric current pulses on the stressed state of steel St3 and its butt welded joints was investigated. The experimental procedure was developed to study the mechanism of a discrete fall of the loading force on flat specimens under a single electrodynamic effect. EDT of butt welded joints in steel St3 was found to provide a more than 50 % decrease in the level of residual welding stresses.

Поступила в редакцию 19.09.2006