



УДК 621.791.09-669.71

ИЗМЕНЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АМг6

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) на напряженно-деформированное состояние плоских образцов из сплава АМг6 при различных схемах предварительного нагружения. На основе неразрушающего ультразвукового метода разработана методика и проведены измерения остаточных напряжений в стыковых сварных соединениях. Установлено, что ЭДО позволяет снизить остаточные напряжения в сварных соединениях сплава АМг6 на 50...65 %.

Ключевые слова: дуговая сварка, сварное соединение, остаточные напряжения, электродинамическая обработка, импульс тока, алюминиевые сплавы, предварительное нагружение, пластические деформации

Прогресс в развитии современной техники обусловлен применением сварных конструкций с высокими заданными технологическими и эксплуатационными характеристиками. Использование для сварных соединений таких традиционных способов обработки, как прокатка роликами, проковка, термическая обработка и др., не всегда способствует повышению ресурса работы конструкций в тяжелых условиях эксплуатации. В связи с этим в настоящее время особую актуальность приобрела проблема внешних энергетических воздействий на механические свойства металлов и сплавов, а также их сварных соединений. Экспериментальные исследования электрических токов большой плотности, высокоэнергетических полей, токов плазмы, ионной имплантации, лазерного излучения, а также их комбинированного воздействия на конструкционные материалы заложили основу для создания нового класса высокопроизводительных технологических процессов обработки сварных соединений.

В последние десятилетия XX в. значительно возросло количество работ, связанных с исследованием различных вариантов электромеханического эффекта (изменение свойств под действием электрических полей и токов) для полупроводниковых, диэлектрических материалов и в первую очередь для металлов и сплавов, применяемых в машиностроении.

Установлено, что воздействие импульсов тока на металлы и сплавы приводит к повышению их статической и усталостной прочности, а также к релаксации напряженно-деформированного состояния [1].

Одним из новых способов воздействия током на металлы и сплавы является электродинамическая обработка (ЭДО). Она основана на инициировании в материале электродинамических сил, возникающих при переходных процессах и сопровождающих прохождение в материале токового разряда [2]. При суммировании электродинамических сил со статическим нагружением в материале обрабатываемой конструкции могут возникать структурные изменения, положительно влияющие на ее ресурс. При этом воздействие импульсов тока на металл, который подвергается растяжению в упругой и пластической областях нагружения [3, 4], приводит к изменению его напряженного состояния.

Одной же из причин снижения работоспособности сварных конструкций являются остаточные сварочные напряжения (далее ОН), негативно влияющие на прочностные характеристики и вызывающие остаточное формоизменение изделий. Поскольку в шве и околошовной зоне (ОШЗ) имеют место напряжения растяжения, близкие к пределу текучести материала, ЭДО сварных соединений может инициировать процессы, снижающие общий уровень ОН сварных соединений. При этом, если для титановых сплавов [3] и теплоустойчивых сталей [4] проводили исследования механизма изменения напряженного состояния предварительно нагруженных образцов сварных соединений под воздействием импульсов тока, то для алюминиевых сплавов такие данные отсутствуют.

Целью настоящей работы является исследование влияния ЭДО на снижение напряженно-деформированного состояния сварных соединений алюминиевого сплава АМг6. Для предварительной оценки влияния ЭДО на ОН в указанном материале обработку проводили в условиях растяжения плоских образцов лопаточного типа. Для инициирования одиночных импульсов тока в ме-

© Л. М. Лобанов, Н. А. Пашин, В. П. Логинов, В. Н. Смиленко, 2007

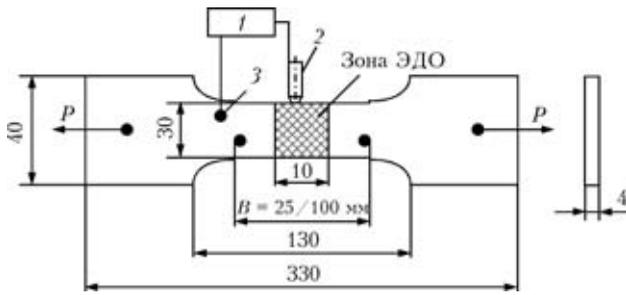


Рис. 1. Схема ЭДО образцов основного металла и сварного соединения сплава АМг6 для испытаний на одноосное растяжение: 1 — установка для ЭДО; 2 — электрод; 3 — крепление обратного провода; P — растягивающее усилие

талле использовали лабораторную установку, созданную на базе конденсаторной машины [4]. Разряд батареи конденсаторов передавали на образец посредством контакта медного электрода с поверхностью металла в зоне ЭДО. Схема ЭДО образца при одноосном растяжении представлена на рис. 1. Образцы основного металла вырезали вдоль проката из листовых заготовок ненагартованного алюминиевого сплава АМг6 толщиной 4 мм. На начальном этапе экспериментов ЭДО выполняли на образцах основного металла, предварительно нагруженного продольным одноосным растяжением в упругой, упругопластической и пластической областях деформирования. Проводили ЭДО также образцов сварных стыковых соединений из сплава АМг6 толщиной 4 мм (рис. 1), которые вырезали поперек шва из пластин размером 500×500×4 мм. Соединения были выполнены встык однопроходной автоматической сваркой неплавящимся электродом в аргоне на установке АС-ТВ-2М на следующем режиме: ток сварки 220 А; напряжение на дуге 18 В; скорость сварки 14 м/ч; присадочная проволока марки СвАМг6 диаметром 2,0 мм. Указанный режим обеспечивал гарантированный провар и удовлетворительное формирование соединения.

ЭДО образцов сварных соединений проводили вдоль ОШЗ, выбор которой в качестве зоны обработки продиктован наличием в ней продольных пластических деформаций сжатия $\epsilon_{пл}$. Суммирование значений $\epsilon_{пл}$ со значениями пластических деформаций, инициируемых импульсами тока, вызывает в сплаве АМг6 релаксационные процессы, следствием которых может являться снижение уровня ОН.

Испытания образцов из сплава АМг6 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 указанным материалом требуемого напряженного состояния.

Задачей настоящих экспериментов являлось изучение пиков электродинамического эффекта,

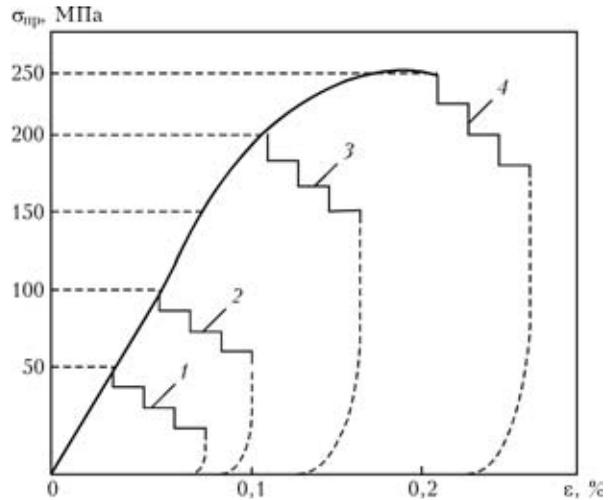


Рис. 2. Изменение упругого растяжения (1, 2) и растяжения в упругопластической области (3, 4) образцов сплава АМг6 при ЭДО: $\sigma_{пр}$ — предварительное напряжение; ϵ — относительная деформация

которые появляются при резком снижении сопротивления сплава АМг6 деформированию под действием разряда тока. Эффект проявлялся в виде характерного уменьшения деформирующего усилия на диаграммах растяжения (рис. 2).

Образец, закрепленный в захватах испытательной машины, растягивали до заданного значения и производили разряд с фиксацией падения деформирующего усилия с помощью самописца (входит в состав машины ЦДМ-10) и механического деформометра (на базе измерения $B = 25$ и 100 мм). Исследовали три схемы нагружения образцов:

первая — растяжение выполняли дискретно с остановкой для ЭДО одиночными импульсами тока и фиксацией падения деформирующего усилия;

вторая — аналогично первой схеме, но с компенсацией падения деформирующего усилия со скоростью растяжения $v = 6$ мм/мин;

третья — при непрерывном нагружении обрабатывали материал разрядами тока в процессе возрастания растягивающего усилия до разрушения образца.

Первая схема нагружения образцов отображала механизм напряженного состояния сварных стыковых соединений при ЭДО. При этом упругие растягивающие напряжения ОШЗ моделировали одноосным растяжением образца.

При исследовании характера изменения деформирующего усилия в широком диапазоне предварительного нагружения особое внимание уделяли изучению электродинамического эффекта при предварительных напряжениях, близких по значению к ОН в сварных соединениях сплава АМг6. ЭДО выполняли на следующем режиме: ток на электроде $I_3 = 3500$ А; напряжение на электроде $U_3 = 450$ В; продолжительность воздействия импульса тока $\tau_{имп} = 0,5$ мкс; емкость батареи конденсаторов



$C_{кон} = 1400...2800$ мкФ. Значения предварительного нагружения $\sigma_{пр}$ образцов основного металла и сварных соединений сплава АМгб, а также параметры, характеризующие его изменения в результате ЭДО, представлены в табл. 1.

На основании данных табл. 1 можно заключить, что ЭДО сплава АМгб по первой схеме обработки (серия № 1–3) вызывает в материале дискретное падение деформирующего усилия в исследуемом диапазоне нагружения. В отличие от выводов работ [3, 5], где говорится, что импульсы тока не оказывают влияния на падение усилия растяжения в упругой области нагружения материалов, на образцах серий № 1 и 2, подвергнутых растяжению в диапазоне нагрузок ниже предела пропорциональности, которые в сплаве АМгб составляют 130 МПа, наблюдали дискретное снижение усилия нагружения (15...30 % первоначального). При этом максимальные значения суммарного относительного падения растягивающих напряжений после цикла ЭДО $\Sigma\Delta\sigma_{\%}$ (до 30 %) фиксировали при $\sigma_{пр} = 116,7$ МПа (табл. 1, серия образцов № 2), что близко к реальным значениям

продольных растягивающих напряжений σ_x в сварных соединениях сплава АМгб.

При нагружении образцов серии № 4 выше условного предела текучести (образцы серии № 3) падение деформирующего усилия не превышало 15 %. Причем, чем ближе значения $\sigma_{пр}$ и предела текучести, тем ниже значения $\Sigma\Delta\sigma_{\%}$, определяющие эффективность обработки.

Для каждой серии импульсов анализировали текущее относительное падение растягивающих напряжений после каждого разряда $\Delta\sigma_{\%}$ (табл. 1), которое отражает текущее изменение единичного скачка деформирующего усилия при ЭДО в образцах при каждой серии испытаний. Отмечено, что при обработке образцов по первой схеме максимальное падение усилий растяжения в цикле обработки (50 % общего значения $\Sigma\Delta\sigma_{\%}$) наблюдается во время первого разряда тока в серии импульсов. При последующих воздействиях тока эффективность этого процесса снижается, что объясняется «истощением» дислокационной структуры материала при нагружении его кристаллической решетки [1].

Т а б л и ц а 1. Изменение деформирующего усилия образцов основного металла и сварных соединений сплава АМгб при ЭДО в условиях предварительного растяжения

№ серии образцов	<i>n</i>	$\sigma_{пр}$, МПа	σ_n , МПа	$\Delta\sigma_n$, МПа	$\Delta\sigma_{\%}$, %	$\Sigma\Delta\sigma_{\%}$, %	$C_{кон}$, мкФ
<i>Основной металл</i>							
1	—	52,9	—	—	—	~21	1400
	1		45,8	7,10	13,50		
	2		43,3	2,50	4,70		
	3		41,7	1,60	3,00		
2	—	116,7	—	—	—	~30	1400
	1		104,1	12,60	11,00		
	2		99,1	5,00	4,30		
	3		92,5	6,60	5,70		
	4		86,6	5,90	5,00		
	5		83,3	3,30	3,00		
3	—	258,0	—	—	—	~14	1400
	1		229	29,0	11,20		
	2		224	5,00	2,00		
	3		222	2,00	0,80		
4	—	52,9	—	—	—	~32	2800
	1		40,40	12,50	23,6		
	2		36,25	4,15	7,90		
5	—	116,7	—	—	—	~50	2800
	1		88,34	20,36	24,30		
	2		77,50	10,84	9,30		
	3		70,00	7,50	6,43		
	4		62,90	7,10	6,10		
	5		59,50	3,40	3,00		



№ серии образцов	<i>n</i>	$\sigma_{пр}$, МПа	σ_n , МПа	$\Delta\sigma_n$, МПа	$\Delta\sigma_{\%}$, %	$\Sigma\Delta\sigma_{\%}$, %	$C_{кон}$, мкФ	
<i>Сварное соединение</i>								
6	—	100,0	—	—	—	~57	2800	
	1		70,00	30,0	30,00			
	2		56,67	13,33	13,33			
	3		50,00	6,67	6,67			
	4		45,40	4,60	4,60			
	5		43,50	1,90	1,90			
7	—	80,5	—	—	—	~28	2800	
	1	80,5	58,20	22,30	27,70			
	—	80,5	—	—	—			~17
	1	80,5	66,60	13,90	17,30			
	—	80,5	—	—	—			~14
	1	80,5	69,30	11,20	13,90			
	—	161,0	—	—	—			~22
	1	161,0	125,0	36,00	22,36			
	—	161,0	—	—	—			~17
	1	161,0	133,0	28,00	17,39			
	—	161,0	—	—	—			~19
	1	161,0	130,0	31,00	19,25			
	—	161,0	—	—	—			~19
	1	161,0	130,0	31,00	19,25			
	—	247,0	—	—	—			~21
	1	247,0	194,0	53,00	21,45			
	—	247,0	—	—	—			~19
	1	247,0	200,0	47,00	19,20			
	—	247,0	—	—	—			~17
	1	247,0	205,0	42,00	17,00			
	—	288,6	—	—	—			~17
	1	288,6	238,65	49,95	17,30			
	—	288,6	—	—	—			~16
1	288,6	241,42	47,18	16,34				
—	288,6	—	—	—	~13			
1	288,6	249,75	38,85	13,46				
—	330,0 (перед разрушением)	—	—	—	~16			
1	330,0 (перед разрушением)	277,50	52,50	15,90				
—	291,0	—	—	—				

Проведены также исследования влияния повышения интенсивности ЭДО путем увеличения емкости батареи конденсаторов $C_{кон}$ до 2800 мкФ (табл. 1, образцы серий № 4 и 5). Из данных таблицы видно, что с увеличением $C_{кон}$ как при малых значениях $\sigma_{пр}$ (образцы серии № 4), так и при близких к сварочным, значения $\Sigma\Delta\sigma_{\%}$ возросли в 1,5...1,7 раза. Результаты исследования особенностей ЭДО сварного соединения пред-

ставлены в образцах серии № 6–8 (табл. 1). Значение $\sigma_{пр}$ в образцах серии № 6 (как и в сериях № 2 и 5) выбирали близким к остаточным сварочным напряжениям в сплаве АМгб — 100 МПа. Установлено, что, как и в предыдущих сериях испытаний, при первом воздействии тока на материал $\sigma_{пр}$ уменьшается до 50 %.

На образцах из сплава АМгб с помощью механического деформометра исследовали особен-



№ серии образцов	<i>n</i>	$\sigma_{пр}$, МПа	σ_n , МПа	$\Delta\sigma_n$, МПа	$\Delta\sigma_{\%}$, %	$\Sigma\Delta\sigma_{\%}$, %	$S_{кон}$, мкФ
<i>Сварное соединение</i>							
8	—	110,0	—	—	—	—	2800
	1		72,00	38,00	34,54	~35	
	—	138,7	—	—	—	—	
	1		80,47	58,23	41,98	~42	
	—	163,7	—	—	—	—	
	—		80,47	83,23	50,84	~51	
	—	0	—	—	—	—	
	—	47,0	—	—	—	—	
	1		47,00	0	0	0	
	—	83,25	—	—	—	—	
	1		83,25	0	0	0	
	—	133,20	—	—	—	—	
	1		133,20	0	0	0	
	—	138,75	—	—	—	—	
	1		138,75	0	0	0	
	—	194,25	—	—	—	—	
	1		97,10	97,15	50,01	~50	
	—	0	—	—	—	—	
	—	61,00	—	—	—	—	
	1		61,00	0	0	0	
	—	111,0	—	—	—	—	
	1		111,0	0	0	0	
	—	174,8	—	—	—	—	
	1		174,8	0	0	0	
—	202,5	—	—	—	0		
—		127,65	74,85	36,96	—		
—	219,22	—	—	—	~37		
1		122,26	96,96	44,22			
—	241,42	—	—	—	44		
1		149,85	91,57	37,92	—		
—	0	—	—	—	~38		
		290 (разрушение)					

Примечание. $\sigma_{пр}$ — текущее растягивающее напряжение после разряда; $\Delta\sigma_n = \sigma_n - \sigma_{n+1}$ — текущее падение растягивающих напряжений после каждого разряда; тире — отсутствие импульсов тока.

ности развития пластического течения материала под воздействием серий импульсов тока. На основании полученных данных можно заключить, что значения предварительного нагружения образцов сварного соединений (серия № 6) сопоставимы со значениями нагружений, принятыми для основного металла (образцы серий № 5). Если сравнить значения $\Delta\sigma_{\%}$ у образцов серии № 5 и 6 серий, то у сварных соединений более ярко выражены деформационные процессы, которые оп-

ределяются падением предварительного усилия растяжения за время воздействия первых двух импульсов тока. При сопоставлении значений $\Sigma\Delta\sigma_{\%}$ в основном металле и сварном соединении видно, что у последнего значения указанного параметра больше на 10 %, что можно объяснить более высокой пластичностью металла ОШЗ. Это доказывает, что ЭДО сварных соединений сплава АМг6 более эффективна по сравнению с основным металлом.



На образцах основного металла с помощью механического деформометра определяли особенности развития пластической деформации непосредственно в зоне обработки, т. е. на участке контакта электрода (см. рис. 1) с поверхностью металла. Предварительно в материале рабочей части образца была создана пластическая деформация сжатия, которая составляла около 0,1 %, после чего образцы подвергали растяжению до $\sigma_{пр} = 110$ МПа. Данная силовая схема создает в материале напряженно-деформированное состояние, подобное наблюдаемому в ОШЗ сварных соединений сплава АМгб [5]. Нагруженные образцы подвергали ЭДО по режиму, указанному в табл. 1, при емкости батареи $C_{кон} = 1400$ мкФ. После ЭДО с помощью механического деформометра ($B = 25$ мм) определяли дискретное падение усилия нагружения $\sigma_{пр}$ и соответственно снижение значений относительной деформации ϵ , имеющее место после воздействия разряда тока. Расположение контактных баз прибора на поверхности образца показано на рис. 1. На рис. 3 представлены диаграммы зависимости

$\sigma_{пр} = f(n)$ и $\epsilon = f(n)$ (здесь n — количество разрядов тока в цикле ЭДО). Из рисунка видно, что уже после первого ($n = 1$) импульса тока металл при растяжении ниже предела упругости $\sigma_{уп}$ теряет свои упругие свойства, а при дальнейшей обработке ($n > 2$) находится в упругопластическом состоянии. После завершения цикла ЭДО и снятия нагрузки в металле образуется остаточная пластическая деформация растяжения $\epsilon = 0,1$ %.

При сопоставлении рис. 3, а и б можно заключить, что предварительное пластическое деформирование сплава АМгб в сочетании с последующим упругим нагружением и ЭДО могут формировать в этом материале поля упругопластических деформаций. В то же время напряженно-деформированное состояние ОШЗ сварных соединений сплава АМгб характеризуется наличием пластических деформаций сжатия в сочетании с упругими растягивающими напряжениями. Таким образом, результаты испытаний, представленные на рис. 3, с достаточной степенью достоверности моделируют релаксационные процессы, происходящие в «активной» зоне соединения при его обработке импульсами тока. Формирование в процессе ЭДО полей пластических деформаций растяжения, «обратных» сварочным, может положительно повлиять на снижение общего уровня напряженного состояния сварных соединений.

Проведены измерения снижения эффективности электродинамического воздействия на материал при удалении от зоны обработки. С этой целью выполнены измерения дискретного падения значения $\sigma_{пр}$ с помощью деформометра с переменной базой измерения — $B = 25$ и 100 мм.

Текущие изменения значений относительных деформаций ϵ при ЭДО исследовали исходя из предположения: если ЭДО носит локальный характер, то при каждом токовом разряде дискретному падению растягивающего усилия $\Delta\sigma_{пр}$ будут соответствовать различные значения ϵ ($B = 25$ и 100 мм).

ЭДО образцов проводили на указанном в табл. 1 режиме при $C_{кон} = 2800$ мкФ. При этом образец подвергали предварительному растяжению до 180 МПа, что соответствует упругопластической области деформирования сплава АМгб. Результаты исследований представлены в табл. 2. Из данных таблицы видно, что убывание значений ϵ при ЭДО носит затухающий характер, что согласуется с данными табл. 1 о дискретном падении значений $\sigma_{пр}$. При этом электродинамическое воздействие локализовано в зоне ЭДО (см. рис. 1), поверхность которой подвергали обработке. Так, материал образца в зоне базы измерения $B = 25$ мм после первого импульса тока находился в состоянии развитого пластического течения, а в зоне базы измерения $B = 100$ мм испытывал дефор-

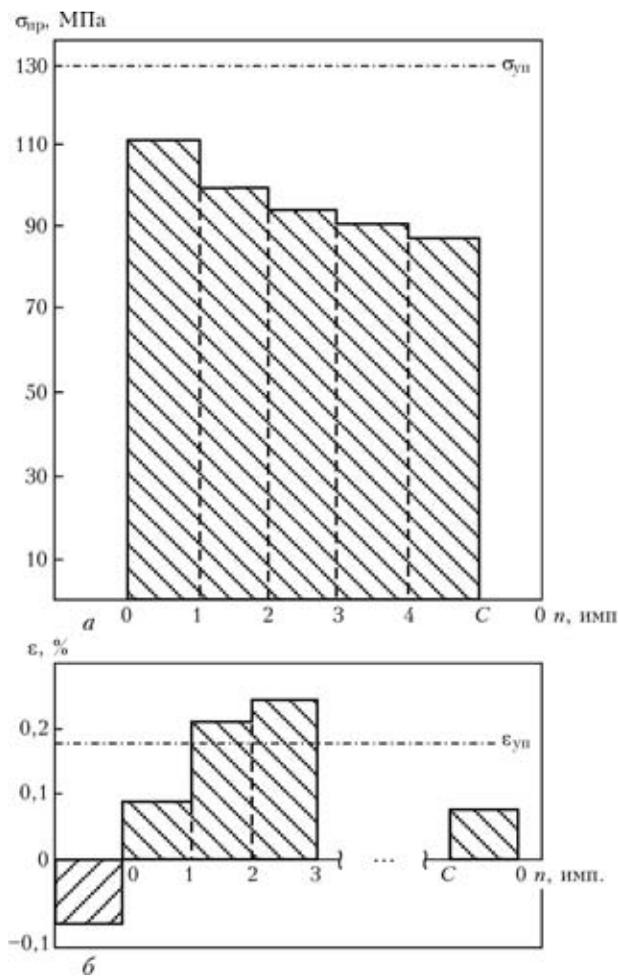


Рис. 3. Падение предварительного деформирующего усилия $\sigma_{пр}$ (а) и изменение относительной деформации ϵ (б) на образцах из сплава АМгб при ЭДО; С — сброс нагрузки после цикла ЭДО; $\sigma_{уп}$ — предел упругости; $\epsilon_{уп}$ — упругая деформация сплава АМгб; ... — данные отсутствуют



Т а б л и ц а 2. Относительные деформации растяжения ε образцов сплава АМг6 при ЭДО при $\sigma_{пр} = 180$ МПа

n	$\Delta\sigma_{пр}$, МПа	ε , %	
		B = 25 мм	B = 100 мм
—	—	0,26	0,27
1	50	0,51	0,16
2	22	0,29	0,07
3	11	0,12	0,05
4	13	0,07	0,06
5	8	—	0,01

мации, незначительно превышающие предел упругости сплава АМг6. При последующих импульсах тока изменение значений ε носит затухающий характер, а разность показаний деформометра при B = 25 и 100 мм свидетельствует о снижении влияния электродинамического эффекта на свойства материала при удалении от зоны ЭДО.

Для изучения особенностей механизма ЭДО проводили обработку материала при нагружении по второй схеме. Для этого использовали образцы стыкового сварного соединения из сплава АМг6 (см. рис. 1). После предварительного упругого растяжения металла в упругопластической области растяжения и воздействия импульсами тока компенсировали падение усилия растяжения, используя при этом подтяжку подвижного захвата разрывной машины до уровня $\sigma_{пр}$. Характер изменения растягивающего усилия $\Delta\sigma_n$ под влиянием ЭДО сварного соединения из сплава АМг6 при компенсации его текущего падения $\Delta\sigma_n$, вызванного электродинамическим воздействием, представлен в табл. 1 (образец серии № 7). На основании данных этой таблицы оценивали изменение единичного скачка деформирующего усилия после восстановления первоначальной нагрузки $\sigma_{пр}$ в различных диапазонах предварительного растяжения. Если допустить, что снижение единичного скачка значений $\sigma_{пр}$ в предыдущих сериях связано в основном с условиями закрепления по первой схеме, т. е. отсутствием возможности реализации перемещений вдоль продольной оси образца, то компенсация падения $\sigma_{пр}$ путем повторной подтяжки должна способствовать стабилизации σ_n после каждого последующего воздействия импульсами тока. В то же время, проанализировав данные (образец серии № 7, табл. 1), можно видеть, что значения $\Delta\sigma_{\%}$ в каждом диапазоне растягивающих нагрузок отличаются друг от друга. Разность в значениях $\Delta\sigma_{пр}$ при первом (n = 1) и последнем (n = 4) разрядах тока при $\sigma_{пр} \cong \cong 161$ МПа, т. е. при нагрузках, близких по своим значениям к максимумам продольных остаточных сварочных напряжений для сплава АМг6, состав-

ляет 25 %. Таким образом, в алюминиевых сплавах ЭДО можно создавать зоны упругопластического деформирования материала, что позволит регулировать напряженное состояние элементов сварных конструкций, находящихся под воздействием эксплуатационных нагрузок. Производство металлических конструкций способом предварительного упругого растяжения в сочетании с ЭДО представляется эффективным для повышения точности их изготовления.

Для изучения влияния режима непрерывного нагружения материала на электродинамический эффект при обработке алюминиевого сплава АМг6 плоский образец основного металла толщиной 4 мм подвергали силовому воздействию по третьей схеме нагружения при скорости деформирования материала v = 6 мм/мин (рис. 4). На основе данных работы [3] можно заключить, что обработка материала образца импульсами тока при его непрерывном растяжении приводит к повышению значений падения деформирующего усилия по сравнению с образцами, подвергнутыми ЭДО в условиях дискретного нагружения по первой схеме.

Для исследования ЭДО в режиме нагружения по третьей схеме образцы подвергали непрерывному растяжению. На первом этапе нагружения $\sigma_{пр} = 110, 139$ и 164 МПа на рабочей поверхности образца инициировали одиночный импульс тока на описанном выше режиме ($C_{кон} = 2800$ мкФ), при этом выполнялась запись скачка деформирующего усилия (рис. 4, а). После завершения серии импульсов тока производили полную разгрузку образца. При повторном нагружении (второй этап) (рис. 4, б) образец подвергали растяжению до 200 МПа, проводя ЭДО одиночными импульсами тока до достижения $\sigma_{пр} = 85, 130$ и 200 МПа. Затем на третьем этапе нагружения (рис. 4, в) выполняли ЭДО до достижения $\sigma_{пр} = 61, 111, 175, 202, 220$ и 242 МПа со сбросом до нуля и последующим растяжением образца до разрушения, наступившего при $\sigma_{пр} = 290$ МПа. Значения падения деформирующего усилия в результате ЭДО при непрерывном растяжении образцов представлены в табл. 1 (образцы серии № 8).

Проанализировав данные табл. 1, можно видеть существенные отличия в характере дискретного падения усилия деформирования сплава АМг6 при третьей схеме нагружения.

Так, сравнив значения $\Delta\sigma_{\%}$ после воздействия первого импульса в образцах серии № 5 ($\sigma_{пр} = 116,7$ МПа), полученного без компенсации растяжения, где $\Delta\sigma_{\%} = 24,30$ %, с образцами серии № 8 ($\sigma_{пр} = 110$ МПа), где $\Delta\sigma_{\%} = 34,54$ %, можно видеть повышение эффективности единичного воздействия тока импульсов при непрерывном растяжении образца. При увеличении нагрузки до

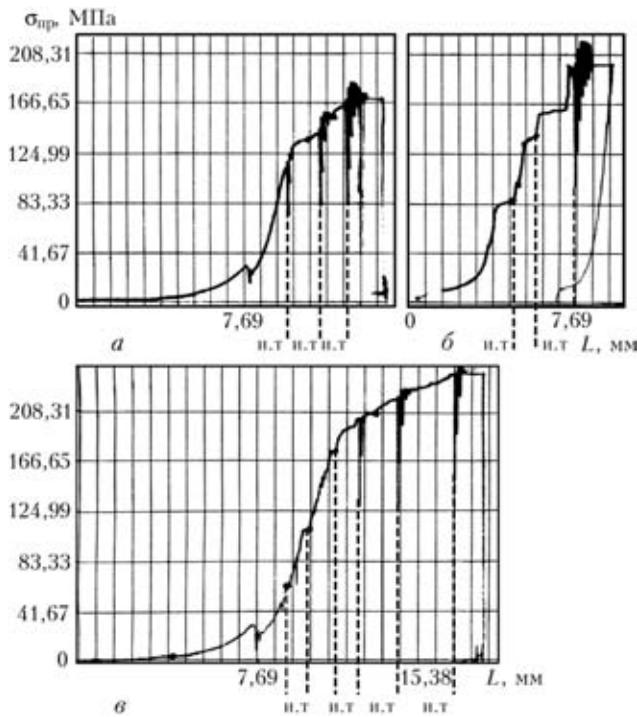


Рис. 4. Кривые релаксации деформирующего усилия $\sigma_{пр}$ на образце из сплава АМг6 при третьей схеме нагружения: а — первый этап нагружения; б — второй; в — третий; и.т — импульс тока; L — расстояние между захватами разрывной машины

163,7 МПа наблюдали дальнейший рост значений деформирующего скачка до $\Delta\sigma_{\%} = 50,84\%$. При сопоставлении этих данных с полученными для образцов серии № 7 для первого токового воздействия при $\sigma_{пр} = 161$ МПа, можно видеть, что в них более низкие значения $\Delta\sigma_{\%}$ — 22,36%. Это можно объяснить тем [1], что при непрерывном деформировании поликристаллических структур в условиях токового воздействия образуются большое количество незавершенных сдвигов дислокаций вдоль полос скольжения (по сравнению с дискретным растяжением), подверженных влиянию импульсов тока.

При непрерывном нагружении образцов серии № 8 изучено влияние ЭДО на особенности падения деформирующего усилия после восстановления $\sigma_{пр}$. Следует отметить, что при достижении $\sigma_{пр} = 163,7$ МПа и сбросе нагрузки до нуля и последующем растяжении образца скачок деформирующего усилия зафиксирован только после превышения первоначальной нагрузки (163,7 МПа) и достижения $\sigma_{пр} = 194,25$ МПа. При последующем нагружении и уменьшении значений $\sigma_{пр}$ до нуля наличие дискретного падения деформирующего усилия зафиксировано только при $\sigma_{пр} \geq 202,5$ МПа.

Отсутствие скачка после повторного нагружения может быть объяснено по аналогии с явлениями, наблюдаемыми при исследовании процесса электроимпульсной обработки титановых спла-

вов [3]. В результате воздействия токового разряда на деформируемый образец происходит перестройка структуры материала, а именно, смещение части дислокаций в новое положение с большим уровнем энергии закрепления дислокаций на стопорах. Чем выше энергия отрыва со стопора (энергия активации) дислокаций, тем больше внешнее растягивающее напряжение, при котором произойдет отрыв дислокаций от стопоров. Таким образом, согласно [3] энергия активации определяется суммированием постоянной составляющей энергии импульса тока и переменной, связанной с непрерывно возрастающей деформацией образца. При повторном нагружении до получения значения $\sigma_{пр}$, меньше первоначального, энергия активации не позволяет инициировать отрыв дислокаций от стопоров, что исключает реализацию скачка деформирующего усилия.

Для изучения на натуральных образцах изменения остаточного напряженного состояния сварных соединений элементов тонкостенных конструкций в результате электродинамического воздействия изготовили плоские образцы из алюминиевого сплава АМг6 размером 450×400×4 и 500×500×3 мм. Пластины сваривали вдоль продольной оси симметрии по описанным выше технологии и режиме. Остаточные напряжения определяли неразрушающим ультразвуковым (УЗ) методом, который основан на зависимости скорости распространения ультразвуковых волн от напряжений в металле [6]. Этот метод позволяет оценивать одно- и двухосное напряженное состояние без нарушения целостности исследуемого объекта.

Особенностью УЗ метода является возможность определения ОН в натуральных конструкциях в ненагруженном и нагруженном состояниях. В настоящих исследованиях нагружением являлось воздействие на металл электродинамическими силами, инициируемыми одиночными импульсами тока.

УЗ метод позволил провести многократные измерения текущих значений ОН после каждого воздействия импульса тока в цикле ЭДО. С помощью указанного метода оценивали эффективность воздействия тока на материал образца путем снижения уровня ОН в зависимости от количества импульсов тока.

Измерения значений ОН проводили в центральном поперечном сечении пластины. Определяли продольную σ_x и поперечную σ_y компоненты плоского напряженного состояния материала образца до и после ЭДО. Обработку вдоль линии сплавления выполняли по всей длине шва. Образец стыкового соединения в процессе ЭДО находился в свободном состоянии без приложения к нему статических нагрузок, что позволило оценить влияние ЭДО на релаксацию сварочных напряжений.

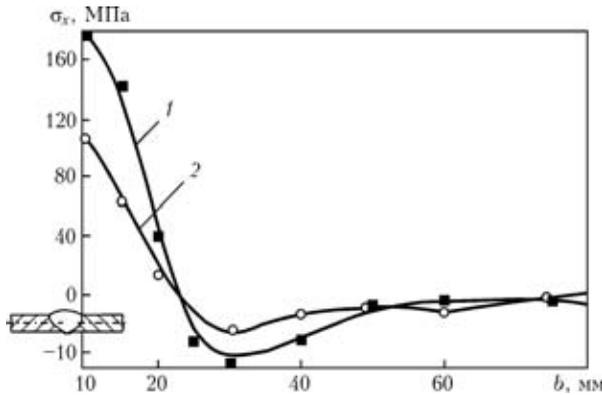


Рис. 5. Распределение продольных σ_x остаточных напряжений в образцах стыковых сварных соединениях сплава АМг6 без обработки (1) и после ЭДО (2); b — ширина шва

Распределение продольных остаточных напряжений после сварки в обработанных и необработанных образцах из сплава АМг6 представлено на рис. 5, из которого видно, что ЭДО сварного соединения способствует снижению продольных ОН σ_x на 45...50%. При этом после ЭДО имело место снижение поперечных ОН σ_y на 60...65% в ОШЗ.

The effect of electrodynamic treatment (EDT) on the stress-strain state of flat specimens of alloy AMg6 at different diagrams of preliminary loading was investigated. The measurement procedure based on the ultrasonic NDT method was developed, and residual stresses in butt welded joints were measured. As established, EDT allows residual stresses in the welded joints on alloy AMg6 to be decreased by 50...65%.

Таким образом, данные, приведенные в настоящей работе, свидетельствуют об эффективности применения ЭДО для регулирования напряженного состояния алюминиевых сплавов АМг6 и их сварных соединений.

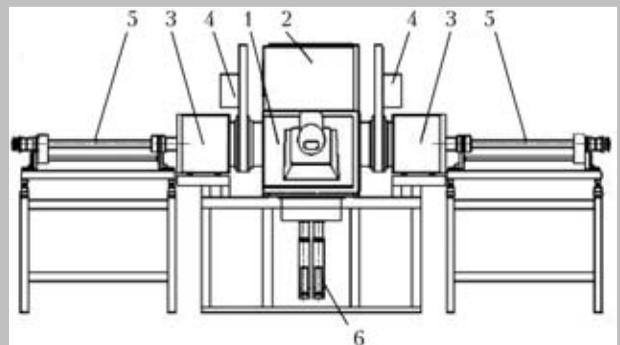
1. *Исследование влияния импульсной обработки на повышение ресурса металлических конструкций* / Л. М. Лобанов, Н. А. Пашин, В. П. Логинов и др. // Автомат. сварка. — 2005. — № 11. — С. 28–32.
2. *Теория электрических аппаратов* / Г. Н. Александров, В. В. Борисов, В. Л. Иванов и др. — М.: Высш. шк., 1985. — 312 с.
3. *Акустическая эмиссия при электроимпульсной деформации титановых сплавов* / Н. А. Семашко, Р. Ф. Крупский, А. В. Купов и др. // *Материаловедение*. — 2004. — № 7 (Спецвыпуск). — С. 29–33.
4. *Влияние электродинамической обработки на напряженно-деформированное состояние теплоустойчивых сталей* / Л. М. Лобанов, Н. А. Пашин, В. М. Скульский // *Автомат. сварка*. — 2006. — № 5. — С. 11–15.
5. *Регулирование термодинамических циклов при сварке листовых конструкций с применением теплопогложителей* / Л. М. Лобанов, В. И. Павловский, В. П. Логинов и др. // *Автомат. сварка*. — 1990. — № 9. — С. 39–49.
6. *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.

Поступила в редакцию 06.05.2006

ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ УСТАНОВКА УЭ-207П

Промышленная установка УЭ-207П предназначена для нанесения всех вариантов защитных покрытий (жаро-, коррозионно- и эрозионностойких, термобарьерных, демпфирующих и др.) путем электронно-лучевого испарения и последующего осаждения паровой фазы на изделия заданной конфигурации, например, лопатки газотурбинных двигателей, а также осаждения функционально-градиентных покрытий.

Установка УЭ-207П в зависимости от конкретных требований может быть укомплектована традиционными испарителями (водоохлаждаемыми тиглями с вертикальными штоками для перемещения испаряемых слитков) и/или многопозиционными испарителями карусельного типа для испарения композиционных слитков при осаждении градиентных покрытий. На рисунке показана блок-схема установки, состоящей из рабочей камеры 1, камеры пушек 2, загрузочных камер 3, вакуумных затворов 4, горизонтального вала и механизма его перемещения и вращения 5 и механизмов подачи испаряемых материалов (слитков) 6.



Контакты: Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11, отд. № 13.

Международный центр электронно-лучевых технологий.

Тел.: (38044) 287 60 41; тел./факс: (38044) 287 31 66.

E-mail: movchan@paton-icebt.kiev.ua; <http://www.paton-icebt.kiev.ua>