

Влияние электроимпульсной составляющей на напряженное состояние сварных соединений алюминиевого сплава АМгб при электродинамической обработке

Л. М. Лобанов^а, Н. А. Пашин^а, О. Л. Миходуй^а, Ю. М. Сидоренко^б

^а Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев, Украина

^б Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского”, Киев, Украина

Остаточные сварочные напряжения негативно влияют на долговечность сварного соединения и являются основной причиной хрупкого разрушения металла – коррозионного растрескивания. Разработка эффективных методов снижения сварочных напряжений, отличающихся малыми энергетическими затратами и простотой реализации, традиционно является важной для современного сварочного производства. Одним из таких методов является электродинамическая обработка, основанная на прохождении импульсов электрического тока через сварное соединение в момент приложения к нему динамической нагрузки. С позиций оптимизации параметров электродинамической обработки представляется целесообразной оценка влияния импульсного электрического тока на остаточные сварочные напряжения. Разработан методика исследования влияния электроимпульсной составляющей электродинамической обработки на напряженное состояние сварных соединений из алюминиевого сплава АМгб. Установлено, что прохождение импульсов электрического тока через металл сварного соединения повышает эффективность электродинамического воздействия на снижение остаточных сварочных напряжений. Показано, что электродинамические воздействия инициируют в металле пластические деформации растяжения, взаимодействие которых с пластическими сварочными деформациями сжатия приводит к снижению остаточных напряжений в сварном соединении. При этом прохождение импульсов электрического тока повышает пиковые значения пластических деформаций растяжения, увеличивая тем самым эффективность электродинамических воздействий на снижение остаточных сварочных напряжений в сплаве АМгб. Полученные результаты подтвердили концепцию физической модели о влиянии электропластического эффекта на снижение напряженного состояния сварных соединений.

Ключевые слова: электродинамическая обработка, алюминиевые сплавы, импульс электрического тока, остаточные сварочные напряжения, пластические деформации, динамическая нагрузка, разрядный контур.

Введение. Электродинамическая обработка (ЭДО) сварных соединений [1] и конструкций [2] при воздействии импульсных электромагнитных полей широко применяется для снижения напряженного состояния изделий из легких сплавов, используемых в авиа- и судостроении.

Механизм ЭДО основан на совместном воздействии импульсного электрического тока (ИЭТ) и динамического давления на сварное соединение посредством контакта рабочего электрода с поверхностью металла в момент разряда емкостного накопителя энергии. При этом в обрабатываемом металле инициируются электроимпульсные процессы, связанные с электропластическим эффектом (ЭПЭ) [3], и динамические, определяемые формированием в материале упругих волн деформаций [4]. В результате совместного протекания электропластических и динамических процессов изменяется напряженное состояние сварных соединений. В то же время вклад электроимпульсной составляющей ЭДО в снижение уровня остаточных сварочных напряжений не изучался. Согласно [5] при реализации электродинамического воздействия плотность ИЭТ j достигает значений, превышающих 1 кА/мм^2 , что позволяет

говорить о влиянии ЭПЭ на напряженное состояние сварных соединений. Исходя из вышеизложенного исследование влияния электроимпульсной составляющей электродинамического воздействия на напряженное состояние сварных соединений представляется достаточно актуальным.

Целью настоящей работы является исследование влияния электроимпульсной составляющей ЭДО на напряженное состояние сварных стыковых соединений алюминиевого сплава АМг6.

Описание методики проводимых экспериментов. Исследовали влияние электроимпульсной составляющей ЭДО на напряженное состояние пластин из сплава АМг6 размерами 400×160×4 и 400×400×2 мм. Режимы автоматической сварки TIG(Ar) пластин представлены в табл. 1. Следует отметить, что выбранные режимы сварки и геометрические характеристики пластин обеспечивали различный исходный уровень остаточных сварочных напряжений. При этом пластинам толщиной $\delta = 2$ мм соответствовал больший уровень напряжений, чем пластинам толщиной 4 мм.

Т а б л и ц а 1

Режимы автоматической сварки TIG(Ar) пластин из сплава АМг6

Размер пластин, мм	Напряжение дуги U_d , В	Сварочный ток $I_{св}$, А	Скорость сварки $V_{св}$, мм/с
400×400×2	20	170	3,3
400×160×4	20	220	5,5

Распределение продольной (относительно линии шва) компоненты остаточных сварочных напряжений σ_x до и после ЭДО, а также пластических деформаций $\epsilon_{пл}$ после ЭДО регистрировали с использованием механического тензометра.

Для генерирования электродинамических воздействий использовали источник импульсного электрического тока (ИИЭТ) со ступенчатой регулировкой индуктивности L , конструкция и принцип работы которого представлены в [5]. Для реализации электродинамических воздействий использовали электродное устройство (ЭУ), внешний вид которого показан на рис. 1. Рабочим органом ЭУ является электрод, торец которого в процессе ЭДО сопрягается с обрабатываемой поверхностью сварного соединения. Электрод закреплен в цанге, установленной в защитном корпусе с ударным механизмом (УМ), обеспечивающим воздействие динамической составляющей ЭДО на сварное соединение. Силовой кабель обеспечивает подключение ЭУ к источнику импульсного электрического тока.

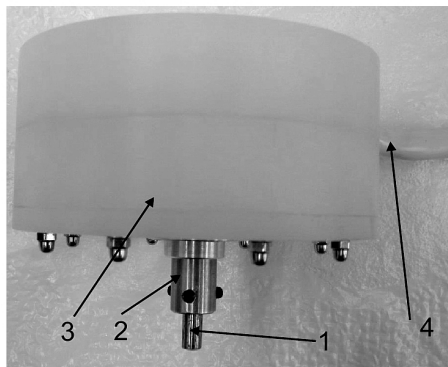


Рис. 1. Внешний вид электродного устройства для ЭДО: 1 – электрод; 2 – цанга; 3 – корпус; 4 – силовой кабель.

Электродинамической обработке подвергали наружную поверхность (рис. 2) и корень сварного шва исследуемых пластин. Обработку выполняли в условиях “жесткого закрепления”, для реализации которого перед ЭДО поверхность пластины фиксировали распределенной нагрузкой q на сборочной плите, исключая возможные угловые деформации образца. При ЭДО на поверхность пластины устанавливали ЭУ и обеспечивали его гарантированный электрический контакт при замыкании разрядного контура. Посредством включения силового ключа K инициировали разряд емкостного накопителя энергии C .

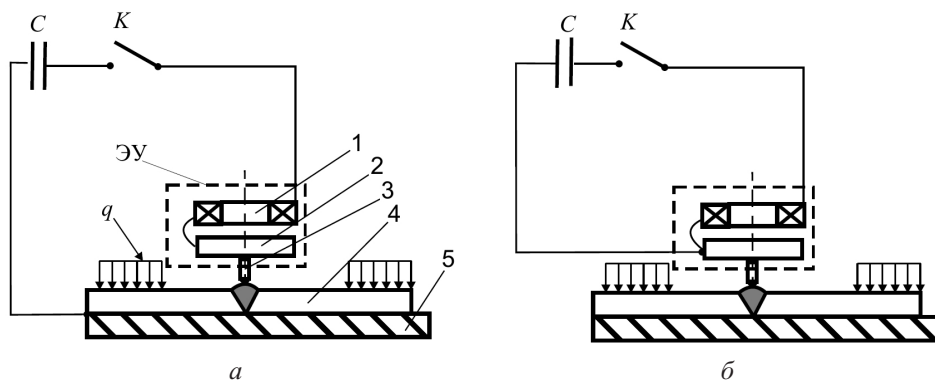


Рис. 2. Электродинамическая обработка сварных соединений из сплава АМг6 при прохождении (а) и без прохождения (б) ИЭТ через пластину: C – емкостной накопитель энергии; K – силовым ключ; q – фиксирующая нагрузка (1 – индуктор; 2 – диск; 3 – электрод; 4 – пластина; 5 – сборочная плита).

Для исследования влияния электроимпульсной составляющей электродинамического воздействия использовали два варианта подключения УМ в составе ЭУ к разрядному контуру. Конструктивно УМ состоит из плоского индуктора и диска из неферромагнитного материала, который жестко связан с электродом (рис. 2). При прохождении ИЭТ через индуктор и диск между ними возбуждаются электродинамические силы отталкивания, что обеспечивает динамическую составляющую воздействия при контактном взаимодействии электрода с обрабатываемым металлом.

В первом варианте подключения (рис. 2,а) разрядный контур замыкали на пластину, обеспечивая тем самым прохождение ИЭТ через обрабатываемый металл и, как следствие, совместное влияние электроимпульсной и динамической составляющих ЭДО на уровень остаточных сварочных напряжений.

Во втором варианте (рис. 2,б) разрядный контур замыкали на диск, исключая прохождение ИЭТ через металл пластины, обеспечивая тем самым влияние только динамической составляющей.

Электродинамическую обработку пластин проводили при напряжении заряда $U_3 = 500$ В и емкости накопителя $C = 6600$ мкФ, перемещая ЭУ по обрабатываемой поверхности с шагом 3–5 мм в направлении “от центра к краям”. Количество электродинамических воздействий обеспечивало электропластическое деформирование обрабатываемого участка.

Использовали три схемы обработки пластин (рис. 3). Согласно первой схеме (рис. 3,а) обработке подвергали наружную поверхность, а также сварной шов со стороны корня. По второй и третьей схемам (рис. 3,б) проводили двустороннюю обработку шва и основного металла соответственно на расстоянии $l = 20$ и 10 мм от центра шва. Сварные пластины размером $400 \times 400 \times 2$ мм обрабатывали только по первой схеме, размером $400 \times 160 \times 4$ мм – по всем трем схемам.

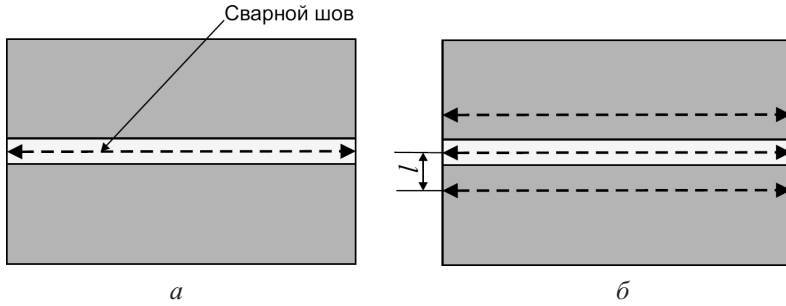


Рис. 3. Схемы ЭДО сварных пластин: а – двусторонняя ЭДО сварного шва; б – двусторонняя ЭДО сварного шва и основного металла на расстоянии $l = 20$ и 10 мм от центра шва.

Результаты экспериментов и их обсуждение. Распределение σ_x в пластинах размером $400 \times 160 \times 4$ мм до ЭДО, а также после динамического и электродинамического воздействия по трем схемам (рис. 3) представлено на рис. 4. Видно, что исходный максимум σ_x не превышает 115 МПа (на рис. 4 кривые 1).

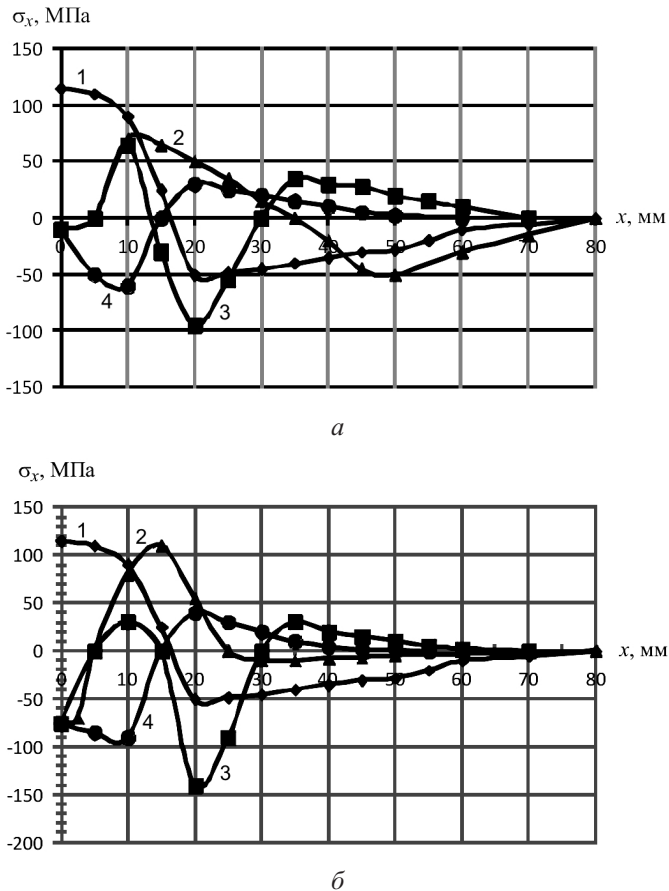


Рис. 4. Распределение σ_x в сварной пластине из сплава АМг6 размером $400 \times 160 \times 4$ мм: а – динамическое воздействие ИЭТ (рис. 2,б); б – электродинамическое воздействие (рис. 2,а) (1 – начальные σ_x ; 2 – после ЭДО центра шва; 3, 4 – после ЭДО центра шва и металла на расстоянии 20 и 10 мм соответственно от линии шва).

При ЭДО в условиях динамического воздействия ИЭТ (рис. 4,а) имеет место локальное понижение σ_x в области обработки с переходом знака напряжений от растяжения к сжатию. В зависимости от схемы приложения воздействия снижение напряжений $\Delta\sigma$ и распределение σ_x имеют свои особенности. Так, в результате ЭДО шва значения σ_x уменьшаются от 115 до -10 МПа ($\Delta\sigma = 125$ МПа) в локальной области, полуширина которой не превышает 10 мм (на рис. 4,а кривая 2). На необработанном участке основного металла ширина области растяжения увеличивается, уравновешивая составляющую сжатия в центре шва. На участке, обработанном в области сжатия на расстоянии 20 мм от центра шва (на рис. 4,а кривая 3), характер распределения σ_x синусоидальный, а начальный уровень сжимающих напряжений σ_x понижается от -50 (кривые 1) до -100 МПа, что уравновешивается растягивающими напряжениями σ_x , которые монотонно уменьшаются до нуля к краю пластины. Анализ распределения σ_x на кривых 3 (рис. 4) показывает, что высокоградиентный характер динамического воздействия требует большей локализации области ЭДО в зоне сварного шва для заметного снижения начальных значений σ_x в околосшовной зоне. Это достигается при ЭДО центра шва и основного металла пластины на расстоянии 10 мм от него (на рис. 4,а кривая 4), что позволяет снизить начальный уровень σ_x от 90 до -60 МПа ($\Delta\sigma = 150$ МПа).

Сравнение значений $\Delta\sigma$, полученных при ЭДО центра шва (125 МПа) и металла пластины (150 МПа) на расстоянии 10 мм от центра шва, свидетельствует о том, что $\Delta\sigma$ в удаленной от шва зоне выше, что не соответствует данным работы [6], где показано, что ЭДО шва более эффективна, чем основного металла. Это обусловлено наличием усиления на наружной поверхности и в корне шва, что приводит к увеличению толщины δ обрабатываемого металла шва с 4 до 6 мм, в то время как согласно [6] эффективность ЭДО понижается с ростом δ .

Взаимодействие между динамической и электроимпульсной составляющими ЭДО показывает, что последняя вносит заметный вклад в снижение начальных напряжений по сравнению с чисто динамическим воздействием, при этом качественный характер распределения продольной компоненты σ_x по ширине пластины не изменяется (рис. 4,б). Так, при ЭДО шва (на рис. 4,б кривая 2) начальные значения σ_x уменьшаются от 115 (кривая 1) до -75 МПа ($\Delta\sigma = 190$ МПа), уравновешивая сжимающие напряжения в центре шва за счет повышения уровня растягивающих до 115 МПа на необработанной части пластины. На участке, обработанном в области сжатия на расстоянии 20 мм от центра шва (на рис. 4,б кривая 3), распределение σ_x аналогично показанному на рис. 4,а (кривая 3). Сравнение кривых 3 на рис. 4,а и 4,б свидетельствует о том, что начальный уровень сжимающих напряжений σ_x понижается от -50 до -150 МПа. Электродинамическая обработка шва и основного металла на расстоянии 10 мм от шва (на рис. 4,б кривая 4) позволяет снизить начальный уровень σ_x от 90 до -100 МПа ($\Delta\sigma = 190$ МПа), что выше, чем при ЭДО центра шва.

Исследовали распределение остаточных пластических деформаций $\varepsilon_{пл}$, инициируемых ЭДО в пластине, обработанной в центре шва и по основному металлу на расстоянии 20 мм от линии шва (рис. 3,б). Распределение σ_x , соответствующих данной схеме ЭДО, приведено на рис. 4,б (кривая 3). Из рис. 5, где представлено распределение $\varepsilon_{пл}$, видно, что ЭДО инициирует в области обработки поля пластических деформаций растяжения величиной 0,75...0,82%, взаимодействие которых с пластическими сварочными деформациями сжатия $\varepsilon_{пл}^{св}$, не превышающими, как известно, $-0,2\%$, обеспечивает доминирование деформаций растяжения $\varepsilon_{пл}$ и, как следствие, формирование полей сжимающих напряжений σ_x в области электродинамического воздействия.

Исследовали влияние электроимпульсной составляющей ЭДО на распределение σ_x при большем уровне начальных напряжений по сравнению с представленными на

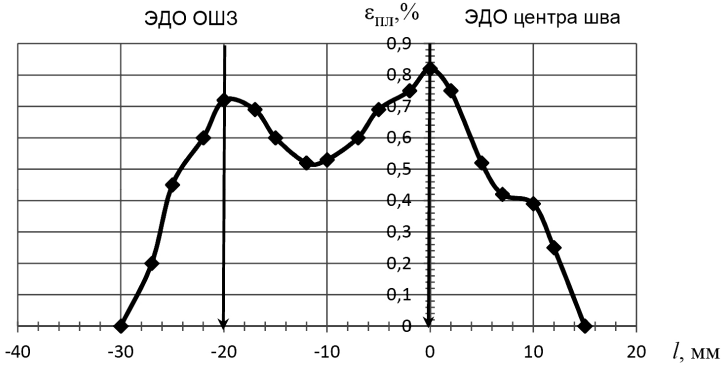


Рис. 5. Распределение пластических деформаций $\varepsilon_{пл}$ после ЭДО в поперечном сечении сварной пластины из сплава АМг6 размером $400 \times 160 \times 4$ мм (стрелками указаны области ЭДО; 0 – центр шва; ОШЗ – околосшовная зона).

рис. 4 (кривые 1). Изучали распределение σ_x в поперечном сечении пластины размером $400 \times 400 \times 2$ мм после двусторонней ЭДО шва при прямом пропускании ИЭТ через обрабатываемый металл (рис. 2,а), а также при динамическом воздействии на область обработки (рис. 2,б).

Распределение σ_x при начальном уровне, а также после динамического и электродинамического воздействия представлено на рис. 6. Видно, что исходный уровень σ_x достигает 165 МПа (кривая 1), что существенно больше, чем это следует из данных на рис. 4 (кривые 1).

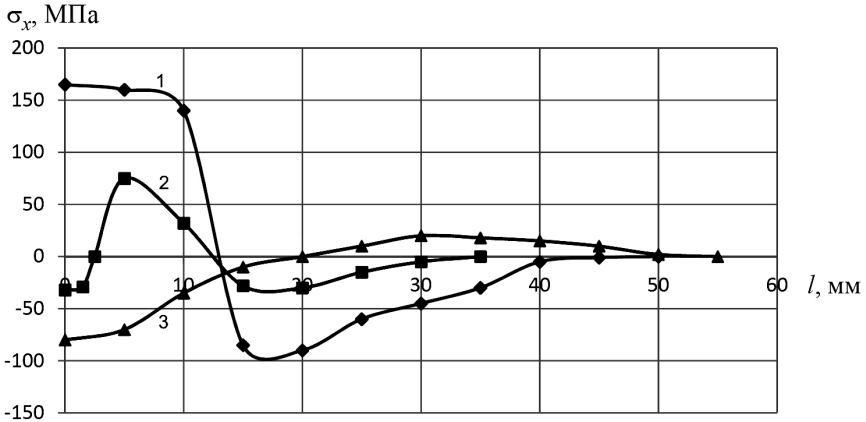


Рис. 6. Распределение σ_x в поперечном сечении сварной пластины из сплава АМг6 размером $400 \times 400 \times 2$ мм: 1 – начальные σ_x ; 2 – после двусторонней ЭДО шва при динамическом воздействии; 3 – после ЭДО шва при электродинамическом воздействии.

После ЭДО в условиях динамического воздействия, как и для большей толщины пластин (на рис. 4,а кривая 2), имеет место локальное понижение σ_x в области обработки с переходом знака напряжений от растяжения к сжатию. При этом в результате ЭДО значения σ_x уменьшаются от 165 до -30 МПа ($\Delta\sigma = 195$ МПа) на участке полушириной не выше 5 мм (на рис. 6 кривая 2), на границе которого уровень σ_x также понижается до 80 МПа. Сравнение данных, приведенных на рис. 6 с таковыми на рис. 4,а, где при ЭДО центра шва $\Delta\sigma = 125$ МПа, показывает, что с уменьшением толщины пластин δ с 4 до 2 мм эффективность воздействия повышается, что подтверждают полученные ранее [6] результаты.

После ЭДО в условиях электродинамического воздействия (на рис. 6 кривая 3) значения σ_x уменьшаются по сравнению с таковыми при динамическом воздействии, что подтверждают результаты, приведенные для пластины толщиной 4 мм (на рис. 4,б кривая 2). При ЭДО шва уровень начальных напряжений σ_x уменьшается от 165 до -85 МПа ($\Delta\sigma = 250$ МПа), что незначительно выше их уровня в центре шва по сравнению с полученными в предыдущем эксперименте, где $\sigma_x = -75$ МПа (на рис. 4,б кривая 2). В данном случае абсолютное снижение σ_x по сравнению с предыдущим экспериментом незначительное, что определяется уровнем начальных напряжений, составляющих соответственно 165 и 115 МПа. В то же время сравнение значений $\Delta\sigma$ для пластин толщиной 2 и 4 мм, равных 250 и 190 МПа соответственно, подтверждает факт роста эффективности ЭДО с уменьшением толщины пластин, что согласуется с результатами [6]. Сравнение кривых 2 и 3 на рис. 6 показывает, что электродинамическое воздействие повышает эффективность ЭДО. Это выражается в уменьшении пиковых значений σ_x с -30 МПа при чисто динамическом воздействии до -85 МПа при взаимодействии динамической и электроимпульсной составляющих ЭДО.

Распределение остаточных пластических деформаций $\varepsilon_{пл}$ в поперечном сечении пластины толщиной 2 мм (рис. 7), соответствующее распределению σ_x (рис. 6), также подтверждает доминирование воздействий, инициируемых ЭДО при взаимодействии динамической и электроимпульсной составляющих по сравнению с динамической. Анализ данных на рис. 7 показывает, что ЭДО инициирует в области обработки поля пластических деформаций растяжения и, как следствие, формирование полей сжимающих σ_x (на рис. 6 кривые 2, 3). При этом пиковые значения $\varepsilon_{пл}$ при динамическом воздействии достигают 0,6%, при электроимпульсном – 1,05% (рис. 7).

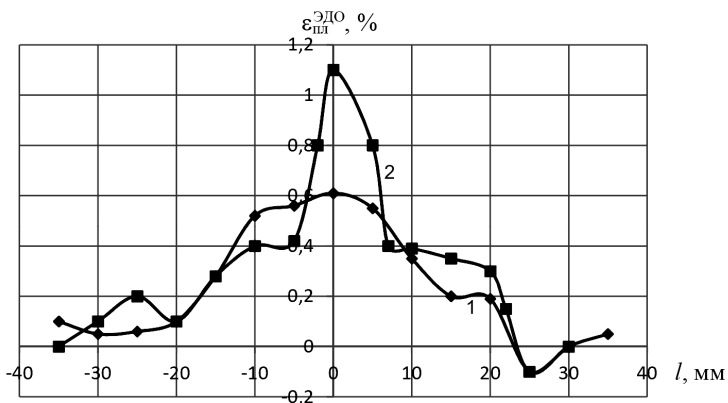


Рис. 7. Распределение остаточных пластических деформаций $\varepsilon_{пл}$ в поперечном сечении сварной пластины из сплава АМгб размером $400 \times 400 \times 2$ мм после двусторонней ЭДО центра шва: 1 – динамическое воздействие; 2 – электродинамическое.

Рассматривая полученные результаты с позиций физической модели ЭДО, основанной на теории электрон-дислокационного взаимодействия [3, 7–9], можно заключить, что из-за отсутствия ЭПЭ полученное при динамическом воздействии значение $\varepsilon_{пл}$ меньше, чем при электродинамическом (рис. 7). В этом случае величина $\varepsilon_{пл}$ определяется только срывом дислокационных группировок со стопоров, инициирующим механизмом скольжения поликристаллической структуры металла. При наличии электроимпульсной составляющей воздействия ИЭТ, проходящей через область ЭДО, обеспечивает дрейф освобожденных в результате динамической нагрузки дислокаций вследствие их взаимодействия с электронами проводимости, увеличивая при этом значение $\varepsilon_{пл}$ (на рис. 7 кривая 2).

Т а б л и ц а 2

Эффективность ЭДО шва сварных пластин из сплава АМг6 толщиной 2–4 мм при динамическом и электродинамическом воздействии

δ , мм	σ_x ,* МПа	Динамическое			Электроимпульсное		
		$\sigma_{\text{ЭДО}}$, МПа	$\Delta\sigma$, МПа	$\varepsilon_{\text{пл}}$, %	$\sigma_{\text{ЭДО}}$, МПа	$\Delta\sigma$, МПа	$\varepsilon_{\text{пл}}$, %
4	115	–10	125	–	–75	180	0,82
2	165	–30	195	0,6	–85	250	1,05

Примечание. Звездочкой отмечены напряжения σ_x , соответствующие начальным продольным (относительно линии шва) напряжениям σ_x на рис. 4 и 6.

Проводили сравнение результатов испытаний по оценке эффективности воздействия чисто динамической нагрузки с таковыми, полученными в условиях ее взаимодействия с ИЭТ, после обработки шва сварных пластин из сплава АМг6 толщиной 2–4 мм при различном начальном уровне напряжений σ_x (рис. 4, 6). Сравнение приведенных в табл. 2 данных представляется корректным, так как рассматриваемые пластины обрабатывали в условиях одинакового режима. Видно, что электроимпульсная составляющая повышает эффективность ЭДО, что выражается в меньших значениях напряжений после обработки $\sigma_{\text{ЭДО}}$ и больших значениях $\Delta\sigma$, полученных при взаимодействии между динамической и электроимпульсной составляющими ЭДО. Этот факт подтверждают данные по $\varepsilon_{\text{пл}}$ для пластин толщиной 2 мм (табл. 2). Таким образом, прохождение ИЭТ через металл сварных соединений повышает эффективность ЭДО, что выражается в снижении остаточных напряжений.

Выводы

1. Разработана методика исследования влияния электроимпульсной составляющей электродинамической обработки на напряженное состояние сварных соединений из алюминиевого сплава АМг6, основанная на прохождении импульсного электрического тока через обрабатываемый металл.

2. Установлено, что прохождение ИЭТ через металл сварных соединений повышает эффективность снижения в них остаточных напряжений в результате ЭДО.

3. Показано, что электродинамические воздействия инициируют в металле пластические деформации растяжения. В результате взаимодействия последних с пластическими сварочными деформациями сжатия уменьшаются остаточные напряжения в сварном соединении. При этом прохождение ИЭТ повышает пиковые значения пластических деформаций растяжения, увеличивая тем самым эффективность электродинамических воздействий для снижения остаточных сварочных напряжений в сплаве АМг6.

4. Результаты оценки распределений остаточных напряжений, полученных после ЭДО, реализующей динамическое, а также динамическое и электроимпульсное воздействия, подтвердили концепцию физической модели о влиянии электропластического эффекта на снижение напряженного состояния сварных соединений.

Резюме

Залишкові зварювальні напруження негативно впливають на довговічність зварного з'єднання і є основною причиною крихкого руйнування металу – корозійного розтріскування. Розробка ефективних методів зниження зварювальних напружень, що характеризуються малими енергетичними затратами і простотою реалізації, тради-

ційно є важливою для сучасного зварювального виробництва. Одним із таких методів є електродинамічна обробка, що базується на проходженні імпульсів електричного струму через зварне з'єднання в момент прикладання до нього динамічного навантаження. Із позицій оптимізації параметрів електродинамічної обробки доцільною є оцінка впливу імпульсного електричного струму на залишкові зварювальні напруження. Розроблено експериментальну методику дослідження впливу електроімпульсної складової електродинамічної обробки на напружений стан зварних з'єднань із алюмінієвого сплаву АМг6. Встановлено, що проходження імпульсів електричного струму через метал зварного з'єднання підвищує ефективність електродинамічної обробки щодо зниження залишкових зварювальних напружень. Показано, що електродинамічні впливи ініціюють у металі пластичні деформації розтягування, результатом взаємодії яких із пластичними зварювальними деформаціями стискання є зниження залишкових напружень у зварному з'єднанні. При цьому проходження імпульсів електричного струму підвищує пікові значення пластичних деформацій розтягування, збільшуючи тим самим ефективність електродинамічних впливів на зниження залишкових зварювальних напружень у сплаві АМг6. Отримані результати підтвердили концепцію фізичної моделі про вплив електропластичного ефекту на зниження напруженого стану зварних з'єднань.

1. Lobanov L. M., Pashchin N. A., Mikhoduy O. L., and Khokhlova J. A. Investigation of residual stress in welded joints of heat-resistant magnesium alloy ML10 after electrodynamic treatment. *J. Magn. Alloy*. 2016. 4, No. 2. P. 77–82.
2. Lobanov L. M., Pashchin N. A., and Mikhoduy O. L. Repair the AMg6 aluminum alloy welded structure by the electric processing method. *Weld Res. Appl.* 2014. No. 1. P. 55–62.
3. Баранов Ю. В., Троицкий О. А., Аврамов Ю. С. Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы. М.: МГИУ, 2001. 844 с.
4. Белова М. М., Проценко С. С., Иванов А. В. Динамика деформирования упруго-пластического слоя при импульсном энерговыделении. *Пробл. прочности*. 1987. № 12. С. 87–91.
5. Звіт про науково-дослідну роботу (заключний) по проекту Р 7.3.1 “Розробити технологію та обладнання для оперативного неруйнівного визначення залишкових напружень в зварних конструкціях на основі застосування локального імпульсу струму і електронної спекл-інтерферометрії”. № держ. реєстрації 0113U003481. Київ: Ін-т електрозварювання ім. Є. О. Патона, 2015.
6. Лобанов Л. М., Пашчин Н. А., Миходуй О. Л. Эффективность электродинамической обработки сварных соединений сплава АМг6 различной толщины. *Автомат. сварка*. 2012. № 3. С. 12–16.
7. Стрижало В. А., Новогрудский Л. С., Воробьев Е. В. Прочность материалов при криогенных температурах с учетом воздействия электромагнитных полей. Киев: Ин-т проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, 2008. 504 с.
8. Кравченко В. Я. Воздействие направленного потока электронов на движущиеся дислокации. *Журн. exper. и теорет. физики*. 1967. 51, вып. 6. С. 1676–1688.
9. Троицкий О. А., Калымбетов П. У. Зависимость электропластического эффекта в цинке от длительности отдельных импульсов. *Физика металлов и металловедение*. 1981. 51, вып. 5. С. 1056–1059.

Поступила 20. 07. 2016