

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СПЛАВА АМГ6

Л.М. Лобанов, Н.А. Пашин, А.Н. Тимошенко, О.Л. Миходуй, П.В. Гончаров, А.В. Черкашин  
ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Исследовали влияние параметров, определяющих различную длительность электродинамического воздействия, на снижение уровня остаточных напряжений в сварных швах стыковых соединений алюминиевого сплава АМГ6 в результате электродинамической обработки. Показано, что возрастание длительности электродинамического воздействия, достигаемое увеличением индуктивности разрядного контура при постоянстве амплитудных значений импульсного электрического тока, характеризуется большим увеличением времени затухания тока по сравнению с периодом его нарастания. При этом возрастание длительности электродинамического воздействия приводит к повышению эффективности метода для снижения уровня остаточных напряжений в сварных соединениях сплава АМГ6. Отмечено, что при длительности  $t \geq 0,7$  мс снижение напряжений определяется интенсивностью электродинамического воздействия и джоулевым нагревом поверхности пластины. Библиогр. 5, табл. 1, рис. 4.

*Ключевые слова:* электродинамическая обработка, алюминиевые сплавы, импульс электрического тока, остаточные сварочные напряжения, длительность электродинамического воздействия

Методы обработки металлических материалов и сварных соединений воздействием импульсных электромагнитных полей с начала 2000-х годов получили распространение при регулировании напряженного состояния элементов конструкций [1].

Одним из таких методов является электродинамическая обработка (ЭДО), основанная на совместном воздействии импульсного электрического тока и динамического давления на сварное соединение. Электродинамическое воздействие на металл при ЭДО реализуется посредством контакта рабочего электрода с поверхностью металла в момент разряда емкостного накопителя энергии. В результате совместного воздействия динамической нагрузки и импульсного электрического тока (ИЭТ) в обрабатываемом металле инициируются электроимпульсные процессы, связанные с электропластическим эффектом (ЭПЭ) [1], а также динамические процессы, определяемые формированием в материале упругих волн деформаций. Результатом совместного протекания электропластических и динамических процессов является изменение напряженного состояния сварных соединений. Проводили исследования по оценке влияния на эффективность обработки таких параметров электродинамического воздействия, как зарядное напряжение и емкость накопителя, амплитудные значения импульсного тока и динамического давления [2]. При этом системные исследования влияния длительности электродинамических воздействий на эффективность ЭДО до настоящего времени не проводились. Хотя, согласно данным работ [3, 4], длительность электро-

импульсного и динамического воздействий, совместно определяющих управляющий механизм ЭДО, влияет на уровень напряженного состояния в конструкционных материалах. Исходя из сказанного выше, изучение влияния длительности электродинамических воздействий на напряженное состояние сварных соединений представляется достаточно актуальным.

Целью настоящей работы являлось исследование влияния длительности электродинамического воздействия при ЭДО, а также параметров, ее определяющих, на напряженное состояние сварных соединений алюминиевого сплава АМГ6.

**Методика проводимых экспериментов.** Исследовали влияние длительности воздействия при ЭДО на напряженное состояние образцов сварных стыковых соединений сплава АМГ6 размерами  $400 \times 100 \times 2$  мм, выполненных автоматической сваркой ТИГ (Аг) при значениях напряжения дуги, сварочного тока и скорости процесса соответственно:  $U_{св} = 20$  В,  $I_{св} = 170$  А и  $v_{св} = 5,5$  мм/с.

Для генерирования электродинамических воздействий использовали источник импульсного электрического тока (ИИЭТ) с переменной индуктивностью  $L$ , конструкция которого создана на базе разрядно-конденсаторных систем. Ступенчатое регулирование индуктивности позволяет изменять длительность ИЭТ  $t$  и, как следствие, интенсивность электродинамических воздействий [2].

Для реализации ЭДО использовали электродное устройство (ЭУ), внешний вид которого показан на рис.1. Рабочим органом ЭУ является

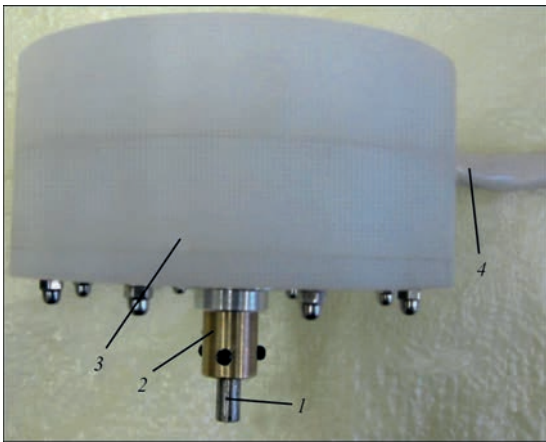


Рис. 1. Электродное устройство для ЭДО (обозначения см. в тексте)

электрод 1, торец которого в процессе ЭДО контактирует с обрабатываемой поверхностью сварного соединения. Электрод закреплен в цанге 2, установленной в защитном корпусе 3, содержащем устройство, обеспечивающее воздействия электроимпульсной и динамической составляющих ЭДО на сварное соединение. Силовой кабель 4 обеспечивал подключение ЭУ к ИИЭТ.

Проводили ЭДО (рис. 2) наружной поверхности и корня сварного шва исследуемых образцов. Обработку выполняли в условиях «жесткого закрепления», для реализации которого перед ЭДО поверхность пластины 2 фиксировали распределенной нагрузкой  $q$  на сборочной плите 3, исключая возможные угловые деформации образца. Данная схема фиксации, согласно [5], обеспечивает максимальную эффективность электродинамического воздействия, при прочих равных параметрах режима ЭДО. Для реализации ЭДО на поверхность сварного шва устанавливали ЭУ 1 и обеспечивали его гарантированный электрический контакт при замыкании разрядного контура.

Посредством включения силового ключа К инициировали разряд емкостного накопителя энергии  $C$  через ЭУ в обрабатываемый материал. Временные распределения импульсного тока  $I$  ре-

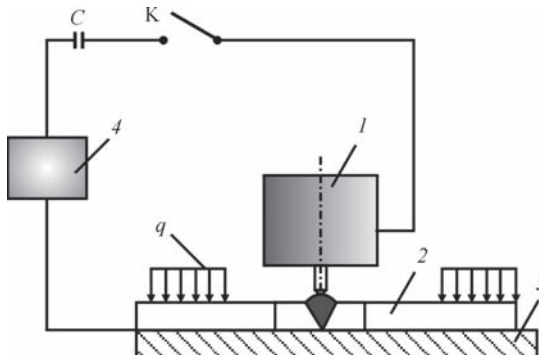


Рис. 2. ЭДО образцов сварных соединений сплава АМгб при «жестком» закреплении:  $C$  — емкостной накопитель энергии;  $K$  — силовой ключ;  $q$  — фиксирующая нагрузка; 1 — ЭУ; 2 — образец; 3 — сборочная плита; 4 — датчик Холла

гистрировали с использованием датчика Холла 4, встроенного в разрядный контур, как показано на рис. 3. В процессе выполнения ЭДО ЭУ перемещали по обрабатываемой поверхности сварного шва с шагом 3 мм. Количество электродинамических воздействий обеспечивало электропластическое деформирование обрабатываемого участка.

Исследовали влияние параметров ЭДО на изменение продольной (вдоль линии шва) компоненты  $\sigma_x$  остаточного напряженного состояния сварных пластин сплава АМгб при равных амплитудных значениях импульсного тока  $I$  и вариациях  $t$ . Равенство значений  $I$  при различной длительности воздействия  $t$ , задаваемой изменением  $L$ , обеспечивали нарастанием значений напряжения заряда  $U_3$ . В качестве базового амплитудного значения импульсного тока  $I$  выбирали  $I = 1,0$  кА. Следствием возрастания  $U_3$  явилось увеличение запасенной энергии заряда  $E_3$ .

Методом электронной спекл-интерферометрии определяли значения  $\sigma_x$  в центре шва сварных пластин в исходном состоянии и после ЭДО [2].

**Результаты экспериментов и их обсуждение.**

Режимы ЭДО пластин при нарастании значений  $L$  и  $U_3$ , обеспечивающих  $I = 1,0$  кА при сопутствующем увеличении длительности воздействия  $t$  и запасенной энергии  $E_3$ , представлены в таблице.

Временные распределения импульсного тока  $I$  равной амплитуды, соответствующие различной длительности воздействия  $t$ , представлены на рис. 3. Анализируя данные таблицы и рис. 3, можно видеть, что увеличение  $L$  приводит к нарастанию  $t$ . При этом нарастание  $L$  в большей степени влияет на время затухания и продолжительность  $t$  ИЭТ, чем на время его нарастания, что особенно заметно при сравнении кривых 2 и 3. В то же время, согласно [4], именно в фазе нарастания динамическое воздействие наиболее заметно влияет на напряженно-деформированное состояние металлических материалов.

Значение  $\sigma_x$  в центре шва в исходном состоянии (без ЭДО) определяется столбцом 4 на рис. 4,

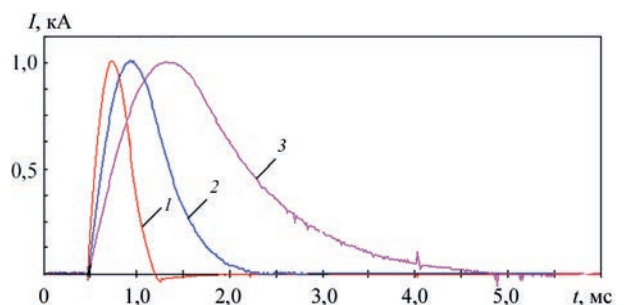


Рис. 3. Временные распределения импульсного тока  $I$  равной амплитуды при ЭДО сварных пластин из сплава АМгб размерами  $400 \times 100 \times 2$  мм, где номера кривых соответствуют номерам строк таблицы

Параметры ЭДО сварных пластин из сплава АМг6 размерами 400×100×2 мм

Но- мер п/п	Индук- тивность $L$ , мкГн	Напряже- ние ИЭТ $U_3$ , В	Ампли- туда ИЭТ $I$ , кА	Длитель- ность ИЭТ $t$ , мс	Энергия ИЭТ $E_3$ , Дж
1	5,3	185	1,0	0,7	94
2	20	388	1,0	1,75	413
3	71,5	726	1,0	4,5	1449

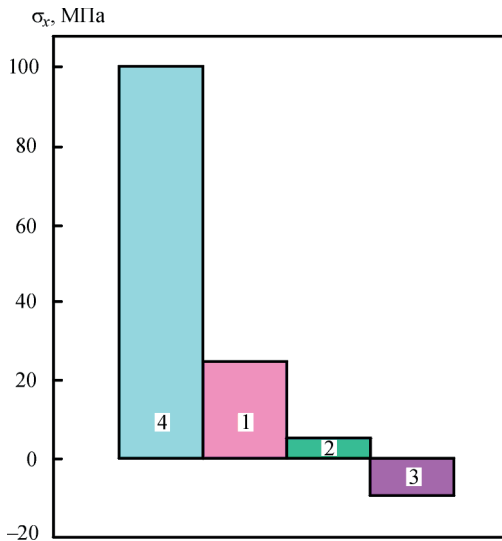


Рис. 4. Пиковые значения напряжений  $\sigma_x$  в центре шва сварной пластины из сплава АМг6 размерами 400×100×2 мм, где номера столбцов 1–3 значений  $\sigma_x$  соответствуют номерам кривых на рис. 3 (столбец 4 —  $\sigma_x$  без ЭДО)

из которого можно видеть, что начальный уровень остаточных сварочных напряжений достигал 100 МПа. Низкий уровень  $\sigma_x$  до обработки объясняется малой шириной используемых пластин.

При ЭДО на режиме, соответствующему минимальной индуктивности (рис. 3, кривая 1) имеет место снижение напряжений в зоне обработки до 22 МПа (столбец 1). При увеличении  $L$  (кривая 2)  $\sigma_x$  в зоне обработки понижается практически до нулевых значений (столбец 2). При дальнейшем увеличении  $L$  (кривая 3) напряжения переходят в область сжатия, а значения  $\sigma_x$  близки к -10 МПа (столбец 3). Анализируя данные таблицы и рис. 3, 4, можно заключить, что с нарастанием  $L$  эффективность воздействия увеличивается.

Следует отметить, что возрастание эффективности ЭДО определяется нарастанием значений  $E_3$ , необходимых для соблюдения условия  $I = 1$  кА при больших значениях  $L$ , и соответственно, более длительном периоде  $t$ . Кроме того, при ЭДО на режимах, соответствующих строкам 2 и 3 таблицы, имело место локальное оплавление металла в зоне контактного взаимодействия электрода с обрабатываемой поверхностью пластины вследствие джоулевого нагрева [1]. Таким образом, можно заключить, что при ЭДО длительностью

$t > 0,7$  мс, снижение уровня остаточных сварочных напряжений определяется электродинамическим воздействием в условиях локального джоулевого нагрева поверхности пластины.

Следует отметить, что позитивное воздействие ЭДО на напряженное состояние сварных пластин в условиях высоких уровней энергии ИЭТ сопровождается не только нагревом, но и локальным повреждением обрабатываемой поверхности, которое негативно влияет на циклическую прочность сплава АМг6 [5]. Таким образом, можно сделать вывод, что повышение температуры в зоне воздействия ИЭТ при исключении его негативного влияния на качество поверхности может увеличить эффективность ЭДО. Поэтому представляется перспективным применение ЭДО непосредственно в процессе сварки, что будет являться направлением наших дальнейших исследований.

### Выводы

1. На базе разработанной методики исследовано влияние параметров электродинамического воздействия на снижение уровня остаточных напряжений сварных соединений алюминиевого сплава АМг6 в результате ЭДО.

2. Установлено, что повышение уровня энергии электродинамического воздействия приводит к возрастанию эффективности ЭДО для регулирования уровня остаточных напряжений в сварных швах стыковых соединений сплава АМг6. Показано, что при длительности токового импульса более 0,7 мс уровень напряжений определяется интенсивностью обработки в условиях джоулевого нагрева.

3. Целесообразно проведение дальнейших исследований по определению эффективности применения ЭДО непосредственно в процессе сварки.

### Список литературы

1. Баранов Ю.В., Троицкий О.А., Аврамов Ю.С., Шляпин А.Д. (2001) *Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы*. Москва, МГИУ.
2. Лобанов Л.М., Кондратенко И.П., Пашин Н.А. и др. (2012) Эффективность электродинамической обработки алюминиевого сплава АМг6 и его сварных соединений. *Автоматическая сварка*, **1**, 3–7.
3. Стрижало В.А., Новогрудский Л.С., Воробьев Е.В. (2008) *Прочность материалов при криогенных температурах с учетом воздействия электромагнитных полей*. Киев, ИПШ.
4. Белова М.М., Проценко С.С., Иванов А.В. (1987) Динамика деформирования упругопластического слоя при импульсном энерговыделении. *Проблемы прочности*, **1**, 87–91.
5. Лобанов Л.М., Пашин Н.А., Ящук В.А., Миходуй О.Л. (2015) Влияние электродинамической обработки на сопротивление разрушению алюминиевого сплава АМг6 при циклическом нагружении. *Там же*, **3**, 91–98.

References

1. Baranov, Yu.V., Troitsky, O.A., Avramov, Yu.S., Shlyapin, A.D. (2001) *Physical principles of electropulse and electroplastic treatments*. Moscow, MGU [in Russian].
2. Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Cherkashin, A.V. et al. (2012) Efficiency of electrodynamic treatment of aluminium alloy AMg6 and its welded joints. *The Paton Welding J.*, **1**, 2-6.
3. Strizhalo, V.A., Novogrudsky, L.S., Vorobiov, E.V. (2008) *Strength of materials at cryogenic temperatures taking into account electromagnetic fields*. Kiev, IPS [in Russian].
4. Belova, M.M., Protsenko, S.S., Ivanov, A.V. (1987) Dynamics of deformation of elastic-plastic layer in impulse energy release. *Problemy Prochnosti*, **2**, 87-91 [in Russian].
5. Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Yashchuk, V.A., Mikhoduj, O.L. (2015) Effect of electrodynamic treatment on fracture resistance of aluminium alloy AMg6 under cyclic loading. *Ibid.*, **3**, 91-98 [in Russian].

**ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНОЇ ОБРОБКИ НА ЗАЛИШКОВІ НАПРУГИ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ СПЛАВУ АМГ6**

Л.М. Лобанов, М.О. Пашчин, О.М. Тимошенко, О.Л. Міходуй, П.В. Гончаров, О.В. Черкашин

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Досліджували вплив параметрів, що визначають різну тривалість електродинамічного впливу на зниження рівня залишкових напружень в зварних швах стикових з'єднань алюмінієвого сплаву АМГ6 внаслідок електродинамічної обробки. Показано, що зростання тривалості електродинамічного впливу, що досягається збільшенням індуктивності розрядного контуру при сталості амплітудних значень імпульсного електричного струму, характеризується великим збільшенням часу загасання струму в порівнянні з періодом його наростання. При цьому зростання тривалості електродинамічного впливу призводить до підвищення ефективності методу для зниження рівня залишкових напружень в зварних з'єднаннях сплаву АМГ6. Відзначено, що при тривалості  $t \geq 0,7$  мс зниження напружень визначається інтенсивністю електродинамічного впливу і Джоулевым нагріванням поверхні пластини. Бібліогр. 5, табл. 1, рис. 4.

*Ключові слова:* електродинамічна обробка, алюмінієві сплави, імпульс електричного струму, залишкові зварювальні напруження, тривалість електродинамічного впливу

**INFLUENCE OF PARAMETERS OF ELECTRODYNAMIC TREATMENT ON RESIDUAL STRESSES OF WELDED JOINTS OF AMG6 ALLOY**

L.M. Lobanov, N.A. Pashchin, A.N. Tymoshenko, O.L. Mikhoduy, P.V. Goncharov, A.V. Cherkashin

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

The influence of the parameters determining different duration of electrodynamic effect on reduction of the level of residual stresses in the welds of butt joints of the aluminum AMg6 alloy as a result of electrodynamic treatment was investigated. It is shown that an increase in the duration of electrodynamic effect, achieved by growing in the inductance of the discharge circuit at constant amplitude values of a pulsed electric current, is characterized by a greater increase in the period of current decay as compared to the period of its increment. At the same time, the increase in the duration of electrodynamic effect leads to an increase in the efficiency of the method for reducing the level of residual stresses in the welded joints of the AMg6 alloy. It is noted that at a duration  $t \geq 0.7$  ms, the decrease in stresses is determined by the intensity of electrodynamic effect and the Joule heating of the plate surface. 5 Ref., 1 Tabl., 4 Fig.

*Keywords:* electrodynamic treatment, aluminum alloys, electric current pulse, residual welding stresses, duration of electrodynamic effect

Поступила в редакцію 24.01.2019



Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины  
НТУУ «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»  
Международная Ассоциация «Сварка»

Девятая международная конференция

**ЛУЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СВАРКЕ И ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ**

9 – 13 сентября 2019 г., Одесса

Председатель программного комитета академик И.В. Кривцун

**Тематика конференции**

- Лазерная и электронно-лучевая сварка, резка, наплавка, термообработка, нанесение покрытий
- Электронно-лучевая плавка и рафинирование
- Гибридные процессы
- 3D технологии
- Моделирование лучевых технологий
- Материаловедческие проблемы лазерных и электронно-лучевых технологий

**Оргкомитет**

ІЗС ім. Є.О. Патона, г. Київ, ул. Казимира Малевича, 11  
Тел./факс: (38044) 200-82-77, 200-81-45  
E-mail: journal@paton.kiev.ua | <http://pwi-scientists.com/rus/ltwmp2019>