

УДК539.3;537.39

## ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА НА ТОНКУЮ СТРУКТУРУ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АМг6 ПРИ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

Л. И. МАРКАШОВА<sup>1</sup>, Н. А. ПАЦИН<sup>1</sup>, Е. Н. БЕРДНИКОВА<sup>1</sup>,  
О. Л. МИХОДУЙ<sup>1</sup>, Ю. М. СИДОРЕНКО<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев;

<sup>2</sup> НТУ Украины "Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского"

Остаточные напряжения негативно влияют на долговечность сварного соединения, являясь основной причиной хрупкого разрушения металла – коррозионного растрескивания. Поэтому важно разрабатывать эффективные методы снижения напряжений растяжения, отличающиеся малыми энергетическими затратами и простотой реализации. Одним из них является электродинамическая обработка (ЭДО), основанная на прохождении импульсов электрического тока (ИЭТ) через металл в момент приложения к нему ударной нагрузки. Установлено, что вследствие прохождения ИЭТ через образцы алюминиевого сплава АМг6 повышается эффективность ЭДО: снижаются локальные внутренние напряжения из-за упорядоченности дислокационной субструктуры. Полученные результаты при использовании ударного (без прохождения ИЭТ), а также совместного ударного и электроимпульсного воздействий подтверждают гипотезу о влиянии электрон-дислокационного взаимодействия на снижение локальных внутренних напряжений в сплаве АМг6.

**Ключевые слова:** *алюминиевый сплав, электродинамическая обработка, плотность дислокаций, локальные внутренние напряжения.*

Электродинамическую обработку (ЭДО) сварных элементов конструкций воздействием импульсных электромагнитных полей применяют для снижения остаточных напряжений в изделиях авиа- и судостроения из легких сплавов [1, 2]. Механизм ЭДО основан на совместном влиянии импульсного электрического тока (ИЭТ) и электродинамического давления на сварное соединение посредством контакта рабочего электрода с поверхностью металла в момент разряда емкостного накопителя энергии. В результате в обрабатываемом металле инициируются процессы, связанные с электропластическим эффектом (ЭПЭ), основанном на теории электрон-дислокационного взаимодействия [3], и формированием в материале упругопластических деформаций [4]. Это приводит к изменению напряженного состояния металла, в т.ч. на субструктурном уровне. В то же время вклад электроимпульсной составляющей ЭДО в снижение локальных внутренних напряжений не изучали. Поскольку плотность ИЭТ при реализации ЭДО может достигать  $10 \text{ kA/mm}^2$  [5], следует ожидать существенного влияния ЭПЭ на свойства проводящих металлических материалов.

Цель работы – изучить влияние импульсного тока на эволюцию субструктуры и локальные внутренние напряжения в алюминиевом сплаве АМг6 при ЭДО.

**Материал и методика.** Сплав АМг6 исследовали в трех различных состояниях: исходном (отжиг  $330^\circ\text{C}$ ;  $\tau = 1,5 \text{ h}$ ; вариант 1); после ударного нагружения (вариант 2); после совместного воздействия ударной нагрузки и ИЭТ (вариант 3).

Пластины размерами 400×500×4 mm подвергали односторонней обработке на описанном ранее устройстве [5], которое после модернизации позволяет осуществить ЭДО образцов как чисто ударным нагружением [6], так и совместным воздействием ударной нагрузки и ИЭТ (при напряжении заряда 500 V, емкости конденсаторов 6600 μF и индуктивности разрядного контура 5,3 μHn). Особенности распределения ударной нагрузки при реализации ЭДО без и с прохождением ИЭТ проанализированы ранее [7].

Характер зеренной, субзеренной и дислокационной структур металла пластин изучали методами оптической и растровой (SEM-515 фирмы “Philips”, Голландия), а также просвечивающей (JEM-200CX, фирмы “JEOL”, Япония) электронной микроскопии с ускоряющимся напряжением 200 kV. Фольги для исследования тонкой структуры “на просвет” готовили двухступенчатым методом – предварительной электрополировкой с последующим многократным ионным утонением ионизированными потоками аргона.

**Результаты и их обсуждение. Тонкая структура.** В исходном состоянии сплава (вариант 1) во внутренних объемах зерен плотность дислокаций невысокая ( $\rho = (1...2) \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ ), и они сравнительно равномерно распределены между объемом зерен ( $\rho = (4...6) \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ ) и межзеренными границами ( $\rho = 8 \cdot 10^9...10^{10} \text{ см}^{-2}$ ). В отдельных участках межзеренных границ наблюдается градиент их плотности (от  $10^9$  до  $10^{10} \text{ см}^{-2}$ ), что связано с увеличением углов ориентации стыкующихся зерен (рис. 1 и табл. 1). Во внутренних объемах зерен присутствуют также обособленные зоны с повышенной их плотностью, что свидетельствует о начальных стадиях формирования внутризеренной субструктуры с размерами зерен  $d_c = 1,4... 5,0 \text{ μm}$ , отличающейся небольшими углами ориентации микрообъемов такого типа (рис. 1b). Следовательно, тонкая структура исходного металла должна обеспечивать оптимальное распределение локальных внутренних напряжений.

В металле после ударного воздействия (вариант 2) формируется специфическая структура, проявляющаяся преимущественно во внутренних объемах зерен, для которой характерно формирование (при дроблении) внутризеренной дисперсной субструктуры ( $d_c = 0,5...1,1 \text{ μm}$ ; рис. 1d) с небольшими углами ориентации, а также фрагментов более крупного размера ( $d_c = 1,4...3,2 \text{ μm}$ ; рис. 1e и табл. 1) с увеличенными углами ориентации. Кроме того, в деформированном ударом сплаве возникают локальные (размером 1,2...1,7 μm) зоны с весьма высокой дислокационной плотностью (до  $10^{11} \text{ см}^{-2}$ ; табл. 1) – зоны локализации деформации (рис. 1e, f), т.е. локальных концентраторов внутренних напряжений, в частности, зоны зарождения и распространения трещин в объемах, деформированных ударом.

**Таблица 1. Параметры тонкой структуры металла после различных схем ЭДО**

Параметры	Вариант металла		
	1	2	3
$d_c, \text{ μm}$	1,4...5	0,5...3,2	0,5...1,5
$\rho \text{ (min), см}^{-2}$	$(1...2) \cdot 10^9$	$(1...2) \cdot 10^9$	$(2...3) \cdot 10^9$
$\rho \text{ (max), см}^{-2}$	$1 \cdot 10^{10}$	$(1...2) \cdot 10^{11}$	$(6...8) \cdot 10^{10}$

В металле после ЭДО при сочетании ИЭТ с ударным воздействием (вариант 3) формируется субструктура ( $d_c = 0,5...1,5 \text{ μm}$ ) с четкими границами (рис. 1g, h). При этом снижается общая плотность дислокаций, по сравнению с динамическим нагружением, а также формируется равномерное их распределение (рис. 1g) по всему объему металла без резких градиентов (рис. 1i; табл. 1) между внутренними объемами зерен ( $\rho = (2...3) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ) и вдоль межзеренных границ ( $\rho = (6...8) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ).

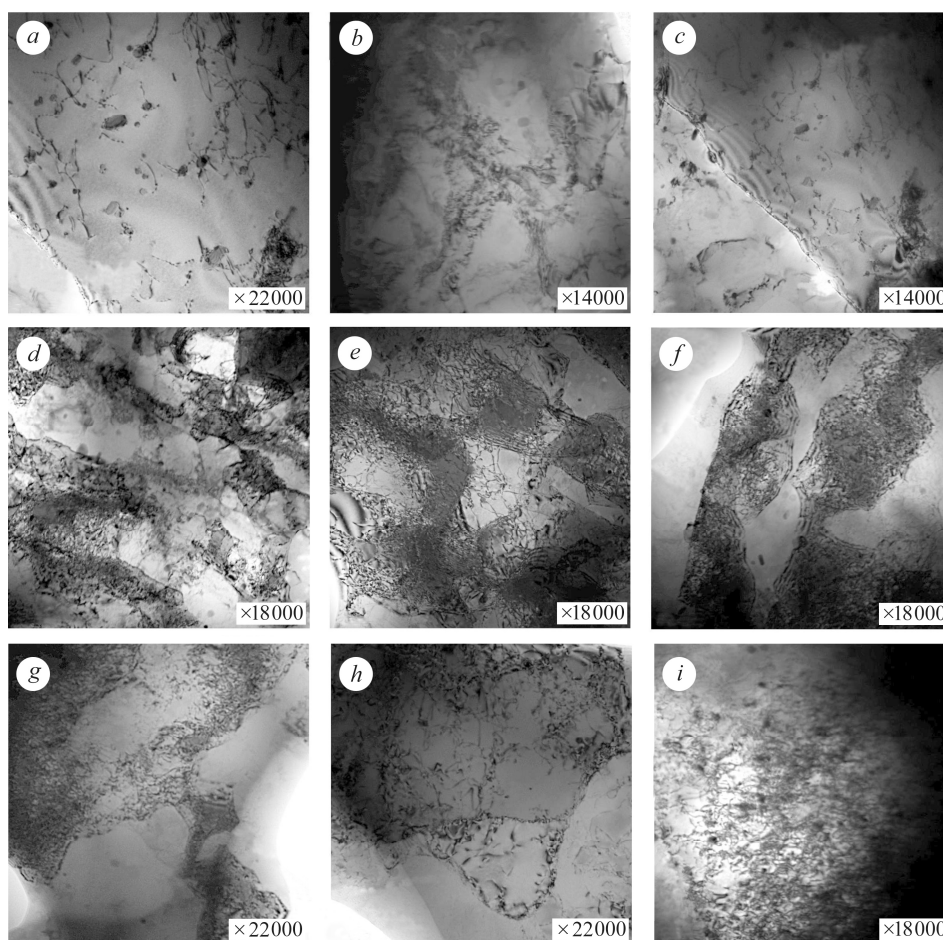


Рис. 1. Распределение дислокаций во внутренних объемах зерен (a, b, d, e, g, h) и у межзеренных границ (c, f, i) металла вариантов 1 (a–c); 2 (d–f) и 3 (g–i).

Fig. 1. Distribution of dislocations in the internal volumes of grains (a, b, d, e, g, h) and grain boundaries (GB) (c, f, i) of the metal of variants 1 (a–c); 2 (d–f) and 3 (g–i).

**Локальные напряжения.** По результатам исследования тонкой структуры “на просвет” оценили уровень локальных внутренних напряжений  $\tau_{loc} = f(\rho)$  [8] в зонах преимущественного зарождения и распространения трещин. В исходном металле (вариант 1) равномерное распределение дислокационной структуры в объемах и у границ зерен ( $\rho = (2...6) \cdot 10^9$  и  $8 \cdot 10^9 ... 10^{10} \text{ см}^{-2}$  соответственно) определяет низкий уровень локальных внутренних напряжений (рис. 2a, b; табл. 2). В объемах зерен и вдоль межзеренных границ  $\tau_{loc} = 15...75 \text{ МПа}$ , что соответствует значениям  $(0,0055...0,027)\tau_T$ , где  $\tau_T$  – теоретическая прочность алюминиевых сплавов. Для металла варианта 2 после деформации вследствие удара характерно неравномерное распределение плотности дислокаций, что приводит к формированию резких градиентов ( $\Delta\tau_{loc}$ ) локальных внутренних напряжений, особенно в объемах зерен:  $\Delta\tau_{loc} = 670...1500 \text{ МПа}$  или  $(0,25...0,55)\tau_T$  (табл. 2). В металле после обработки с использованием ИЭТ (вариант 3) незначительное увеличение (в 1,3 раза) плотности дислокаций при переходе от внутренних объемов к границам структурных составляющих (от  $\rho = (2...3) \cdot 10^9$  до  $(6...8) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ) не вызывает формирования резких градиентов локальных напряжений:  $\Delta\tau_{loc} = 447...600 \text{ МПа}$  или  $(0,16...0,22)\tau_T$  (табл. 2), что должно обеспечивать максимальную трещиностойкость металла по сравнению с вариантом 2.

**Таблица 2. Локальные внутренние напряжения в металле после различных схем ЭДО**

Напряжения	Вариант металла		
	1	2	3
$\tau_{loc} (min)$ , МПа	15	40...50	15...140
$\tau_{loc} (max)$ , МПа	22...75	670...1500	447...600
$\Delta\tau_{loc}$ , МПа	10...60	630...1450	432...460

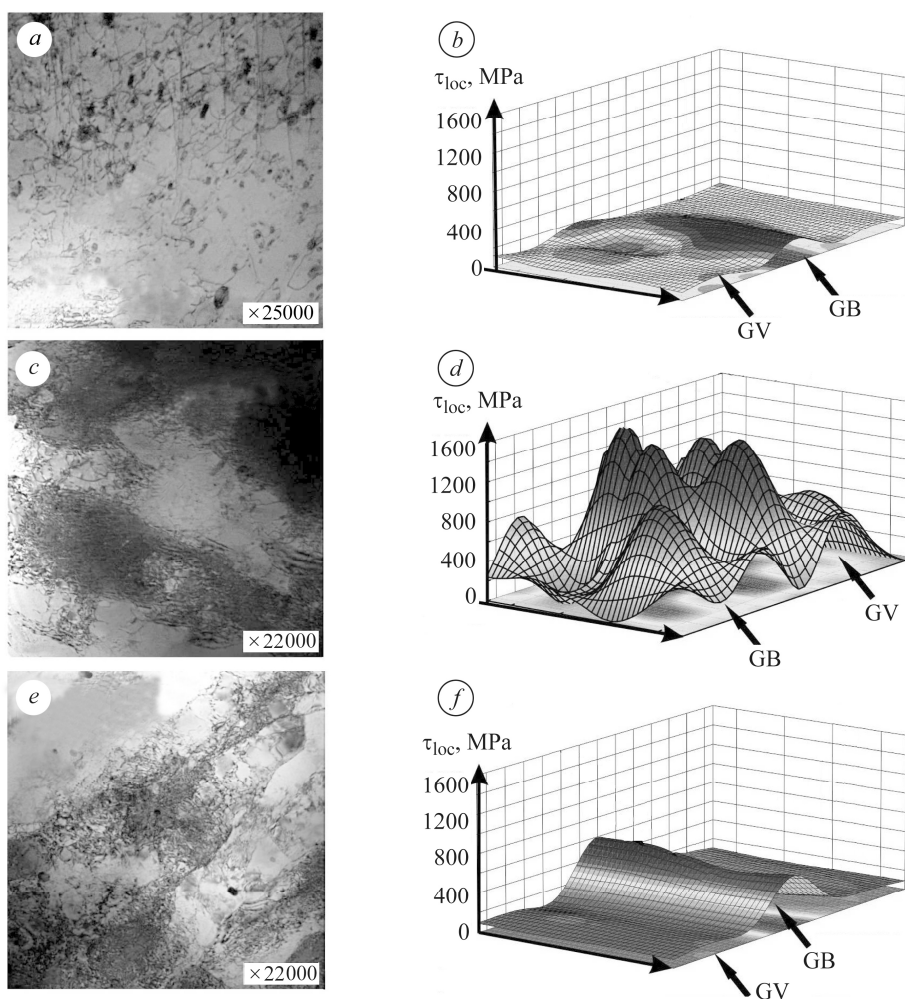


Рис. 2. Тонкая структура сплава (*a, c, e*) и распределение локальных внутренних напряжений (*b, d, f*) в объеме зерен (GV) и у их границ (GB) в металле вариантов 1 (*a, b*); 2 (*c, d*) и 3 (*e, f*).

Fig. 2. Thin structure of the AMg6 alloy (*a, c, e*) and the distribution of local internal stresses (*b, d, f*) in the volume of grains (GV) and near GB of the metal of variants 1 (*a, b*); 2 (*c, d*) and 3 (*e, f*).

Таким образом, ИЭТ способствует упорядочению и фрагментации субструктуры сплава АМг6, что сопровождается понижением дислокационной плотности и, следовательно, снижением локальных внутренних напряжений, вероятно, вследствие взаимодействия дислокаций с электронами проводимости, инициируемого ИЭТ [3, 4].

### **ВЫВОДЫ**

В исходном сплаве АМг6 после отжига наблюдается равномерное внутризеренное распределение плотности дислокаций в сочетании с формированием

однородной субструктуры. Такой результат объясняет отсутствие во внутренних объемах и по межзеренным границам металла больших градиентов локальных внутренних напряжений. После ударной деформации распределение плотности дислокаций неоднородное. Это обусловлено образованием дислокационных скоплений – зон локализации деформации преимущественно во внутренних объемах зерен. В результате формируются внутризеренные области с высоким уровнем внутренних напряжений, являющихся потенциальными местами зарождения и распространения трещин. Обработка сплава, охватывающая динамическую нагрузку и прохождение импульсов электрического тока, способствует равномерному измельчению субструктуры с увеличением угла ориентации границ зерен, более равномерному распределению дислокаций по всему объему деформированного металла, а, следовательно, снижению уровня и градиентов локальных внутренних напряжений.

*РЕЗЮМЕ.* Залишкові напруження негативно впливають на довговічність зварного з'єднання, спричиняючи крихке руйнування металу – корозійне розтріскування. Тому важливо розробити ефективні методи зниження напружень розтягу, що відрізняються незначними енергетичними затратами і простою реалізацією. Одним із них є електродинамічна обробка (ЕДО), заснована на проходженні імпульсів електричного струму (ІЕС) через оброблюваний метал у момент прикладання до нього динамічного навантаження. Встановлено, що після проходження ІЕС через зразки алюмінієвого сплаву АМг6 підвищується ефективність ЕДО: знижуються локальні внутрішні напруження через впорядкованість дислокаційної субструктури. Результати, одержані під час застосування ударного навантаження (без проходження ІЕС), а також взаємодії ударного навантаження і проходження ІЕС, підтверджують гіпотезу про вплив електрон-дислокаційної взаємодії на внутрішні напруження у сплаві АМг6.

*SUMMARY.* Residual stresses negatively affect the service life of a welded joint, being at the same time the main cause of metal brittle fracture – corrosion cracking. Proceeding from that, the development of the effective methods for reducing tensile stresses, characterized by low power consumption and easy realization, is important. One of such methods is the electrodynamic treatment (EDT), based on passing of electric current pulses (ECP) through the metal being treated at the moment of applying dynamic load to it. It was found that ECP passing through of AMg6 aluminum alloy specimens increases the efficiency of EDT in reducing local internal stresses, due to ordering of the dislocation substructure. The results of evaluation of local internal stresses distributions, obtained after EDT, realizing the dynamic action (without ECP passing), as well as interaction of dynamic and electric pulsed effects, confirm the hypothesis about the influence of electron-dislocation interaction on reduction of local internal stresses in the AMg6 alloy.

1. *Investigation of residual stress in welded joints of heat-resistant magnesium alloy ML10 after electrodynamic treatment / L. M. Lobanov, N. A. Pashchin, O. L. Mikhodui, J. A. Khokhlova // J. Magnesium and Alloys. – 2016. – 4. – P. 77–82.*
2. *Lobanov L. M., Paschin N. A., and Mikhoduy O. L. Repair the AMr6 aluminum alloy welded structure by the electric processing method // Weld Res. and Appl. – 2014. – № 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 упругопластического слоя при импульсном энерговыделении // Проблемы прочности. – 1987. – № 12. – С. 87–91.*
5. *Влияние параметров электродинамических воздействий на напряженное состояние сварных соединений листов из сплава АМг6 / Л. М. Лобанов, Н. А. Пашин, О. Л. Миходуй, А. В. Черкашин // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2017. – 53, № 1. – С. 7–11.*
6. *Effect of the indenting electrode impact on the stress-strain state of an AMg6 alloy on electrodynamic treatment / L. M. Lobanov, M. O. Pashchyn, O. L. Mykhodui, Yu. M. Sydorenko // Strength of Mat. – 2017. – 43, № 3. – P. 369–380.*
7. *Эффективность различных схем электродинамической обработки сплава АМг6 и его сварных соединений / Л. М. Лобанов, Н. А. Пашин, О. Л. Миходуй, А. В. Черкашин, А. Н. Манченко, И. П. Кондратенко, А. В. Жильцов // Автомат. сварка. – 2012. – № 12 – С. 29–35.*
8. *Маркашова Л. И., Волков В. С., Кушнарёва О. С. Структура и физико-механические свойства сварных соединений стали AISI 321 // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2016. – 52, № 2. – С. 48–53.*

*Одержано 17.07.2017*