



## ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ОСОБЕННОСТИ МИКРОМЕХАНИЗМА РАЗРУШЕНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АМГ6

Академик НАН Украины **Л. М. ЛОБАНОВ**, **Н. А. ПАЩИН**, канд. техн. наук, **В. П. ЛОГИНОВ**, инж.,  
**Т. Г. ТАРАНОВА**, **В. А. КОСТИН**, кандидаты техн. наук, **А. А. ЧАЙКА**, инж.  
 (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

На базе фратографического анализа исследованы особенности механизмов релаксации напряженного состояния и микроразрушения образцов основного металла и сварных соединений сплава АМГ6 в условиях электродинамической обработки (ЭДО) материала импульсами тока. Установлено, что при ЭДО околошовной зоны стыковых сварных соединений увеличивается вязкая составляющая разрушения. При этом в обработанном материале наблюдается неконсервативная пластическая деформация скольжением, приводящая к деформационному упрочнению структуры стыковых соединений сплава АМГ6 на 35..40 % по сравнению с необработанным.

*Ключевые слова:* электродинамическая обработка, алюминиевые сплавы, сварные соединения, импульсы тока, напряженно-деформированное состояние, вязкость, пластичность, хрупкость, микротвердость, фратографические исследования, микромеханизм разрушения, пластические деформации, полосы скольжения, скольжение кручением

Одним из перспективных путей повышения ресурса сварных конструкций является обработка металла шва и околошовной зоны (ОШЗ) импульсами тока различной длительности и конфигурации, а также воздействие на конструкционные материалы электромагнитными полями [1]. Одним из новых методов воздействия тока на металлы и сплавы является электродинамическая обработка (ЭДО), основанная на инициировании в материале электродинамических сил, возникающих при переходных процессах, сопровождающих прохождение в материале разряда тока [2]. При суммировании электродинамических сил с внешним статическим нагружением, приложенным к сварной конструкции, в ней могут возникать пластические деформации, положительно влияющие на ресурсные характеристики изделия.

При оценке эффективности процесса ЭДО сварных соединений алюминиевых сплавов использовали фратографический метод исследования изломов разрушенных образцов [3]. Изучение поверхностей изломов и описание их рельефов позволяет сопоставлять механизмы разрушения материала, предварительно обработанного импульсами тока, с металлом, не прошедшим ЭДО.

Целью настоящей работы является исследование влияния ЭДО на особенности микромеханизма разрушения алюминиевого сплава марки АМГ6 толщиной 4 мм и его стыковых сварных соеди-

нений, обработку которых проводили в условиях одноактного статического нагружения материала.

Для оценки влияния ЭДО на изменение структуры материала в результате стимуляции электродинамического эффекта проводили обработку плоских образцов «лопаточного» типа. При создании одиночных импульсов тока в металле использовали лабораторную установку на базе конденсаторной машины, принцип работы которой изложен в работе [4]. Схема обработки образцов представлена на рис. 1. ЭДО проводили как на основном металле (без сварного шва), предварительно нагруженном продольным одноосным растяжением в упругой области деформирования, так и на сварных соединениях. Испытания проводили на разрывной машине ЦДМ-10 с максимальным усилием растяжения 10 т при скорости деформирования 6 мм/мин. Образец, закрепленный в захватах испытательной машины, растягивали до заданной величины и производили разряд с фиксацией падения деформирующего усилия с помощью самописца.

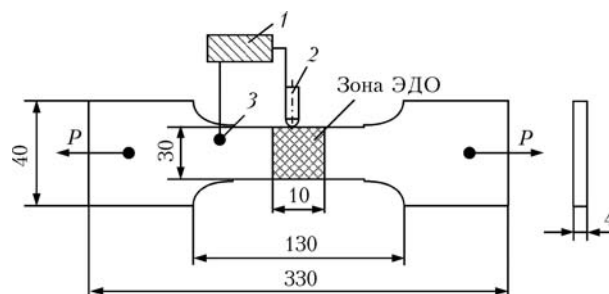


Рис. 1. Схема ЭДО образцов для испытаний на одноосное растяжение основного металла и сварных соединений: 1 — конденсаторная машина; 2 — электрод; 3 — крепление элементов электрического контура к образцу; P — растягивающее усилие



Исследования характеристик уменьшения сопротивления деформированию образцов выполняли на следующем режиме ЭДО: напряжение  $U_3$  и сила тока  $I_3$  на электроде соответственно  $U_3 = 450$  В и  $I_3 = 3500$  А, продолжительность воздействия тока  $t_{\text{имп}} = 0,5$  мкс, емкость батареи конденсаторов  $C_{\text{кон}} = 2800$  мкФ.

Для оценки особенностей ЭДО сварных конструкций проводили обработку образцов стыковых соединений из сплава АМгб толщиной 4 мм, аналогичных применяемым для основного металла (рис. 1). Предварительно пластины размерами  $500 \times 250 \times 4$  мм сваривали за один проход автоматической сваркой неплавящимся электродом в аргоне на установке АСТВ-2М на следующем режиме:  $U_{\text{св}} = 18$  В,  $I_{\text{св}} = 220$  А,  $v_{\text{св}} = 14$  м/ч, материал присадки — проволока СВАМгб диаметром 2,0 мм.

С помощью метода электронной фрактографии выполняли исследования поверхности разрушения материалов, обработанных импульсами тока, и их сварных соединений на микроуровне. Проводили фрактографические оценки изломов, получаемых при одноосном растяжении до разрушения плоских образцов основного металла и сварных соединений (рис. 1) как обработанных сериями последовательных импульсов тока, так и не подвергавшихся ЭДО. Оценка характерных деталей рельефа позволила определить объем металла, вовлеченного в пластическую деформацию до разрушения, стимулируемую импульсами тока.

При исследовании фрактограммы разрушения выделяли зоны локализации пластических деформаций в микрообъемах обработанного и необработанного материала, что определило невозможности повышения вязкости структуры металла под воздействием электродинамических сил.

Характер изменения усилия нагружения при растяжении сплава АМгб в результате серий последовательных импульсов тока приведен в таб-

лице. Анализируя данные таблицы, можно заключить, что обработка сплава АМгб, растянутого ниже предела пропорциональности  $\sigma_{\text{п.п}} = 130$  МПа, вызывает в металле снижение усилия предварительного упругого нагружения. Анализировали параметр  $\Delta\sigma_{\%}$  (таблицу), который отражает текущее изменение значения единичного скачка деформирующего усилия при ЭДО в каждой серии испытаний. Согласно приведенным данным, наблюдается закономерность, свидетельствующая о том, что при обработке образцов максимальное падение усилий растяжения в цикле (50 % общего падения  $\Sigma\Delta\sigma_{\%}$ ) имеет место при первом воздействии тока на материал. При втором и последующих разрядах наблюдали снижение эффективности ЭДО, что, согласно работе [6], можно объяснить перераспределением дислокационной структуры материала при его нагружении.

Изменение характера нагружения сварных образцов под влиянием ЭДО представлено в таблице. При этом значение предварительного растягивающего усилия  $\sigma_{\text{пр}}$  (100 МПа) выбирали близким к значению максимальной поперечной компоненты  $\sigma_y$  остаточных сварочных напряжений в сплавах системы Al–Mg. Проанализировав данные таблицы, можно заключить, что условия предварительного нагружения сварных соединений близки к условиям, принятым для основного металла. Если сравнивать табличные значения  $\Delta\sigma_{\%}$  для двух типов образцов, то у сварных соединений более выражены релаксационные процессы, связанные с падением предварительного деформирующего усилия. Таким образом, за первые три импульса тока в них достигается снижение  $\Delta\sigma_{\%}$ , равное суммарной величине  $\Sigma\Delta\sigma_{\%}$  у образцов основного металла. При сопоставлении значений  $\Delta\sigma_{\%}$  в основном металле и сварном соединении видно, что у последнего они более высокие (до 10 %), что, вероятно, связано с более

**Усилие нагружения при растяжении на образцах основного металла и сварных соединений из сплава АМгб при ЭДО**

Материал	n, разряд	$\sigma_{\text{пр}}$ , МПа	$\sigma_n$ , МПа	$\Delta\sigma_n$ , МПа	$\Delta\sigma_{\%}$ , %	$\Sigma\Delta\sigma_{\%}$ , %
Основной металл	—	116,7	—	—	—	~ 50
	1		88,34	28,36	24,3	
	2		77,5	10,84	9,3	
	3		70,0	7,5	6,43	
	4		62,9	7,1	6,1	
	5		59,5	3,4	3,0	
Сварное соединение	—	100,0	—	—	—	~ 57
	1		70,0	30,0	30,0	
	2		56,67	13,33	13,33	
	3		50,0	6,67	6,67	
	4		45,4	4,6	4,6	
	5		43,5	1,9	1,9	

Примечание. n — последовательность разрядов в цикле обработки;  $\sigma_{\text{пр}}$  — предварительное растягивающее напряжение в образце;  $\sigma_n$  — текущее значение растягивающих напряжений после каждого разряда тока;  $\Delta\sigma_n = \sigma_n - \sigma_{n+1}$  — текущее падение растягивающих напряжений после каждого разряда;  $\Delta\sigma_{\%} = (\Delta\sigma_n / \sigma_{\text{пр}}) \cdot 100$  % — текущее относительное падение усилия растяжения после каждого разряда;  $\Sigma\Delta\sigma_{\%}$  — суммарное относительное падение усилия растяжения после цикла ЭДО.

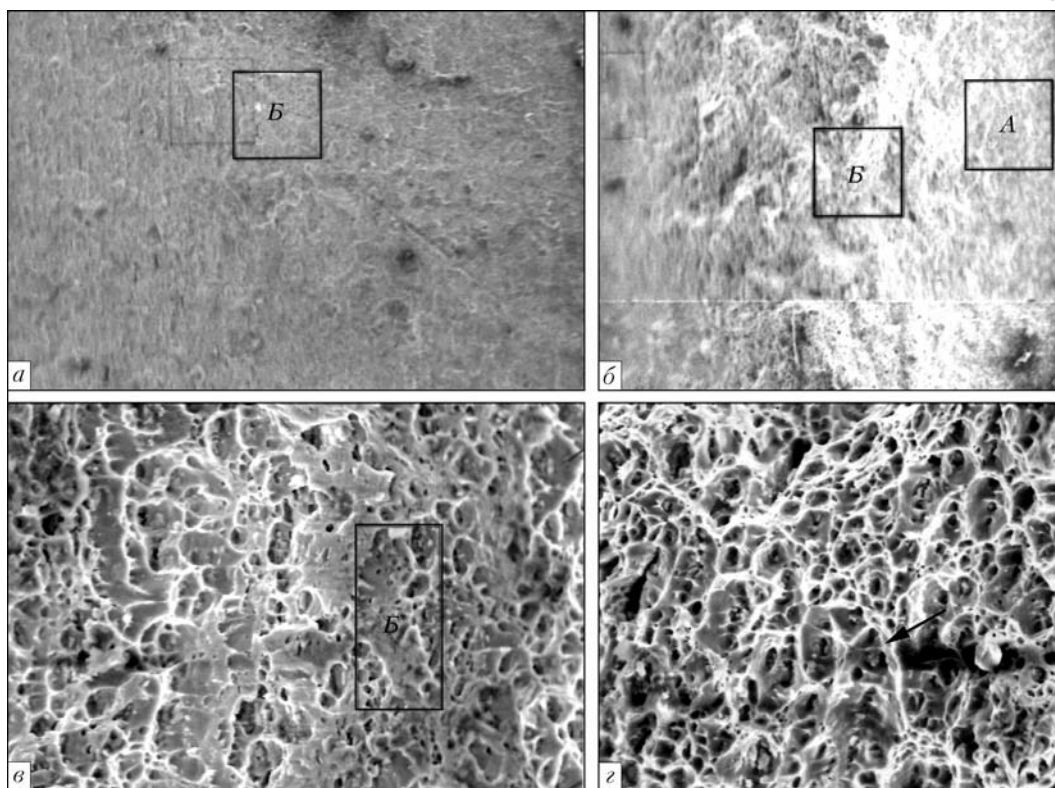


Рис. 2. Внешний вид (*а, б*) и фрактографическая картина (*в, г*) изломов сплава АМг6: *а, в* — исходное состояние; *б, г* — после ЭДО (зона *А* — участок излома вблизи поверхности образца, *Б* — середина поверхности излома; *а, б* —  $\times 33$ ; *в, г* —  $\times 500$ )

высокой пластичностью металла ОШЗ по сравнению с основным металлом, обусловленной разупрочнением, вызванным сварочным нагревом.

С целью изучения влияния ЭДО на изменение структуры материала проводили сравнительные оценки топографии макрорельефа разрушения, полученного в результате одноосного растяжения основного металла сплава АМг6 в исходном состоянии и с применением ЭДО. Фрактограммы образцов обработанного и необработанного материала представлены на рис. 2. Из рисунка видно, что изломы имеют преимущественно волокнистое строение с крупными гребнями, образовавшимися по механизму смешанного разрушения [5]. Для изучения рельефа изломов сплава после электродинамического воздействия взяты образцы с односторонней проработкой материала. По сравнению с рис. 2, *а* излом на рис. 2, *б* с обработанной стороны имеет более развитое волокнистое строение с глубиной проникновения волокон до 2/3 толщины образца. Обнаруженные особенности позволяют сделать вывод, что ЭДО сплава АМг6 является объемным, а не поверхностным воздействием на материал.

Микроскопическая оценка механизма разрушения сплава АМг6 в исходном состоянии свидетельствует о его транскристаллитном характере. При этом по всей толщине материала наблюдали ямочное строение излома, определяемое плоскими ямками отрыва овальной формы и средним диаметром 5...15 мкм. На изучаемом рельефе наб-

людаются однонаправленные гребни отрыва перемычек и развитие фасетки квазискола (зона *Б* на рис. 2, *в*) с площадью до 2500...3000 мкм<sup>2</sup>. При этом топография излома характеризуется структурной неоднородностью, где гребни отрыва чередуются со скользящими фрагментами и участками ямок. Более развит ямочный рельеф и гребни отрыва при разрушении материала после обработки. Сравнивали фрактографическую картину средней части изломов образцов (зона *Б*) в исходном состоянии (рис. 2, *в*) и после ЭДО (рис. 2, *г*), при этом на рельефе изломов сплава АМг6 после ЭДО наблюдается большая глубина и равноосность ямок. Если на необработанном металле имеют место плоские ямки и гребни одной ориентации, то в изломе образцов после воздействия тока фасетки квазискола отсутствуют, преобладают мелкие глубокие равноосные ямки со средним диаметром 5...10 мкм и разнонаправленные мощные гребни отрыва перемычек (стрелка на рис. 2, *г*). Средняя толщина гребней в исходном материале и после ЭДО соответственно равна 2 и 5 мкм. При этом если в сплаве АМг6 без обработки линии гребней взаимно параллельны, то после воздействия тока в основном наблюдается их взаимная перпендикулярность. Проанализировав данные рис. 2, можно сделать вывод, что ЭДО создает предпосылки для формирования в материале объемных зон микровязкости, повышающих общий уровень пластических деформаций образца.

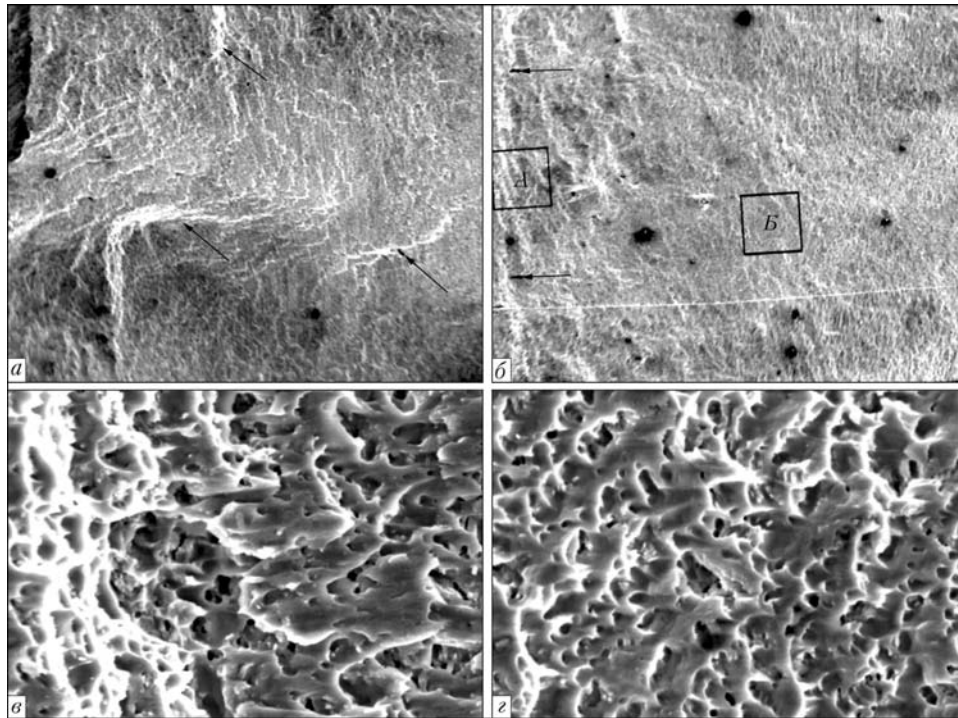


Рис. 3. Внешний вид (*а, б*) и фрактографическая картина (*в, г*) изломов сварных соединений сплава АМг6 после разрушения образцов: *а, в* — без ЭДО; *б, г* — после ЭДО (*а, б* —  $\times 18$ ; *в, г* —  $\times 1000$ )

Для определения особенностей микромеханизма разрушения сварных соединений алюминиевых сплавов системы Al–Mg по сравнению с основным металлом проводили фрактографическую оценку изломов стыковых швов из сплава АМг6, обработанных (необработанных) импульсами тока.

Для исследований выбраны сварные образцы из сплава АМг6, изготовленные и прошедшие одностороннюю ЭДО по методике, описанной выше. Фрактограммы изломов стыковых соединений в исходном состоянии и после ЭДО представлены на рис. 3. Поверхность рельефа изломов по линии сплавления необработанных образцов имеет многоочаговую структуру разрушения (стрелки на рис. 3, *а*), равномерно распределенную по всей поверхности излома. Несколько отлична топография излома обработанного соединения, где очаги разрушения сконцентрированы в приповерхностной области (зона А на рис. 3, *б*) со стороны поверхности образца, подвергаемой воздействию тока. При этом распространение идет параллельно обрабатываемой поверхности (стрелки на рис. 3, *б*). Такой рельеф, распространяемый вглубь материала до 2/3 толщины образца, как и при изучении изломов основного металла (см. рис. 2, *б*), может свидетельствовать о воздействии ЭДО по толщине материала.

Рассмотренный при большом увеличении рельеф излома необработанного сварного соединения (рис. 3, *в*) характеризуется мелкочаеистым строением с подплавленными ямками нормального отрыва, неравномерно чередующихся с развитыми гребнями отрыва перемычек и протяженными

участками квазискола. Особенно заметна неравномерность структуры необработанных участков у поверхности сварных образцов, где участки квазискола занимают 70 % площади излома. Значительно более упорядочен рельеф излома приповерхностной области металла ОШЗ (рис. 3, *б*, зона А) с обработанной стороны, который представлен на рис. 3, *г*. Он характеризуется незначительными по протяженности фасетками квазискола и равномерным распределением равноосных мелких ямок и гребней отрыва, толщина отрыва которых не превышает 5...10 мкм. Близка по геометрии и структура срединной поверхности излома (рис. 3, *б*, зона В), являющаяся границей воздействия обработки и характеризующаяся «строчечным» расположением гребней.

В целом можно отметить, что после ЭДО металл имеет более развитую поверхность микровязкого разрушения с пониженным содержанием структур скола. Полученные результаты совпадают с мнением автора работы [6] в том, что создавая в металле области с повышенной вязкостью, можно регулировать характеристики пластичности и, следовательно, осуществление процессов релаксации его напряженно-деформированного состояния.

Авторами были проведены металлографические исследования микроструктуры по линии сплавления сварных соединений сплава АМг6, обработанных и необработанных импульсами тока (рис. 4). Структура необработанного тока сплава в основном состоит из дисперсных выделений  $\beta$ -фазы  $Al_3Mg_2$  в обрамлении силицида магния MgSi.  $\beta$ -Фаза имеет большую площадь и более

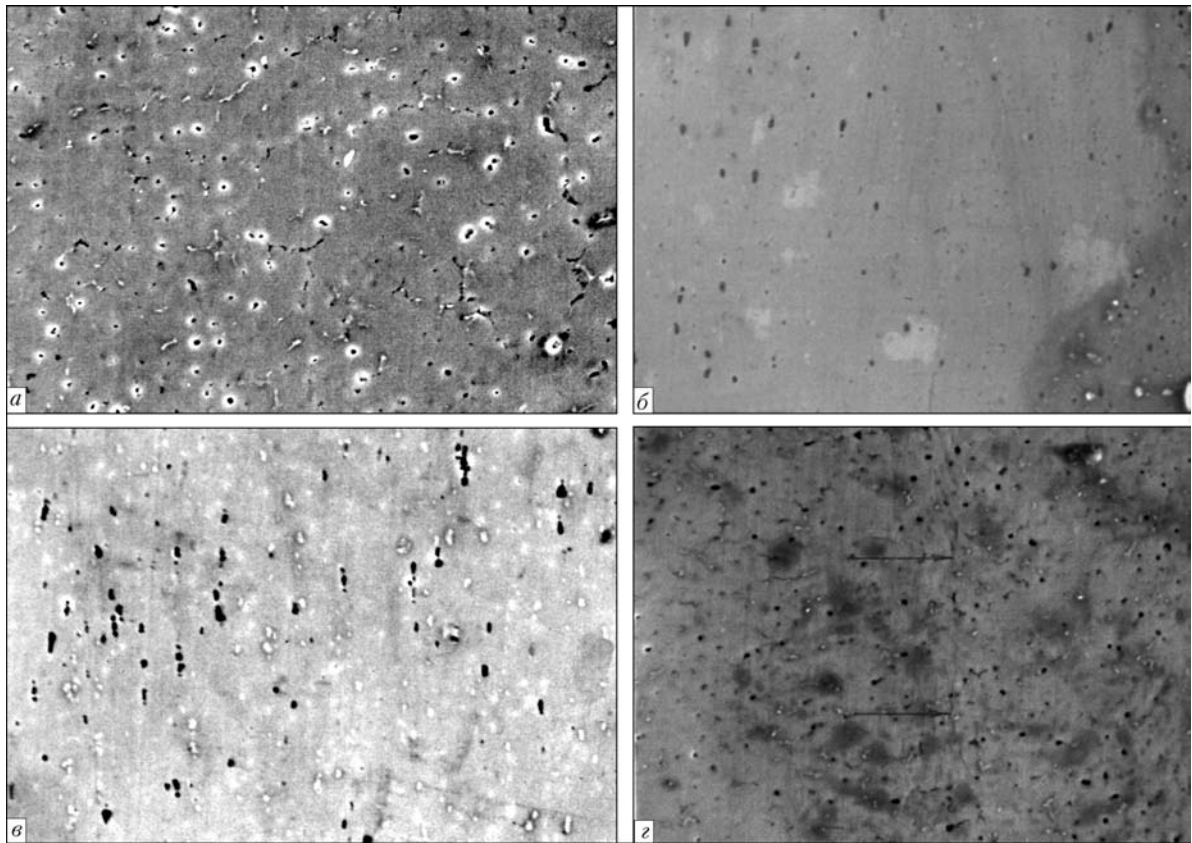


Рис. 4. Микроструктура ( $\times 500$ ) ОШЗ сварного соединения сплава АМг6, выполненного аргонодуговой сваркой без ЭДО (а, б) и после ЭДО: а-в — центральная зона, б-г — зона у поверхности образца

светлый оттенок в окружении темных линий и точечных включений силицида магния (рис. 4, а, б). Близка по составу и структура центральной зоны обработанного сплава (рис. 4, в).

При изучении приповерхностного слоя сплава АМг6 после ЭДО (рис. 4, г) вблизи обработанной поверхности наблюдали протяженные и развитые группы линий скольжения (стрелки на рис. 4, г), что свидетельствует об объемном пластическом деформировании материала [7] при импульсном воздействии тока. Преимущественная ориентация линий совпадает с плоскостью поверхности образца, подвергаемой воздействию тока. При этом направление скольжения наиболее благоприятно ориентировано относительно плоскости приложения внешней растягивающей нагрузки  $\sigma_{пр}$ . При сравнении макроструктуры приповерхностного слоя излома обработанного сварного соединения сплава АМг6 (стрелки на рис. 3, б) с его микроструктурой (стрелки на рис. 4, г), наблюдаются совпадения геометрических характеристик излома и линий скольжения. При изучении механизма скольжения у приповерхностного слоя обработанных сварных соединений при большем увеличении (рис. 5) можно видеть, что единичные линии скольжения (стрелки на рис. 4, г) объединены в однонаправленные группы (рис. 5, а) полос скольжения. Наблюдаемая конфигурация линий свидетельствует о процессе интенсивного пластического

течения материала при ЭДО. По данным работы [7] подобный эффект связан с такими процессами, как создание препятствий для свободного распространения пластических сдвигов, влиянием приграничных объемов, внутризеренных структурных напряжений, а также с переходом от скольжения по одной системе плоскостей к другой.

При изучении линий скольжения наблюдали их конфигурацию, характерную для развитого пластического течения — скольжения с элементами кручения, когда деформация поликристаллической структуры протекает по двум и более направлениям. Закручивание, по данным [7], приводит к существенным объемным искажениям структуры сплава АМг6, о чем в настоящей работе свидетельствует характер изменения рельефа не-

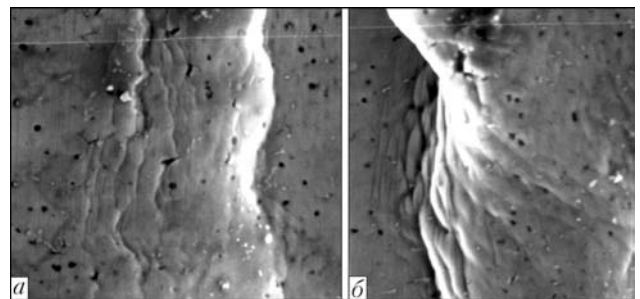


Рис. 5. Микроструктура сварных соединений сплава АМг6 ( $\times 1000$ ) после ЭДО: а — плоское скольжение; б — скольжение с кручением

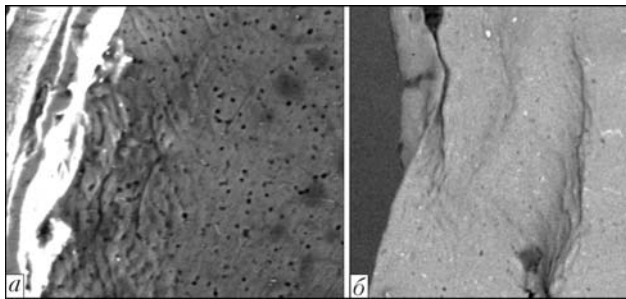


Рис. 6. Микроструктура обработанной поверхности образцов сварных соединений сплава АМг6 после ЭДО ( $\times 1000$ ): *a* — плоское скольжение; *б* — скольжение с кручением

посредственно у обрабатываемой поверхности. При этом наблюдали плоский тип скольжения (рис. 6, *a*), скольжение с кручением (рис. 6, *б*), а также их суперпозиции. Обнаруженные особенности подтверждают факт интенсивного пластического течения в приповерхностных слоях материала при его обработке импульсами тока, следствием чего может быть деформационное упрочнение. Согласно работе [7] этот факт можно объяснить тем, что комбинированное скольжение приводит к сложному изменению формы кристалла, вызываемому не только сдвигом, но и наложением крутильной компоненты. При этом происходят существенные искажения внутренней структуры кристалла, связанные со смещением атомных плоскостей.

Увеличение плотности искаженных участков кристаллического строения приводит к деформационному упрочнению, для подтверждения механизма которого выполняли замеры микротвердости  $HV$  на шлифах обработанных и необработанных сварных соединений сплава АМг6. Измерения проводили на приборе ПМТ-3 «LECO» при нагрузке 10 г. Значения  $HV$  как для необработанного материала (см. рис. 3, *a*), так и для удаленных участков обработанного сечения (см. рис. 3, *б*, зона *Б*) составляли 82,4 ед. Максимальные значения микротвердости  $HV$  129...131 наблюдали в зоне плоского очага разрушения (см. рис. 3, *б*, стрелка в зоне *А*), где наряду с полосами плоского скольжения имело место скольжение кручением, несколько ниже значения  $HV$  119...121 непосредственно у обработанной

поверхности (см. рис. 4, *з*, правый край). Проведенные измерения показали, что обработка импульсами тока ОШЗ сварного соединения сплава АМг6 по сравнению с необработанным вызывает в материале деформационное упрочнение на 35...40 %.

## Выводы

1. Предложена экспериментальная методика исследования механизма релаксации напряженно-деформированного состояния прямоугольных образцов сплава АМг6 и его сварных соединений при электродинамическом воздействии материала.

2. На основании фрактографических исследований изломов образцов из АМг6 установлено, что ЭДО повышает долю микровязкого разрушения материала, выраженного в увеличении площади с ямочной структурой и снижении фасеток квазискола.

3. На основании металлографических исследований микрошлифов сплава АМг6 установлено, что ЭДО вызывает в материале локальные зоны пластического течения, характеризующегося полосами скольжения различной ориентации, результатом которого является деформационное упрочнение обрабатываемого материала на 35...40 %.

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. *Фрактография и атлас фрактограмм: Справ. изд.* / Под ред. Дж. Феллоуза. — М.: Металлургия, 1982. — 489 с.
4. *Влияние электродинамической обработки на напряженно-деформированное состояние теплоустойчивых сталей* / Л. М. Лобанов, Н. А. Пашин, В. М. Скульский и др. // Автомат. сварка. — 2006. — № 5. — С. 11–15.
5. *Разрушение алюминиевых сплавов. Атлас фрактограмм* / С. М. Кишкина, В. Л. Браташев, Н. В. Гук и др. — М.: ВИАМ, 1988. — 168 с.
6. *Деформация и механика разрушения конструкционных материалов* / Под ред. Р. В. Харцберга. — М.: Металлургия, 1989. — 576 с.
7. *Бернштейн М. Л., Займовский В. А. Механические свойства металлов.* — М.: Металлургия, 1978. — 496 с.

On the basis of fractography analysis the peculiarities of stressed state relaxation mechanisms and microfracture of base metal samples and AMg6 alloy welded joints were studied under the conditions of electrodynamic processing (EDP) of the material by current impulses. It was determined that at EDP of butt welded joint HAZ the amount of the ductile fracture component increases. At the same time, in the processed material a non-conservative plastic slip deformation is observed that results in strain hardening of AMg6 alloy butt welded joint structure by 35...40 % compared with unprocessed material.

Поступила в редакцию 06.02.2006