

УДК 669.7.018

Л. М. Лобанов, Н. А. Пашин, В. П. Логинов, О. Л. Миходуй

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ АМг5 И АМг6 ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

Досліджено особливості еволюції структуроутворення алюмінієвих сплавів АМг5, АМг6 та їх зварювальних з'єднань при електродинамічній обробці (ЕДО) в умовах пружного навантаження. Встановлено, що при ЕДО збільшується в'язка складова зруйнування, має місце пластична деформація за механізмом ковзання (скрутки), яка викликає деформаційне зміцнення металу до 40%. Рівень початкової розтягальної напруги при ЕДО знижується на 50–60%, стискаючої — на 90%.

Ключові слова: алюмінієві сплави, зварювальні з'єднання, електродинамічна обробка, імпульсні напруги, напружено-деформований стан, ямковий злом, гребні відриву, в'язкість, пластичність, крихкість, мікротвердість, фрактографічні дослідження, злом, мікромеханізм руйнації, пластична деформація, смуга ковзання скрутою.

В современной технике растет применение сварных конструкций из алюминиевых сплавов в транспортном машиностроении, судостроении, а в последнее время и в строительстве. Это обусловлено необходимостью минимизации весовых характеристик изделий при повышающихся требованиях к продлению ресурса их эксплуатации.

Перспективным путем повышения ресурса сварных конструкций является их обработка импульсами электрического тока (ИЭТ). Установлено, что воздействие ИЭТ на металлы и сплавы приводит к повышению сопротивления усталости, коррозионной стойкости и других механических характеристик [1].

Одним из методов реализации воздействия ИЭТ на металлы и сплавы является электродинамическая обработка (ЭДО), основанная на иницировании в материале электродинамических сил, возникающих при прохождении токового разряда [2]. При суммировании электродинамических сил с внешними нагрузками, приложенными к обрабатываемой конструкции, в ней возникают пластические деформации, влияющие на ее ресурс. Данное явление было названо электропластичностью; отметим что, управляющий механизм пока достоверно не изучен [3]. При этом воздействие ИЭТ на металл, подвергаемый растяжению как в упругой области, так и нагруженный до уровня пластичности [4], приводит к релаксации его напряженного состояния.

При изучении механизмов влияния ИЭТ на металлы и сплавы в основном уделяли внимание оценке эволюции механических свойств материалов при токовых воздействиях, таких как предел упругости и текучести, ударная вязкость, напряженно-деформированное состояние. Основное внимание в этой связи обращали на негативные эффекты, инициируемые ИЭТ, в частности, потере прочности конструктивных элементов электрических машин в условиях сверхпроводимости [5]. Применяемые исследовательские методики тради-

© Лобанов Леонід Михайлович, академік НАН України, заступник директора ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України, Пашин Микола Олександрович, кандидат технічних наук, Логинов Володимир Петрович, Миходуй Ольга Леонідівна, кандидат технічних наук — наукові співробітники цього ж інституту.

ционно базировались на аппаратной базе для различных механических испытаний, не затрагивающих структурную составляющую материала. В тоже время применение ИЭТ для обработки металлов не обеспечено достаточным массивом знаний о механизмах структурообразования, инициируемых токовым воздействием. Это диктует необходимость изучения эволюции структуры при воздействии ИЭТ, ее корреляции с напряженным состоянием материала и на этой основе разработки общих закономерностей структурообразования при импульсных воздействиях.

Цель работы — исследовать влияние ИЭТ при ЭДО на особенности эволюции структурообразования алюминиевых сплавов АМг5, АМг6 и их сварных соединений.

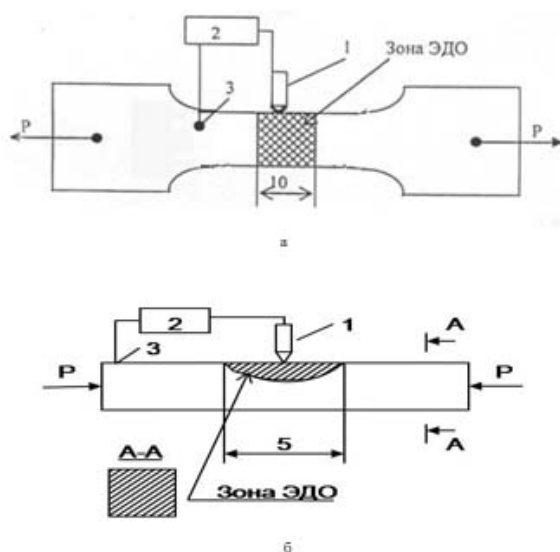


Рис. 1. Схема обработки ИЭТ образцов алюминиевых сплавов, где: 1 — рабочий инструмент (электрод), 2 — конденсаторная машина, 3 — клемма контактного провода; образец типа "лопатка" для ЭДО в условиях упругого растяжения (а), прямоугольный образец для ЭДО в условиях упругого сжатия (б)

Для оценки влияния ЭДО на изменение напряженного состояния в материале проводили обработку образцов основного металла из сплава АМг6 и сварных соединений сплава АМг5. Для генерирования ИЭТ использовали лабораторную установку на базе конденсаторной машины, принцип работы которой изложен в [6]. ЭДО проводили на образцах двух типов, одни из которых упруго нагружали одноосным растяжением, а другие — сжатием. Для изучения поведения материала при растяжении выбрали образцы типа "лопатка", для сжатия — столбчатые квадратного сечения. ИЭТ с энергией 300 Дж для растянутых образцов и 500 Дж — для сжатых, подаваемые с батареи конденсаторов, передавали на образец посредством контакта медного электрода с поверхностью металла в зоне ЭДО согласно схеме, представленной на рис. 1. Образцы нагружали до заданной величины и выполняли ИЭТ с фиксацией изменения уровня напряжений в материале. Нагружение проводили дискретно, с минутными временными интервалами для выполнения обработки металла ИЭТ. После выполнения ЭДО образцы, подвергаемые предварительному растяжению, доводили до разрушения.

Для оценки влияния ИЭТ на эволюцию структуры алюминиевых сплавов при растяжении применяли фрактографический метод исследования изломов разрушенных образцов, прошедших и не прошедших ЭДО. Оценка характерных деталей рельефа позволила определить объем металла, вовлеченного в пластическую деформацию до разрушения, стимулируемую ИЭТ. Кроме того, проводили металлографические исследования микроструктуры характерных зон воздействия ИЭТ в образцах после растяжения и сжатия.

Значения предварительных растягивающих напряжений образцов основного металла и сварных соединений задавали равными 100–120 МПа, что близко к уровню остаточных сварочных напряжений в сплаве АМг5 (рис. 2). При этом суммарное относительное снижение уровня растяжения в основном металле и сварном шве составило соответственно 50% и 60% после обработки серий из ИЭТ. Несколько большие значения падения предварительного напряжения при ЭДО сварного соединения по сравнению с основным металлом можно объяснить наличием зоны разупрочнения, прилегающей к линии сплавления, которая обладает повышенной пластичностью по отношению к основному металлу.

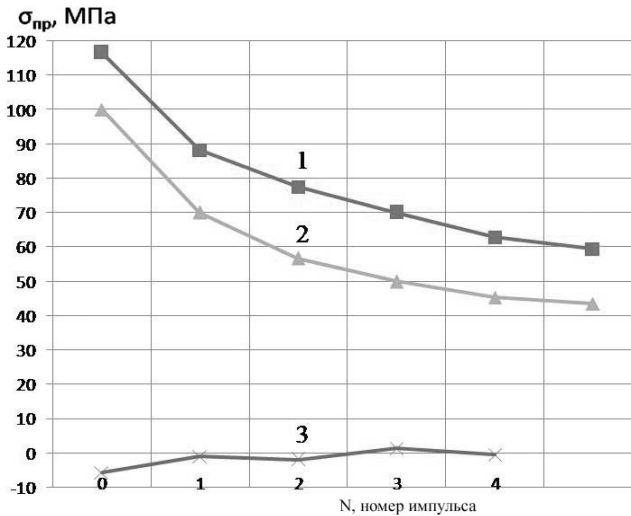


Рис. 2. Релаксация предварительных напряжений в алюминиевых сплавах после ЭДО, где кривые:

1 — растяжение образцов сплава АМг6, 2 — растяжение образцов сварного соединения сплава АМг5, 3 — сжатие образцов сварного соединения сплава АМг6

Столбчатые образцы сплава АМг6 нагружали продольным сжимающим усилием до значений напряжения, равного 56,8 МПа (рис. 2). После ЭДО серий из четырех ИЭТ падение уровня предварительного нагружения составило до 90% от первоначального. При этом после 3-го ИЭТ имело место начало пластического течения материала, а после 4-го — упрочнение. Остаточные значения сжатия составили 14,2 МПа. После предварительного сжатия образцов сварного соединения сплава АМг5 до значений 91,6 МПа, после серии ИЭТ остаточные значения сжимающих напряжений составили 121,4 МПа.

Выполнили сравнение топографии макрорельефа разрушения, полученного в результате одноосного растяжения основного металла сплава АМг6 в исходном состоянии и с применением ЭДО. Фрактограммы изломов обработан-

ного и необработанного материала представлены на рис. 3, из которого видно, что изломы имеют структуру, сформированную по механизму смешанного разрушения [7]. На рис. 3, б можно видеть, что излом образца, обработанного ИЭТ с одной стороны, имеет развитое волокнистое строение (по сравнению с исходным материалом — рис. 3, а) с глубиной проникновения волокон до 2/3 толщины металла, что свидетельствует об объемном воздействии ЭДО на материал.

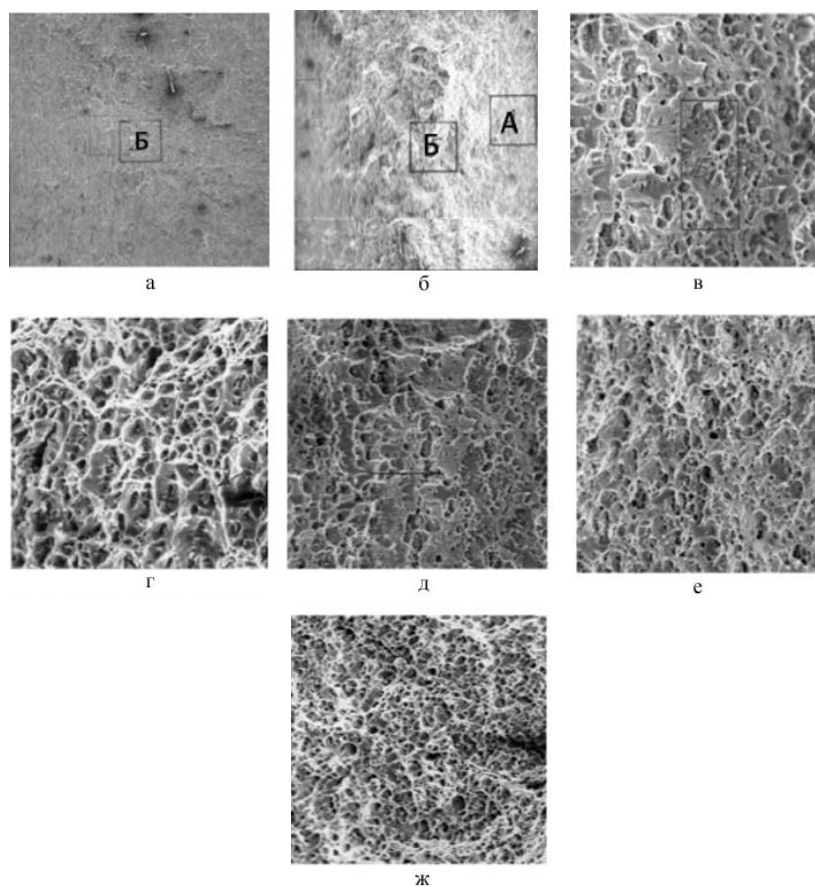


Рис. 3. Общий вид изломов сплава АМг6, полученных при разрушении образцов без ЭДО: а — X33; в — X300; с ЭДО: б — X33; г и д — X300, где зона А — участок вблизи поверхности материала, зона Б — середина поверхности излома

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 имеют место однонаправленные гребни отрыва перемычек и развитые фасетки квазискола (зона Б на рис. 3, в) с площадью до 2500–3000 мкм. При этом топография излома характеризуется структурной неоднородностью, где гребни отрыва чередуются со фрагментами квазискола и ямочным рельефом.

Воздействие ИЭТ приводит к эволюции обработанной структуры в сторону увеличения доли вязкой составляющей. При этом ямочный рельеф и гребни отрыва более развиты по сравнению с исходным материалом. Сравнивали микроструктуру центральных зон поверхностей излома — зоны Б металла в исходном состоянии (рис. 3, *д*) и после ЭДО (рис. 3, *е*), где при сопоставлении фрактограмм 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 токового воздействия снижается доля фасеток квазискола. При этом после ИЭТ в материале преобладают мелкие глубокие равноосные ямки со средним диаметром 5–10 мкм и гребни отрыва перемычек различной ориентации. Средняя толщина гребней в исходном материале и после ЭДО — 2 и 5 мкм соответственно. Интенсивность формирования зоны мелких равноосных ямок повышается в зоне энерговыделения ИЭТ (зона А на рис. 3, *б*), более детально показана на рис. 3, *ж*.

Для сравнительного определения особенностей микромеханизма разрушения сварных соединений алюминиевых сплавов системы Al–Mg и основного металла выполнили оценку изломов стыковых швов из сплава АМг5 в исходном состоянии и после односторонней ЭДО (рис. 4).

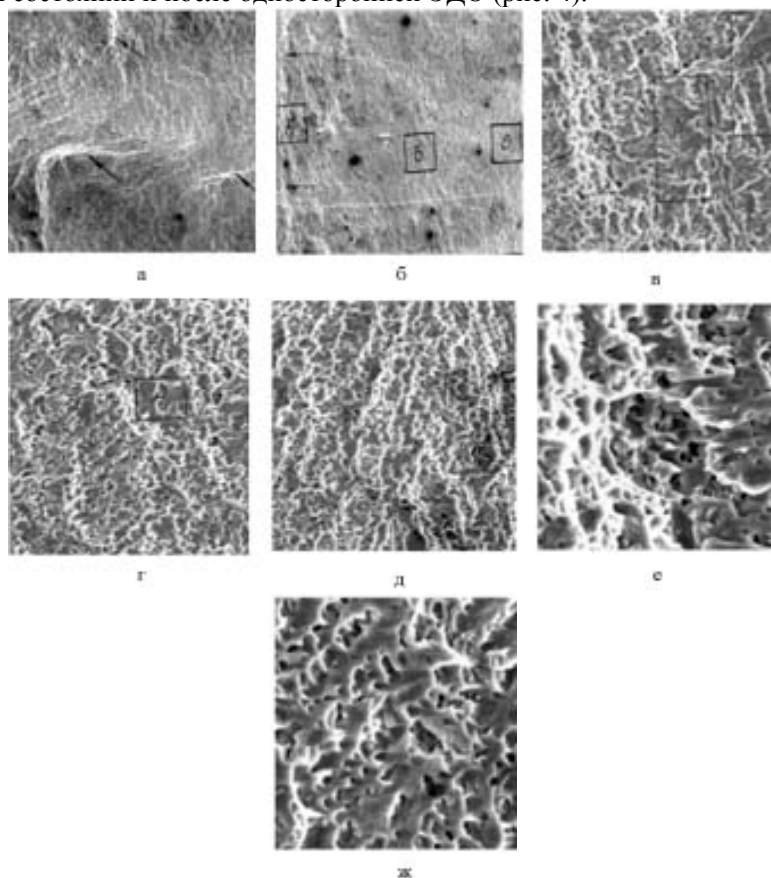


Рис. 4. Общий вид изломов сварных соединений сплава АМг5, полученных при разрушении образцов:

без ЭДО: *а* — X18, *в* — X300, *с* — X1000; с ЭДО: *б* — X18, *д* — X300, *ж* — X1000

Макроструктура рельефа изломов по линии сплавления необработанных образцов имеет многоочаговую структуру разрушения (стрелки на рис. 4, *а*), равномерно распределенную по всей поверхности излома. В некоторой степени отличается топография изломов обработанного соединения, где очаги разрушения сконцентрированы в приповерхностной области (зона А на рис. 4, *б*) со стороны обработанной ИЭТ поверхности образца. При этом расположение очагов направлено параллельно обрабатываемой поверхности (стрелки на рис. 4, *б*). Такой рельеф распространяется вглубь до $2/3$ толщины образца, что аналогично наблюдаемым на основном металле разрушенным образцам сплава АМг6 (рис. 3, *б*). При более детальном рассмотрении рельеф излома сварного соединения в исходном состоянии (рис. 4, *в*) характеризуется мелкочаеистым строением с подплавленными ямками нормального отрыва, неравномерно чередующихся с развитыми гребнями отрыва перемычек толщиной до 25–30 мкм и протяженными участками квазискола (рис. 4, *в*, зона А). Неупорядоченность структуры необработанных участков имеет место в приповерхностных зонах сварных образцов, где участки квазискола занимают до 70% площади излома. Более упорядочен рельеф излома у поверхности металла околосшовной зоны с обработанной стороны (рис. 4, *б*, зона А), более детально показан на рис. 4, *г*. Он характеризуется незначительными по протяженности фасетками квазискола), равномерной структурой равноосных мелких ямок и гребней отрыва, толщина которых не превышает 5–10 мкм. Близка по геометрии и структура серединной поверхности излома (рис. 4, *б*, зона Б), проходящая по границе действия ИЭТ и характеризующаяся "строчечным" расположением гребней (рис. 4, *д*).

В целом, анализируя топографию рельефа изломов основного металла и сварных соединений сплавов АМг6 и АМг5 соответственно, можно отметить, что после ЭДО металл имеет более развитую поверхность микровязкого разрушения с пониженным содержанием структур скола. На основании работы [8], это позволяет за счет увеличения доли вязкой составляющей разрушения регулировать пластические свойства металлов, что позитивно влияет на релаксацию их напряженного состояния.

Металлографические исследования линии сплавления сварных соединений сплава АМг6 в исходном состоянии и после ИЭТ показали (рис. 5), что структура необработанного тока сплава состоит, в основном, из дисперсных выделений β -фазы Al_3Mg_2 в обрамлении силицида магния $MgSi$. β -фаза имеет большую площадь и более светлый оттенок в окружении темных линий и точечных включений силицида магния (рис. 5, *а*, *б*) [9]. Близка по составу и структура центральной зоны обработанного сплава (рис. 5, *в*).

При изучении приповерхностного слоя сплава АМг6 после ЭДО (рис. 5, *г*) вблизи обработанной поверхности на глубине 1,0–1,5 мм наблюдали протяженные и развитые группы линий скольжения (Стрелка на рис. 5, *г*), что, на основании [10], характеризует объемное пластическое деформирование материала, инициируемое ИЭТ. Общая направленность линий совпадает с плоскостью поверхности металла, подвергаемой ЭДО, а сами они объединены в однонаправленные группы полос, что свидетельствует о высокой интенсивности пластического течения материала, инициируемого ИЭТ. Конфигурация линий скольжения, характерна для развитого пластического течения — скольжения с элементами кручения, когда деформация поликристаллической структуры протекает по двум и более направлениям (рис. 6). Закручивание, по данным [10], приводит к существенным объемным искажениям структуры алюминиевых сплавов, о чем в настоящей работе свидетельствует характер изменения рельефа в зоне ЭДО, особенно у обрабатываемой поверхности в зоне энерговыведения ИЭТ (рис. 7).

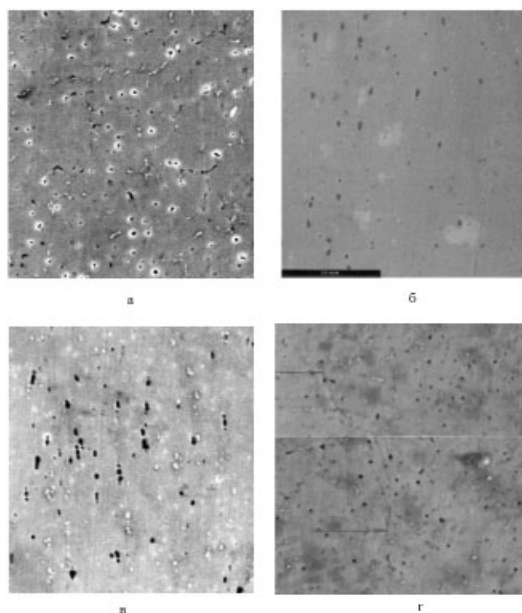


Рис. 5. Структура зоны коло шва сварного соединения сплава АМг5, выполненных аргонодуговой сваркой (X1000) без ЭДО:
а — центральная зона, *б* — приповерхностная зона; с ЭДО: *в* — центральная зона, *г* — приповерхностная зона со стороны ЭДО

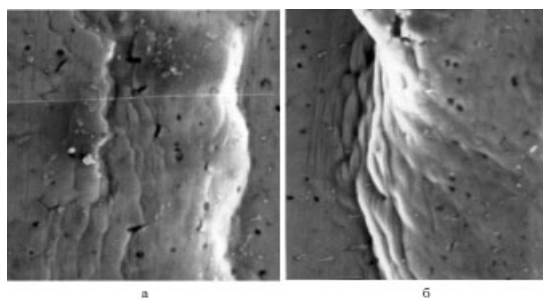


Рис. 6. Линии скольжения в микроструктурах (X1000) сварных соединений сплава АМг5 с ЭДО:
а — плоское скольжение; *б* — скольжение с кручением

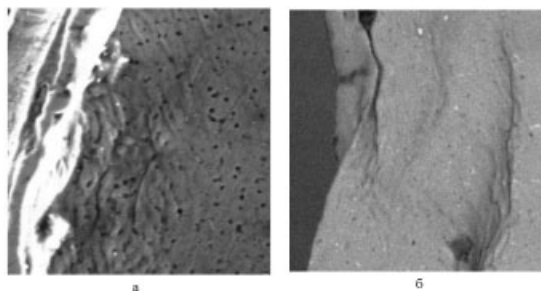


Рис. 7. Линии скольжения в микроструктурах (X1000) поверхности сварных соединений из сплава АМг5 с ЭДО: *а* — плоское скольжение; *б* — скольжение с кручением

При этом имеются различия микрорельефа: плоский тип скольжения (рис. 5, *a* и 6, *a*), скольжение с кручением (рис. 5, *б* и 6, *б*), а также их суперпозиции. Следствием интенсивного пластического течения в приповерхностных слоях материала при ЭДО является деформационное упрочнение, для количественного определения которого измеряли микротвердость H_{μ} на шлифах сварных соединений сплава АМг5 в исходном состоянии и после ЭДО. Измерения проводили на приборе ПМТ-3 "Лесо" при величине нагрузки — 10 гр. Значения H_{μ} для материала в исходном состоянии составляли 82,4 ед. Максимальные значения микротвердости $H_{\mu} = 129–131$ ед. наблюдали в зоне очага разрушения, где имело место скольжение по обоим механизмам. Несколько ниже значения $H_{\mu} = 119–121$ ед. непосредственно у обработанной поверхности в зоне плоского скольжения. Измерения показали, что ЭДО сварного соединения сплава АМг5, вызывает в материале по сравнению с необработанным, деформационное упрочнение на 35–40% которое является следствием развитой пластической деформации. В результате можно прийти к выводу о том, что суперпозиция упругих напряжений растяжения и ИЭТ вызывает в сплавах системы Al–Mg интенсивное пластическое течение, результатом которого является снижение уровня начального напряженного состояния.

Выполнены металлографические исследования микроструктуры металла шва столбчатых образцов сварных соединений сплава АМг6 в исходном состоянии и после ИЭТ в состоянии упругого сжатия. Структура материала в исходном состоянии (рис. 8, *a*) близка к представленной на рис. 5 и состоит, в основном, из выделений β -фазы Al_3Mg_2 в обрамлении силицида магния MgSi. Деформированная структура металла после перегрузки сжатием и ЭДО представлена на рис. 8, *б*.

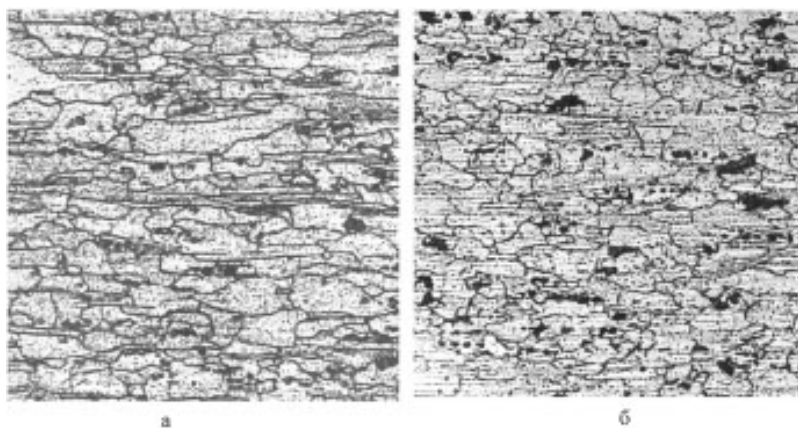


Рис. 8. Микроструктуры сварного шва сплава АМг6 (x320): *a* — исходное состояние; *б* — после ЭДО

Это говорит о том, что ИЭТ вызывают релаксацию упругих деформаций сжатия, преобразуя их в пластические, следствием чего является искажение зерен. Следовательно, можно предположить, что совместное действие сжимающих нагрузок и ИЭТ могут инициировать в материале формирование локальных зон пластического сжатия, позволяющих регулировать его замедленное разрушение.

Выводы

Предложена экспериментальная методика изучения механизма релаксации напряженного состояния прямоугольных образцов металлов и сварных соединений при воздействии ИЭТ.

На основании результатов обработки образцов основного металла и сварных соединений сплавов АМг5 и АМг6 установлено, что ЭДО может вызывать относительное снижение исходного уровня напряжений на 50–60% при растяжении и на 90% — при сжатии.

Фрактографические исследования сплавов АМг5, АМг6 и их сварных соединений показали, что ЭДО повышает долю микровязкого разрушения материала за счет увеличения площади ямочной структурой и снижения фасеток квазискола.

На основании металлографических исследований микрошлифов сварных соединений сплава АМг5 установлено, что ЭДО вызывает в металле пластическое течение, характеризующееся полосами скольжения различной ориентации, результатом которого является деформационное упрочнение обрабатываемого материала на 35–40%.

Исследования микрошлифов образцов сварных соединений сплава АМг6 после ЭДО в состоянии сжатия показали, что ИЭТ совместно с упругим нагружением инициируют в металле пластические деформации, результатом которых является искажение структуры зерен.

Исследованы особенности эволюции структурообразования алюминиевых сплавов АМг5, АМг6 и их сварных соединений при электродинамической обработке (ЭДО) в условиях упругого нагружения. Установлено, что при ЭДО увеличивается вязкая составляющая разрушения, имеет место пластическая деформация по механизму скольжения (кручения), вызывающая деформационное упрочнение металла до 40%. Уровень начальных растягивающих напряжений при ЭДО снижается на 50–60%, сжимающих — на 90%.

Ключевые слова: *алюминиевые сплавы, сварные соединения, электродинамическая обработка, импульсы тока, напряженно-деформированное состояние, ямочный излом, фасетки квазискола, гребни отрыва, вязкость, пластичность, хрупкость, микротвердость, фрактографические исследования, излом, микромеханизм разрушения, пластические деформации, полосы скольжения, скольжение кручением.*

The features of structure formation evolution of AMg5, AMg6 aluminium alloys and their welded connections at electrodynamic treatment (EDT) in the elastic loading conditions are investigated. It is found that at EDT the fracture viscous component is increased, there is a plastic deformation on the sliding (torsion) mechanism causing the deformation strengthening of metal to 40%. The level of initial tensile stresses at EDT reduced by 50–60% and compression ones — by 90%.

Keywords: *aluminium alloys, welded connections, electrodynamic treatment, current pulses, mode of deformation, hole fracture, quazicleavage facets, detachment ridges, plasticity, brittleness, microhardness, fractographic investigations, fracture, fracture micromechanism, plastic deformations, slide bands, sliding by torsion.*

1. *Лобанов Л. М.* 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. школа, 1985. – 312 с.
3. *Батаронов И. Л.* Механизмы электропластичности // Соросовский образовательный журнал. – 1999. – № 10. – С. 93–99.
4. *Лобанов Л. М.* Влияние электродинамической обработки на напряженное состояние сварных соединений алюминиевого сплава АМг6 / Л. М. Лобанов, Н. А. Пашин, В. П. Логинов // Автоматическая сварка. – 2007. – № 6. – С. 11–13.
5. *Стрижало В. А.* Прочность материалов при криогенных температурах с учетом воздействия электромагнитных полей / В. А. Стрижало, Л. С. Новогрудский, Е. В. Воробьев. – К.: Ин-т пробл. прочности НАН Украины, 2008. – 504 с.
6. *Лобанов Л. М.* Влияние электродинамической обработки на напряженно-деформированное состояние теплоустойчивых сталей / Л. М. Лобанов, Н. А. Пашин, В. М. Скульский // Автоматическая сварка. – 2006. – № 5. – С. 28–32.
7. *Разрушение* алюминиевых сплавов. Атлас фактограмм / С. М. Кишкина, В. Л. Браташев, Н. В. Гук и др. – М.: ВИАМ, 1988. – 168 с.
8. *Деформация* и механика разрушения конструкционных материалов / Хорцберг Р. В. – М.: Металлургия, 1989. – 576 с.
9. *Металловедение* сварки плавлением / В. Ф. Грабин. – К.: Наук. думка, 1982. – 416 с.