

УДК 621.791.09:785.375:539.4

Л. М. Лобанов, Н. А. Пашин, Т. Г. Соломійчук,  
О. Л. Миходуй, А. В. Черкашин

## ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АМГ6 В ЗОНЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

*Досліджено вплив різної конфігурації розрядного контуру на амплітудні значення імпульсного струму та динамічного навантаження при електродинамічній дії. Показано вплив імпульсного струму, динамічного навантаження, а також їх суперпозиції на зміну структури алюмінієвого сплаву АМГ6.*

**Ключові слова:** електродинамічний вплив, імпульсний струм, динамічне навантаження, мікроструктура, мікротвердість, алюмінієвий сплав, гарячі тріщини, пластична деформація, зарядна напруга, розрядний контур.

Методы обработки металлических материалов и их сварных соединений воздействием импульсных электромагнитных полей находят все более широкое применение при регулировании напряженного состояния элементов сварных конструкций. [1, 2].

Одним из таких методов является электродинамическая обработка (ЭДО), основанная на совместном импульсном воздействии электрического тока и динамического давления на токопроводящие материалы.

Электродинамическое воздействие на металл при ЭДО реализуется посредством контакта рабочего электрода с поверхностью металла в момент разряда емкостного накопителя энергии и является результатом совместного воздействия динамической нагрузки и импульсного тока на обрабатываемый материал. Исследования проводили, оценивая влияние на эффективность обработки параметров электродинамического воздействия, таких как зарядное напряжение и емкость накопителя, амплитудные значения импульсного тока и параметры динамического давления [3]. В процессе прохождения токового разряда в обрабатываемом материале инициируются электроимпульсные процессы, связанные с механизмом электропластичности [4], а так же динамические процессы, определяемые формированием в материале волн нагрузки. Результатом совместного протекания электропластических и динамических процессов при прохождении импульсного тока через обрабатываемое изделие является изменение структуры материала. При этом до настоящего времени вопросам изучения вклада каждого из двух перечисленных механизмов в структурообразование металлических материалов при ЭДО не уделялось необходимого внимания. Следует отметить, что изменение структуры обработанной поверхности может влиять на механические характеристики материала, например, на сопротивление усталости.

---

© Лобанов Леонід Михайлович, академік НАН України, заступник директора ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України, Пашин Микола Олександрович, Миходуй Ольга Леонідівна, канд. техн. наук, наукові співробітники цього ж інституту, Соломійчук Тетяна Григорівна, Черкашин Александр Володимирович — інженери цього ж інституту.

Цель настоящей работы — исследовать влияние параметров электродинамического воздействия, таких как импульсный ток и динамическая нагрузка, на изменение структуры алюминиевого сплава АМгб в зоне ЭДО.

Эффективность ЭДО определяется совместной работой элементов разрядного контура, входящих в состав устройства для ЭДО, в период времени, соответствующий разряду емкостного накопителя. Использовали различные варианты схем разрядного контура, представленные на рис. 1, а-в.

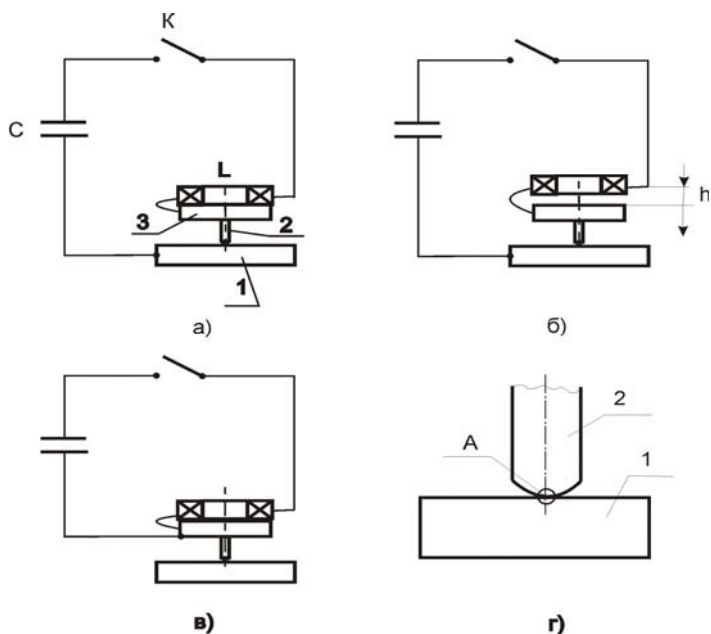


Рис. 1. Различные схемы разрядного контура при ЭДО: разряд тока проходит через плоский индуктор L, диск (поз. 3), электрод (поз. 2) и образец металла (поз. 1), где С — емкостной накопитель, К — контактор (а); разряд тока проходит аналогично (а), но между плоским индуктором и диском выставлен воздушный зазор  $h$  (б); разряд тока проходит через плоский индуктор и диск (в), структурообразование зоны А при сопряжении контактных поверхностей металла (1) и электрода (2) по условию “плоскость–сфера” (г)

В настоящей работе использовали установку для ЭДО, принцип работы которой изложен в [5], конструктивные особенности элементов разрядного контура, обеспечивающих электродинамическое воздействие на обрабатываемый металл — в [3]. В состав установки входили емкостной накопитель С, плоский индуктор L, электрод медный (рис. 1, а, поз. 2) и диск (поз. 3) из неферромагнитного материала. Накопитель С предназначен для инициирования разряда импульсного электрического тока в обрабатываемый металл (поз. 1) в момент замыкания контактора К. При прохождении разряда через индуктор L в нем возбуждается импульсное магнитное поле, которое, за счет электродинамического взаимодействия с диском обеспечивает передачу динамической нагрузки электрода на металл. Таким образом, эффективность ЭДО определяется взаимодействием двух параметров — динамической нагрузки, задаваемой взаимодействием элементов “индуктор (L) + диск (поз. 3) + электрод (поз. 2)” и электропластического эффекта, возникающего вследствие прохождения импульсного электрического тока через обрабатываемый материал (поз. 1).

Исследовали влияние различных схем разрядного контура на параметры электродинамического воздействия при ЭДО, такие как амплитудные значения силы импульсного тока  $I$  и динамической нагрузки  $P$  в период времени разряда емкостного накопителя. Измерения  $I$  и  $P$  выполняли на аппаратном комплексе, принцип работы которого изложен в [3]. Значения импульсного тока  $I$  регистрировали бесконтактным методом пояса Роговского, параметры динамической нагрузки  $P$  — при помощи пьезоэлектрического датчика давления, а в качестве обрабатываемого материала применяли цилиндрический образец из алюминиевого сплава АМг6 диаметром и высотой соответственно 8,0 и 10,0 мм [3].

Использовали три варианта схемы, в которых было реализовано как совместное воздействие динамической нагрузки и импульсного тока на металл, так и каждого из перечисленных факторов в отдельности.

В первом варианте схемы (рис. 1, а) разрядный ток протекал через индуктор  $L$ , диск (поз. 3), электрод (поз. 2) и обрабатываемый металл (поз. 1). В этом случае параметры  $I$  и  $P$  определялись электродинамическим взаимодействием элементов контура, таких как “индуктор + диск” и “электрод + металл”.

При втором варианте (рис. 1, б) индуктор  $L$  был удален от диска на расстояние  $h = 10$  мм, но входил в состав контура. Это исключало фактор динамического давления индуктора на диск при сохранении равенства сопротивлений разрядных цепей (рис. 1, б) и (рис. 1, а). Так как влияние магнитного поля на металл при данной схеме обработки незначительно, то влияние изменения индуктивности магнитного поля при удалении индуктора на структурные особенности сплава АМг6 не учитывалось.

В третьем варианте (рис. 1, в) разрядный контур был замкнут на индуктор  $L$  и диск, что исключало прохождение тока через обрабатываемый металл и позволяло оценить вклад динамической нагрузки  $P$ , как результат взаимодействия элементов контура “диск + электрод” в электродинамическое воздействие при ЭДО.

Исследования влияния различных схем разрядного контура на параметры  $P$  и  $I$  проводили при значении зарядного напряжения  $U$  емкостного накопителя, которое составляло 500 В. Суммарная емкость батареи конденсаторов марки EVOXRIFA 2200, входящих в состав разрядного контура, составляла 6600 мкФ. Погрешность измеряемых параметров электродинамического воздействия не превышала 5%.

Амплитудные значения импульсного тока  $I$  и динамической нагрузки  $P$  при различных схемах разрядного контура представлены на рис. 2. Из рисунка видно, что при использовании схем, реализующих воздействия тока и динамической нагрузки (рис. 1, а), а так же только динамической нагрузки (рис. 1, в) значения  $I_{\max}$  находились в диапазоне значений 2908–3080 А (рис. 2, а, в, кривая 1), которые при заявленной погрешности измерений можно принять близкими. В то же время если максимальное значение динамической нагрузки  $P_{\max}$  для варианта (рис. 1, а) составляло 20461 Н (рис. 2, а, кривая 2), то для варианта, при котором обрабатываемый материал исключен из разрядного контура и находится под воздействием только динамической нагрузки (рис. 1, в),  $P_{\max}$  не превышало 17895 Н (рис. 2, в, кривая 2), что меньше предыдущего на 12%. Повышенные значения  $P_{\max}$  для контура, представленного на рис. 1, а по сравнению с рис. 1, в можно объяснить совместным воздействием элементов контура, таких как “индуктор + диск” и “электрод + металл” на обрабатываемый металл. В варианте, показанном на рис. 1, в, действие пары “индуктор + диск”

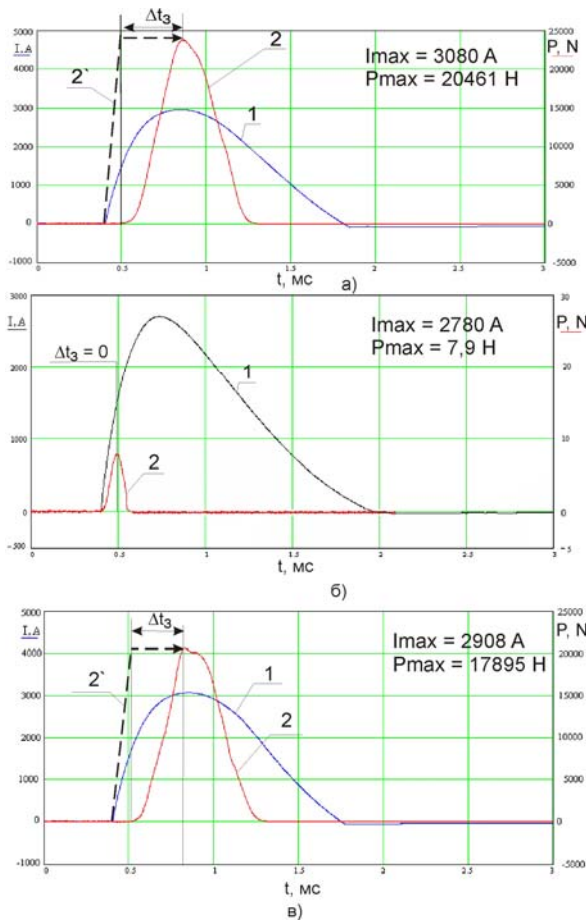


Рис. 2. Амплитудные значения импульсного тока  $I$  (кривая 1) и динамического давления  $P$  (кривая 2) при различных схемах разрядного контура для ЭДО: значения  $I$  и  $P$  определяются схемой разрядного контура на рис. 1, а (... $t_3$  – период рассогласования между теоретическим (кривая 2\*) и истинным (кривая 2) значениями  $P$ ) (а); б) -/- на рис. 1, б; в) -/- на рис. 1, в

исключено и металл подвержен воздействию только динамической нагрузки. При этом периоды времени воздействия параметров  $I$  и  $P$  на металл для двух рассматриваемых вариантов схемы были сопоставимы между собой и не превышали соответственно 1,42 и 0,87 мс (рис. 2, а, в).

Иную картину распределения значений  $I$  и  $P$  наблюдали при отсутствии динамической нагрузки в варианте схемы контура, когда индуктор был удален

от диска (рис. 1, б). Так, период действия импульсного тока  $I$  составлял 1,62 мс, а максимальная величина тока  $I_{max}$  составляла 2780 А (рис. 2, б, кривая 1). При этом скорости нарастания и спада тока в случае удаленного индуктора (рис. 1, б) были соответственно 8687 и 2138 А/мс. Таким образом, уменьшение индуктивности рассматриваемого контура, при равных значениях зарядного напряжения и, соответственно, энергии накопителя, приводит к увеличению скорости нарастания импульсного тока более чем в семь раз, а убывания — в два. Максимальное значение динамической нагрузки  $P_{max}$  при удаленном индукторе составляло 7,9 Н, а период действия — 0,16 мс, (кривая 2, рис. 2, б). Абсолютные значения скоростей нарастания/убывания значений  $P$  на рис. 2, б (соответствует схеме рис. 1, б) были 79 Н/мс.

Значения  $P_{max}$ , определяемые взаимодействием пары “электрод + металл”, соответствуют по времени значению импульсного тока, равному 0,5  $I_{max}$ , что видно из соотношения пиков кривых 1 и 2 (рис. 2, б), и подтверждается современными представлениями о механизме электромагнитных воздействий на особенности деформирования конструкционных материалов[6].

При реализации схем контура, представленных на рис. 1, б, (динамическая нагрузка отсутствует), электродинамическое воздействие определяется парой “электрод + металл”. В этом случае максимальные значения импульсного тока  $I_{max}$ , инициирующие механизмы электропластичности, соответствуют по времени динамической нагрузке  $P = 0$  при удаленном от диска индукторе L

(кривые 1, 2, рис. 2, б), следствием чего является несовпадение по времени составляющих электродинамического воздействия.

Исходя из вышесказанного, теоретические и реальные кривые нарастания динамической нагрузки  $P$  при реализации схем разрядного контура с индуктором (рис. 1, а, в) имеют вид, представленный на рис. 2, а, г (соответственно кривые 2\* и 2). Теоретические и истинные значения скоростей нарастания  $P$  для базового варианта схемы, показанной на рис. 1, а, были соответственно 204610 и 40922 Н/мс, что свидетельствует о том, что при заявленных электрических параметрах контура реальное нарастание нагрузки происходит в пять раз медленнее теоретического. При реализации схемы воздействия динамической нагрузки (рис. 1, г) теоретические и истинные скорости ее нарастания были соответственно 178950 и 39766 Н/мс, то есть реальное нарастание  $P$  было меньше теоретического в 4,5 раза. При сравнении относительных значений теоретических и реальных скоростей нарастания  $P$  для вариантов контура, показанных на рис. 1, а и рис. 1, г, которые соотносятся как 5/4,5, можно заключить, что электродинамическое взаимодействие пары "электрод + металл" не только повышает максимальные значения амплитуды динамической нагрузки  $P$  (о чем было сказано выше), но и интенсифицирует процесс ее нарастания.

Следует отметить, что периоды запаздывания  $t_z$  между теоретическим (кривые 2\*) и истинным (кривые 2) расположением значений  $P_{\max}$  на временной шкале (рис. 2, а, в) обеспечивают совпадение по времени составляющих электродинамического воздействия на обрабатываемый материал. Процесс запаздывания реального нарастания динамической нагрузки  $P$  по сравнению с теоретической на период рассогласования —  $t_z$  можно объяснить пластическим деформированием поверхности обрабатываемого металла при ее контактом взаимодействии со сферической поверхностью электрода в момент разряда емкостного накопителя. При этом периоды  $t_z$  для вариантов контура (рис. 1, а) и (рис. 1, в) составляют соответственно 0,38 и 0,32 мс. Большее значение  $t_z$  для контура, реализующего две составляющие электродинамического воздействия, можно объяснить влиянием пары "электрод + металл", инициирующей эффект электропластичности, следствием которого является пониженное сопротивление материала деформированию [4] при ЭДО.

Проводили металлографические исследования, показывающие влияния электродинамических воздействий при различных схемах разрядного контура (рис. 1) на изменения структуры сплава АМг6.

Образцы для изучения структуры металла изготавливали по стандартной методике с применением алмазных паст различной дисперсности. Для выявления микроструктуры образцы подвергались химическому травлению в 0,5% водном растворе плавиковой кислоты. Металлографические исследования осуществляли на микроскопе НЕОРНОТ-32 при различных увеличениях. Цифровое изображение микроструктур получали с помощью фотокамеры С-3000 OLIMPUS. Твердость по Виккерсу измеряли на микротвердомере М-400 LECO при нагрузке 25 гр.

Исследование образцов сплава АМг6 без применения ЭДО показало, что микроструктура основного металла (рис. 3) однотипна и представляет собой светлую матрицу ( $\alpha$  — твердый раствор) с выделением двух фаз — темнотравящейся, ориентированной вдоль направления проката и мелкой светлосерой фазы, расположенной как по телу зерна, так и по границам зерен в виде цепочек. Темная фаза представляет собой  $\beta$ -фазу ( $Mg_5Al_8$ ), а светлая — силицид магния ( $Mg_2Si$ ).



Рис. 3. Микроструктура сплава АМг6 без применения ЭДО,  $\times 500$

Анализируя изменение структуры сплава АМг6, вызванного ЭДО, реализуемыми при различных составляющих разрядного контура, представленных на рис. 1, можно видеть, что максимальное влияние на металл оказывает совместное воздействие

импульсного тока и динамической нагрузки, реализуемое при схеме контура, показанной на рис. 1, а. В зоне контактного взаимодействия электрода и металла (соответственно поз. 1 и поз. 2 на рис. 1, а) формируется полусферическая лунка диаметром и высотой соответственно 3,0 и 0,35 мм (рис. 4, а). В приповерхностном слое обработанного металла имеет место измельчение его структуры (по сравнению с необработанным — рис. 3), неупорядоченностью ориентации  $\beta$ -фазы относительно направления проката (рис. 4, б), а так же увеличением ее доли в фазовом составе сплава АМг6. Микроструктура металла у поверхности лунки имеет отличия в средней части (зона А, рис. 4, а), а так же по краям лунки (Б1 и Б2) в местах ее выхода на недеформированный металл.

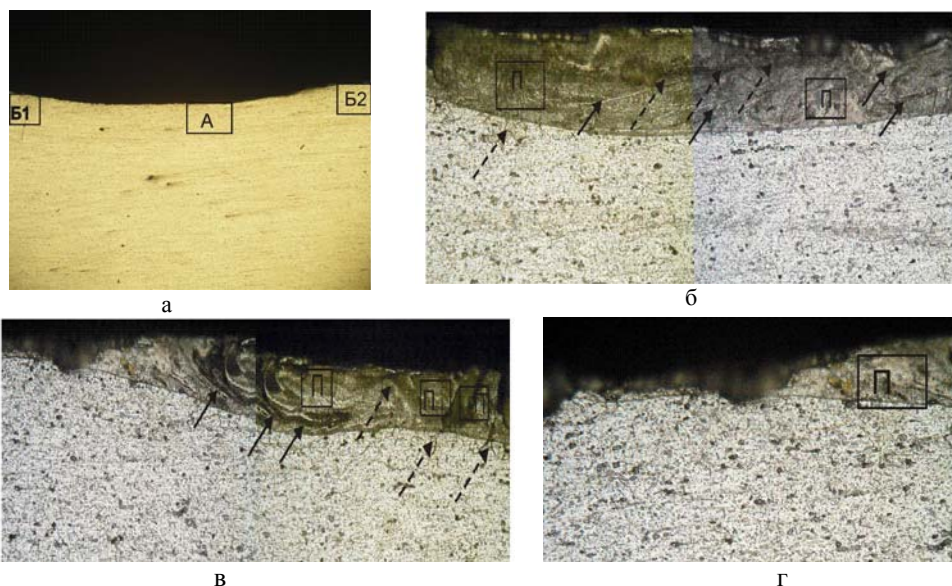


Рис. 4. Эволюция структуры сплава АМг6 после ЭДО по схеме на рис. 1, а: общий вид полусферической лунки ( $\times 25$ ), где зоны А и Б1- Б2 соответствуют рис. 1, г и рис. 1, д (а); микроструктура приповерхностного слоя зоны А ( $\times 500$ ), где зона П — оплавленная структура, сплошные и пунктирные стрелки — соответственно деформированная и расслоенная структура (б); -//- зоны Б1 ( $\times 500$ ), где обозначения аналогично рис. 4, б (в); -//- зоны Б2 ( $\times 500$ ), где зона П — оплавленная структура (г)

Зона А занимает до 10% площади поверхности лунки, имеет развитую микроструктуру, которая характеризуется наличием чередующихся участков

оплавленного и деформированного металла глубиной до 100 мкм. Структурообразование зоны А определяется контактным взаимодействием сферического торца электрода с плоской поверхностью обрабатываемого металла в начальный период электродинамического воздействия. Из рис. 2, а, отражающего временное соотношение гармоник импульсного тока  $I$  и динамической нагрузки  $P$ , можно видеть, что в период  $t = 0-0,09$  мс нарастание значения  $I$  от 0 до 1500 А происходит при  $P = 0$ , что определяет условия контакта пары "металл–электрод", как сопряжение поверхностей "плоскость(металл)–полусфера(электрод)" (рис. 1, г). Площадь сопряжения электрода с поверхностью металла при  $P = 0$  составляет  $0,2 \text{ мм}^2$  и, соответственно, плотность  $j$  импульсного тока  $I$  при  $t = 0,09$  мс достигает  $j = 7,5 \text{ кА/мм}^2$ , что вызывает оплавление в зоне контакта в форме кратера (зона П, рис 4, б). Следует отметить, что нарастание динамического давления вызывает пластическое деформирование нагретого металла в зоне оплавления (сплошные стрелки на рис. 4, б), следствием которого является локальное расслоение его структуры с образованием горячих микротрещин (пунктирные стрелки на рис. 4, б).

При нарастании  $P$  до максимальных значений  $P = 20461 \text{ Н}$  значения  $j$  снижаются до  $j = 0,44 \text{ кА/мм}^2$ , при котором фаза плавления отсутствует, а сопряжение контактных поверхностей соответствует условию "сфера–сферическая лунка". Микроструктура металла между зонами А и Б на рис. 4, а соответствует представленной на рис. 4, б. При этом структура краевых участков лунки в зонах Б1 и Б2 различаются между собой. При оценке геометрических характеристик краевых участков на рис. 4, а можно видеть, что зона Б1 имеет четко выраженный край в форме зубца, в то время как зона Б2 плавно переходит в основной металл. Форма краевых участков свидетельствует о том, что со стороны зоны Б2 имел место выплеск расплавленного металла на завершающей стадии процесса идентификации электрода в обрабатываемый материал. При этом со стороны зоны Б1 осуществлялось контактное взаимодействие электрода с поверхностью металла, находящегося в твердой фазе.

Структурный анализ зоны Б1 (рис. 4, в) показал наличие участков интенсивного пластического деформирования (сплошные стрелки на рис. 4, в), чередующихся с оплавленными зернами (зона П) и горячими микротрещинами (пунктирные стрелки). По сравнению с зоной А зона Б1 отличается большими объемами пластически деформированного металла, что видно при сравнении рис. 4, б и рис. 4, в. Это можно объяснить тем, что формирование зоны Б1 происходит на завершающей стадии динамической нагрузки  $P$ , которая соответствует максимальному идентификации электрода в обрабатываемый металл. Из рис. 2, а видно, что после достижения  $P_{\text{max}}$  динамическая нагрузка снижается до нулевых значений, но при этом затухание импульсного тока происходит медленнее и при  $P = 0$  значения  $I$  составляют 2,2 кА, что соответствует значению плотности тока  $j = 0,31 \text{ кА/мм}^2$ , при котором плавления не наблюдали. В то же время на переходном участке от лунки к основному металлу в зоне Б2 образуется зона перегретого металла, плавление и выплескивание которой наступает при не критических значениях  $j = 0,31 \text{ кА/мм}^2$ . Наличие оплавленных участков в зоне Б2 подтверждается анализом структуры металла, представленной на рис. 4, г (зона П), а отсутствие пластического деформирования и трещинообразования можно объяснить выплескиванием незначительного объема расплавленного металла.

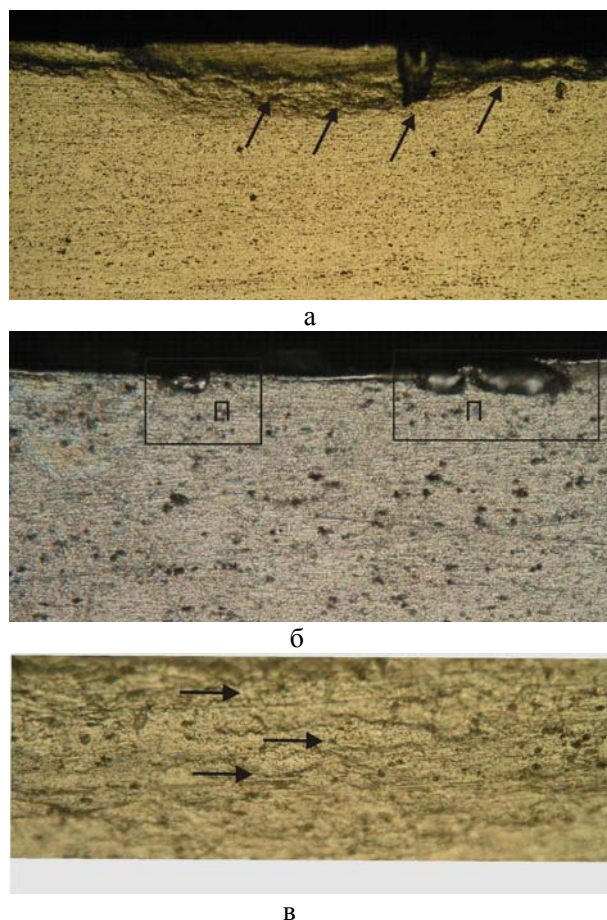


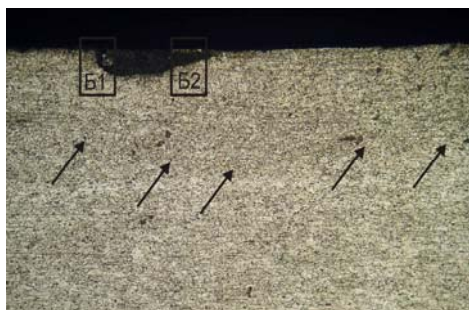
Рис. 5. Эволюция структуры сплава АМг6 после ЭДО по схеме на рис. 1, в: общий вид полусферической лунки ( $\times 100$ ), где зона Д — деформированная структура (а); участки оплавленной структуры — зона П ( $\times 500$ ) (б); увеличенный фрагмент деформированной структуры — зона Д ( $\times 500$ ) на рис. 5, а (стрелками указаны направления линий пластической деформации) (в)

При динамической нагрузке по схеме ЭДО, соответствующей рис. 1, в, форма и размеры лунки близки с представленными ранее. При этом по всей площади контакта электрода на поверхности металла наблюдали развитую пластически деформированную структуру (стрелки на рис. 5, а) с точечными включениями участков оплавленных зерен (рис. 5, б, зона П) в средней части лунки. Следует отметить, что при схеме контура, реализующей чисто динамическую нагрузку по нормали к обрабатываемой поверхности, тепловое воздействие импульсного тока, вызываемое контактным сопротивлением пары “электрод–металл”, исключено. В данном варианте схемы контура имеет место контакт поверхностей из разнородных материалов (медь + алюминий). Согласно [7], в этом случае в течение цикла нагрузки-разгрузки на периферии области взаимодействия пары электрод-металл возникает проскальзывание и трение контактных поверхностей, с сопутствующим выделением тепла. В режиме высокочастотного нагружения, характерного для ЭДО, что подтверждают значения Р (кривые 2, рис. 2), количество выделяемого тепла может вызывать локальное оплавление контактных поверхностей. Таким образом, единственной причиной возникновения участков с оплавленной структурой зерна (зона П, рис. 5, б) является энергия упруго-пластической деформации, частично преобразуемая в тепловую. Диссипация тепловой энергии вызывает локальное оплавление структуры за период времени, соответствующий завершающей фазе идентифицирования электрода в обрабатываемый металл. Это под-



тверждает место расположения оплавленных участков в центральной части лунки, где обрабатываемый металл подвержен максимальным динамическим напряжениям, величина которых, на основании данных рис. 1, в с учетом максимальной площади контактного пятна —  $7 \text{ мм}^2$ , достигает значения  $2560 \text{ МПа}$ , что на порядок выше динамического предела текучести сплава АМг6 [9]. При этом оплавленный металл не оказывает заметного влияния на эволюцию структурообразования сплава АМг6 при динамической нагрузке, так как соотношение оплавленной и деформированной структур в зоне контактного взаимодействия соответственно 1% и 99%. Следует отметить кратковременность образования и затвердевания жидкой фазы, что исключает образование горячих трещин.

Проводили сравнение микроструктур деформированных участков, полученных при динамической нагрузке с сопутствующим пропусканием импульсного тока (рис. 4, д) через обрабатываемый металл по схеме (рис. 1, а) и при чисто динамической нагрузке (рис. 5, в) по схеме (рис. 1, в). При сопоставлении микроструктур, показанных на рис. 4, д и рис. 5, в, можно видеть, что отсутствие токового воздействия приводит к менее развитой структуре деформированного металла, для которой характерно упорядоченное расположение линий деформаций (стрелки на рис. 5, в), направление которых параллельно плоскости поверхности металла.



а



б



в

Рис. 6. Эволюция структуры сплава АМг6 ( $\times 500$ ) после ЭДО по схеме на рис. 1, б: общий вид полусферической лунки ( $\times 100$ ), стрелки указывают границу слоя с измельченной структурой (а); микроструктура зоны Б1 ( $\times 500$ ) на рис. 6, а, где сплошная стрелка указывает на фрагмент нерасплавленной структуры, пунктирные — на горячие трещины (б); микроструктура зоны Б2 ( $\times 500$ ) на рис. 6, а, где зона П — оплавленная структура (в)

Наименее подвержена влиянию электродинамических воздействий структура металла, обработанная только импульсным током (рис. 6) при схеме разрядного контура (рис. 1, б). В отличие от описанных ранее вариантов схем разрядного контура, при обработке импульсным током лунка, соответствующая идентифицированию электрода в обрабатываемый металл, практически отсутствует. На представленном микрошлифе (рис. 6, а) можно видеть, что область электрического контакта имеет каплеобразную несимметричную форму с характерными переходами к основному металлу (зона Б1 и Б2, рис. 6, а). При этом вблизи обработанной поверхности за зоной контакта имеет место увеличение доли  $\beta$ -

фазы, а так же ее эволюция, характеризуемая измельчением структуры и неупорядоченностью относительно направления проката. Граница измельченной структуры обозначена стрелками на рис. 6, а. Более детальное изучение зоны Б1 (рис. 6, б) показало, что в зоне контакта наблюдается оплавленная структура с включениями нерасплавленных зерен (сплошная стрелка на рис. 6, б) и горячих микротрещин по границам кристаллитов (пунктирная стрелка). На основании рис. 6, б можно сделать вывод о том, что в зоне Б1 имеет место неравномерное распределение тепловых потоков, выделяемых в металл при контактом сопротивлении в момент прохождения импульса тока. Наименьшее количество тепла приходится на краевой участок с нерасплавленными зёрнами (сплошная стрелка), где горячие трещины отсутствуют. Более интенсивное тепловыделение, характеризующее образование горячих трещин, имеет место на границе пятна (пунктирные стрелки). Наличие межкристаллитных горячих трещин свидетельствует о наличии жидкой фазы в момент прохождения импульса тока, при последующем охлаждении которой наблюдали проявление ячеистой структуры, ориентированной в поперечном направлении относительно границы раздела между контактными пятном и основным металлом. Детальное рассмотрение зоны Б2 (рис. 6, в) показало, что зона максимума термического влияния импульсного тока располагается на границе контактного пятна и основного металла.

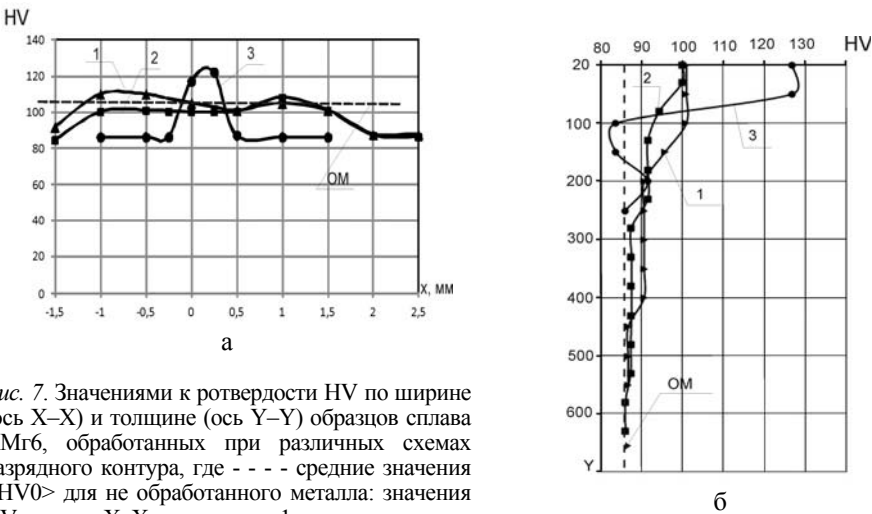


Рис. 7. Значения к ртвердости HV по ширине (ось X–X) и толщине (ось Y–Y) образцов сплава АМг6, обработанных при различных схемах разрядного контура, где - - - средние значения  $\langle HV_0 \rangle$  для не обработанного металла: значения HV по оси X–X, где кривая 1 — динамическая нагрузка, 2 — совместное воздействие импульсного тока и динамической нагрузки, 3 — воздействие импульсного тока (а); значения HV по оси Y–Y, где кривые 1–3 аналогично рис. 1, а (б)

Данный факт подтверждает наличие протяженного участка оплавленных зерен на поверхности основного металла (зона II, рис. 6, в). При этом направление теплового потока ориентировано параллельно поверхности обрабатываемого металла, о чем свидетельствует отсутствие горячих трещин в зоне Б2.

Проводили оценку распределения микротвердости HV образцов сплава АМг6 при различных схемах электродинамического воздействия, представленных на рис. 1. Необходимость исследования изменения HV в продольном и поперечном сечениях образцов продиктована необходимостью определения границы зоны распространения структуры, эволюционирующей в результате обработки материала по различным схемам. Значения HV при различных схемах обработки представлены на рис. 7. При этом средняя ве-

личина  $\langle HV0 \rangle$  для необработанного сплава АМгб составляла 82–90 единиц.

Анализируя характер распространения зоны влияния электродинамических воздействий по ширине образцов, можно заключить, что при динамической нагрузке по схеме на рис. 1, в и совместном воздействии нагрузки и импульсного тока (схема на рис. 1, а) границы эволюционирующей структуры практически совпадают с диаметром контактной зоны идентификации электрода в обрабатываемый металл. Как сказано выше, диаметр контактного пятна для двух приведенных вариантов не превышает 3,0 мм, а из рис. 7, а можно видеть, что кривые 1 и 2 на рис. 7, а, соответствующие распределениям HV для вариантов чистой нагрузки и смешанного воздействия, достигают исходных значений  $\langle HV0 \rangle$  на расстоянии 1,5 мм от центра зоны контакта. При этом некоторое превышение значений HV для варианта чистой нагрузки (кривая 1) по сравнению со смешанным воздействием (кривая 2) можно объяснить локальным деформационным упрочнением сплава АМгб в зоне идентификации. Пониженные значения HV на кривой 2 связаны с разупрочнением металла, вызванным термическим воздействием импульсного тока, что подтверждается наличием оплавленных участков (зона П, рис. 4, в). Иной характер распределения величин HV по ширине образца имеет место при реализации импульсного токового воздействия на металл по схеме, представленной на рис. 1, б. Как видно из кривой 3 рис. 7, а, измененная в результате токового воздействия структура локализована на расстоянии от центра контактной зоны, не превышающего 0,5 мм. При этом распределение значений HV несимметрично относительно центра, что подтверждают геометрические характеристики пятна контакта (рис. 6, а). Это можно связать с описанными выше нестационарными быстро текущими процессами нагрева-охлаждения металла в зоне контактного взаимодействия, имеющими место при импульсном токовом воздействии. В результате в контактной зоне присутствуют фрагменты нерасплавленного металла, горячие микротрещины и оплавленные дендриты (рис. 6), а так же псевдоэвтектические выделения, образующиеся в результате неравновесной кристаллизации [10], формирование которых приводит к резкому повышению значений HV в центре пятна.

Представляет интерес анализ распределения измененной структуры по толщине металла (рис. 7, б), из которого можно видеть, что глубина проникновения ЭДО при всех рассмотренных схемах разрядного контура (рис. 1) не превышает 300 мкм. При этом соотношение кривых 1 и 2, описывающих распределение значений HV для схем контура аналогично рис. 7, а, подтверждает высказанное ранее предположение о роли деформационного упрочнения и термического разупрочнения в структурообразовании при ЭДО. Зона распространения повышенной твердости для варианта импульсного токового воздействия (кривая 3) не превышает 100 мкм, что свидетельствует о ее незначительном влиянии на эволюцию структуры сплава АМгб при его обработке (рис. 1, б).

При сравнении изменений структуры сплава АМгб, возникающих в результате ЭДО при различных схемах разрядного контура, можно заключить, что наибольшее влияние на металл оказывает совместное воздействие импульсного тока и динамической нагрузки (рис. 1, а), а наименьшее — только тока (рис. 1, б). Обработка с применением только динамической нагрузки (рис. 1, в) является промежуточным вариантом, по степени воздействия близким к схеме, показанной на рис. 1, а, но при минимальном оп-

лавлении зерен. В результате проведенных исследований, например [9], установлено, что совместное воздействие импульсного тока и динамической нагрузки является наиболее эффективным с позиций регулирования напряженного состояния поликристаллических структур по сравнению с влиянием каждой из составляющих. Исходя из вышесказанного, при электродинамической обработке металлических материалов целесообразно применение схемы, показанной на рис. 1, а, но с последующим механическим удалением (полированием) приповерхностного слоя обработанного металла. Следует отметить, что электродинамическая обработка предназначена главным образом для регулирования напряженного состояния сварных соединений и объектом воздействия является наплавленный металл шва. Механическое снятие же усиления сварного шва не является сложной технологической операцией.

### Выводы

Разработана экспериментальная методика, на базе которой исследовано влияние различной конфигурации разрядного контура на амплитудные значения импульсного тока и динамической нагрузки при электродинамических воздействиях (ЭДО).

Показано влияние импульсного тока, динамической нагрузки, а так же их совместного воздействия на изменение структуры алюминиевого сплава АМгб в зоне электродинамического воздействия (ЭДО).

На основе данных структурного анализа показано, что максимальное изменение структуры сплава АМгб в зоне ЭДО имеет место при совместном воздействии импульсного тока и динамической нагрузки, а минимальная — при воздействии только импульсного тока.

*Разработана экспериментальная методика, на базе которой исследовано влияние различной конфигурации разрядного контура на амплитудные значения импульсного тока и динамической нагрузки при электродинамических воздействиях. Показано влияние импульсного тока, динамической нагрузки, а так же их суперпозиции на изменение структуры алюминиевого сплава АМгб. На основе данных структурного анализа показано, что максимальная деградация структуры сплава АМгб имеет место при суперпозиции воздействий импульсного тока и динамической нагрузки, а минимальная — при воздействии только импульсного тока.*

**Ключевые слова:** электродинамическое воздействие, импульсный ток, динамическая нагрузка, микроструктура, микротвердость, алюминиевый сплав, горячие трещины, пластическая деформация, зарядное напряжение, разрядный контур.

*The evaluation of parameters of pulsed current and dynamic pressure at electrodynamic treatment was performed, based on the developed experimental procedure. Was showed the influence of current and pressure on the modification micro-structure and micro-hardness of aluminium alloy AMg6.*

**Keywords:** aluminium alloy, pulsed current, charge voltage, electrodynamic treatment, dynamic load, hot crack, plastic distortion, micro-structure, micro-hardness.

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. *Степанов Г. В.* Перераспределение остаточных сварочных напряжений в результате обработки импульсным электромагнитным полем / Г. В. Степанов, А. И. Бабуцкий, И. А. Мамеев и др. // Проблемы прочности. – 2011. – № 3. – С. 123–131.
3. *Лобанов Л. М.* и др. Эффективность электродинамической обработки алюминиевого сплава АМг6 и его сварных соединений / Л. М. Лобанов, И. П. Кондратенко, Н. А. Пашин и др. // Автомат. сварка. – 2012. – № 1. – С. 3–7.
4. *Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы* / Ю. В. Баранов, О. А. Троицкий, Ю. С. Аврамов и др. – М.: МГИУ, 2001. – 844 с.
5. *Лобанов Л. М.* Влияние электродинамической обработки на напряженно-деформированное состояние теплоустойчивых сталей / Л. М. Лобанов, Н. А. Пашин, В. П. Логинов, В. М. Скульский // Там же. – 2006. – № 5. – С. 28–32.
6. *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 проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАНУ. – 2008. – 504 с.
7. *Механика контактного взаимодействия: Джонсон* – К.: М.: Мир, 1989. – 510 с.
8. *Лобанов Л. М.* Эффективность электродинамической обработки сварных соединений сплава АМг6 различной толщины / Л. М. Лобанов, Н. А. Пашин, О. Л. Миходуй // Автомат. сварка. – 2012. – № 3. – С. 12–16.
9. *Альшиц В. И.* Движение дислокаций в кристаллах NaCl при комбинированном воздействии механических и электромагнитных импульсов, создаваемых электронным пучком / В. И. Альшиц, Е. В. Даринская, М. А. Легеньков и др. // Физика твердого тела. – 1999. – Т. 41, Вып. 11. – С. 2004–2006.
10. *Ливанов А. А.* Влияние режимов термической обработки на склонность к коррозии под напряжением и механические свойства алюминиево-магниевого сплава с высоким содержанием магния. – М.: Изд-во АН СССР. – 1962. – Т. 3. – 224 с.