

УДК 621.791.09:785.375:539.4

**Л. М. Лобанов, Н. А. Пашин, Е. Н. Бердникова,  
О. Л. Миходуй, В. А. Ящук**

**ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ОСОБЕННОСТИ  
МИКРОМЕХАНИЗМА РАЗРУШЕНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АМГ6  
ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ**

*Рассмотрены результаты фрактографических исследований влияния электродинамической обработки на повышение сопротивления разрушению плоских образцов алюминиевого сплава АМг6 при циклическом нагружении. Показано, что условия закрепления обрабатываемых образцов оказывают существенное влияние на стойкость сплава АМг6 к зарождению трещины при симметричном цикле нагружения с близкой к условному пределу текучести металла амплитудой.*

**Ключевые слова:** электродинамическая обработка, алюминиевый сплав, анализ фрактограмм, зарождение трещины, стойкость к разрушению.

**Введение**

Использование современной авиационной техники, судокорпусных и транспортных конструкций из сплавов на основе алюминия требует новых подходов к продлению их эксплуатационного ресурса. При этом конструкции эксплуатируются в условиях, при которых уровень внешние нагрузок может стимулировать в изделиях зарождение и развитие усталостных трещин. Исходя из этого, решение проблемы торможения усталостного разрушения является актуальным для продления ресурса тонколистовых конструкций из алюминиевых сплавов.

Существует ряд технологий повышения сопротивления усталости металлов и сплавов, основанных на поверхностном пластическом деформировании последних. К таким технологиям можно отнести высокочастотную механическую проковку [1–2], а также способы повышения сопротивления замедленному разрушению, базирующиеся на обработке металла импульсными электромагнитными полями различной длительности и конфигурации [3].

К методам повышения сопротивления усталости относится и электродинамическая обработка (ЭДО), сочетающая поверхностное пластическое деформирование металла с одновременным пропусканием через него импульсного тока [4]. Механизм замедления старта усталостной трещины при ЭДО базируется на создании в зоне предполагаемого разрушения таких упрочненных участков поверхности металла, которые возникают при его поверхностном электропластическом деформировании в результате электродинамических воздействий.

---

© Лобанов Леонид Михайлович, академик НАН Украины, академик-секретарь Отделения физико-технических проблем материаловедения НАН Украины, член Президиума НАН Украины, доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе Института электросварки (ИЭС) им. Е. О. Патона НАН Украины; раб. тел. (044) 200-24-55; Пашин Николай Александрович (раб. тел. (044) 529-56-09; e-mail: svarka2000@ukr.net), Бердникова Елена Николаевна (раб. тел. (044) 205-25-63), кандидаты технических наук, старшие научные сотрудники, ИЭС; Миходуй Ольга Леонидовна, кандидат технических наук (раб. тел. (044) 205-20-35; e-mail: olga.m@paton.kiev.ua); Ящук Виктор Антонович, руководитель группы ИЭС; 03680, г. Киев, ул. Боженко, 11

Известно [5], что ЭДО увеличивает долю вязкой составляющей изломов образцов сплава АМгб при одноосном статическом растяжении. При этом до настоящего времени не проводились оценочные исследования влияния ЭДО на особенности микромеханизма разрушения подвергаемых циклическому нагружению упомянутых образцов.

*Целью настоящей работы*, соответственно, являлось исследование влияния ЭДО на особенности микромеханизма разрушения образцов сплава АМгб при циклическом нагружении.

### Оборудование и методика исследований

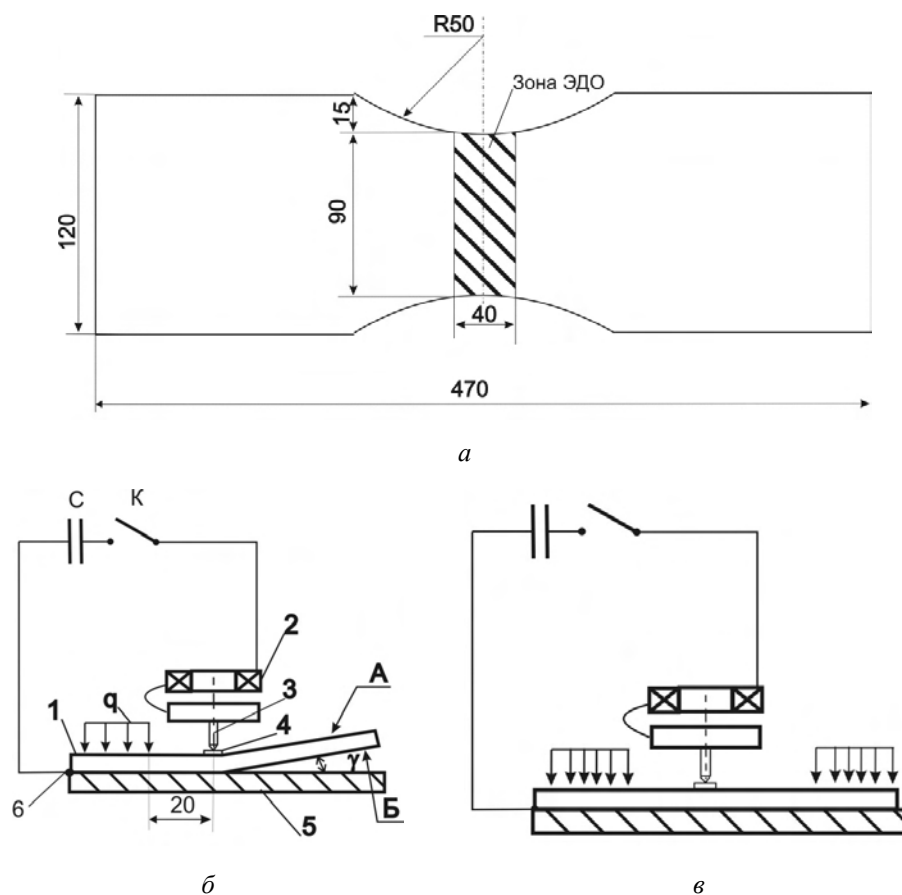
ЭДО выполняли, применяя укомплектованный электродом из меди марки М1 с полусферическим рабочим торцом плоский индуктор, а в качестве генератора импульсов использовали емкостной накопитель энергии [5]. Режим ЭДО обеспечивал запасенную энергию накопителя  $E = 800$  Дж, необходимую для выполнения одноактного электродинамического воздействия ( $n = 1$ ).

С целью оценивания сопротивления усталости сплава АМгб проводили ЭДО образцов толщиной  $\delta = 4,0$  мм, внешний вид которых показан на рис. 1, а. Поверхность металла в зоне предполагаемого разрушения обрабатывали при различных схемах закрепления образцов (рис. 1, б, в), причем зону предполагаемого разрушения определяли на основе анализа развития усталостной трещины при циклических испытаниях не прошедших ЭДО исходных образцов. При этом ЭДО поверхности центральной части образцов проводили так, как показано на рис. 1, а (заштрихованная область).

Использовали три схемы закрепления образцов при ЭДО. При реализации первой из них (рис. 1, б) выполняли обработку только стороны А образца в условиях свободного сопротивления. С этой целью одну из головок образца 1 перед ЭДО жестко фиксировали распределенной нагрузкой  $q$  на сборочной плите 5 и подключали к разрядному контуру контактной клеммой 6, а при этом второй головке обеспечивали возможность свободной реализации возникающих вследствие ЭДО угловых деформаций. Для реализации электродинамического воздействия на рабочую часть образца в зоне обработки устанавливали сопряженный с индуктором 2 электрод 3 и гарантировали его электрический контакт с обрабатываемой поверхностью посредством медной прокладки 4. Замыканием контактора К инициировали разряд емкостного накопителя энергии С (через индуктор и электрод в обрабатываемый материал). В процессе выполнения ЭДО серией из  $n_A$ -разрядов электрод перемещали по поверхности образцов в направлении от центра к краям обрабатываемого участка с шагом 3–5 мм, а именно: при ЭДО стороны А выполняли  $n_A = 135$  электродинамических воздействий, которые обеспечивали равномерное поверхностное электропластическое деформирование обрабатываемого участка металла размерами 90х40 мм (соответствующего заштрихованной области на рис. 1, а).

При реализации второй схемы закрепления выполняли обработку сторон А и Б (также в условиях свободного сопротивления) при  $n_A$  и  $n_B = 135$ . С этой целью, после завершения ЭДО стороны А и снятия нагрузки  $q$ , образец разворачивали на  $180^\circ$  вдоль продольной оси, повторно фиксируя его головку так, как показано на рис. 1, б.

А по третьей схеме (рис. 1, в) обработку только стороны А при  $n_A = 135$  выполняли в условиях жесткого закрепления, для реализации которой перед ЭДО обе головки образца фиксировали, перед подключением к разрядному контуру, нагрузкой  $q$  на сборочной плите.

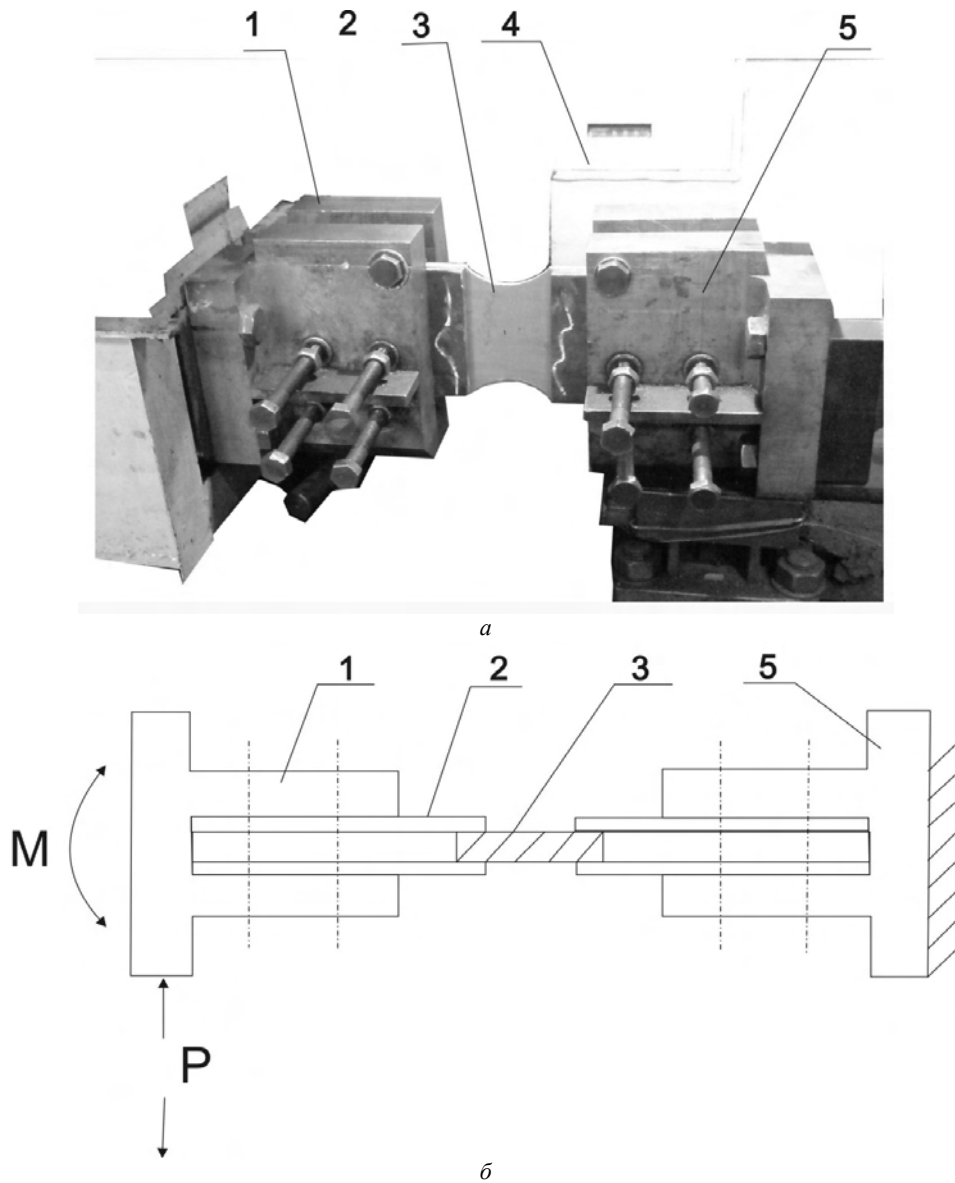


а) внешний вид образца и зоны ЭДО;  
 б) схема ЭДО образца в свободном состоянии, где: С – емкостный накопитель энергии; К – контактор; q – фиксирующая нагрузка;  $\gamma$  – угловая деформация в результате ЭДО; А и Б – обрабатываемые поверхности образца; 1 – образец; 2 – индуктор; 3 – электрод; 4 – прокладка; 5 – сборочная плита; 6 – контактная клемма;  
 в) схема ЭДО образца при жестком закреплении

Рис. 1. ЭДО образцов сплава АМгб

Далее проводили усталостные испытания образцов, обработанных по трем вышеописанным схемам их закрепления. Использовали испытательную машину марки «УПМ-02» (рис. 2, а), обеспечивающую реализацию схемы усталостных испытаний на изгиб (рис. 2, б) при симметричном цикле нагрузки с частотой 14 Гц. Амплитуду цикла задавали равной 160 МПа, а нагружение проводили на протяжении предшествующего появлению трещины инкубационного периода [б] – вплоть до регистрации количества циклов N, соответствующих началу разрушения образцов. После достижения значения N испытания продолжали до момента возрастания длины трещины (с целью изучения характера ее распространения) до 30 мм, а ширину раскрытия трещины определяли с помощью набора слесарных щупов.

С целью изучения влияния ЭДО на особенности микромеханизма разрушения сплава АМгб при циклическом нагружении, проводили фрактографические исследования топографии изломов обработанных при вышеописанных условиях нагружения образцов.



а) внешний вид испытательной машины «УПМ-02», где: 1 – подвижный захват; 2 – фиксирующая пластина; 3 – образец (заштрихована зона предполагаемого разрушения); 4 – счетчик циклов; 5 – неподвижный захват;  
 б) схема испытаний (позиции 1–3 и 5 соответствуют рис. 4, а); М – изгибающий момент  
 Рис. 2. Усталостные испытания образцов сплава АМг6 после ЭДО

В свою очередь, особенности структурных изменений фрактограмм изучали с использованием метода *аналитической растровой электронной микроскопии*.

Исследования проводили, используя оснащенный энергодисперсионным спектрометром системы «LINK» сканирующий электронный микроскоп марки «СЭМ-515» (нидерландской фирмы «Philips»).

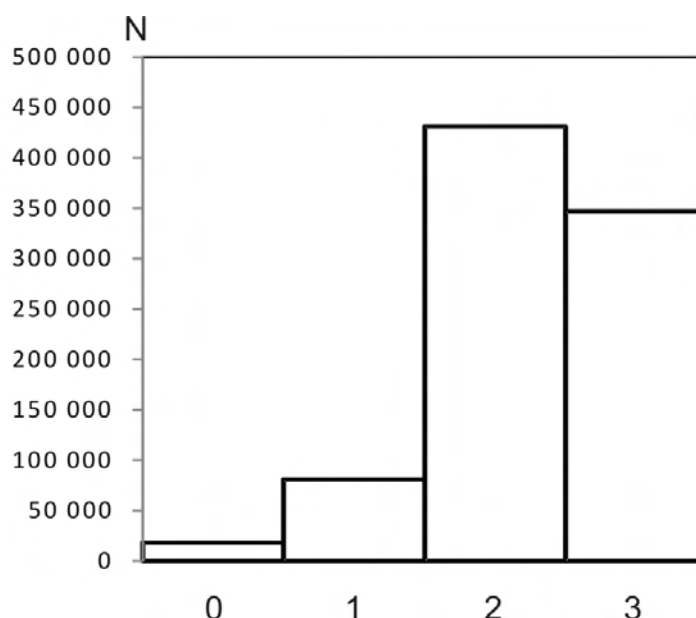
Растровые изображения структур дали возможность получить микроизображения с большой глубиной поля зрения, что, в свою очередь, позволило

исследовать структуры при примерно десятикратных увеличениях. При этом благодаря использованию методов растровой электронной микроскопии стало возможным проведение фрактографических исследований с целью получения информации, в частности, о(б):

- характере разрушения (хрупкое оно, квазихрупкое, вязкое или же смешанное);
- элементах микрорельефа поверхности разрушения (фасетках скола и квазискола, а также ямках вязкого разрушения, вторичных трещинах и пр.);
- вызывающих охрупчивание металла концентраторах трещинообразования и др.

### Результаты исследований и их обсуждение

Количества циклов  $N$  до начала разрушения образцов сплава АМг6 в исходном состоянии (без применения ЭДО), а также обработанных по трем вышеприведенным схемам крепления, представлены на рис. 3. При этом следует отметить, что полученное на образцах без применения ЭДО значение  $N$  не превышало  $1,8 \times 10^4$  циклов. В свою очередь, применение ЭДО при первой и второй схемах увеличило, по сравнению с регистрируемым на необработанном металле, количество циклов  $N$  – соответственно, в 4,5 и 24 раза: до  $8,1 \times 10^4$  и  $43,1 \times 10^4$  – а это позволяет предположить, что интенсификация поверхностного пластического деформирования образцов сплава АМг6 может повысить стойкость к развитию усталостной трещины при сопоставимом количестве реализуемых для двусторонней обработки образцов электродинамических воздействий.

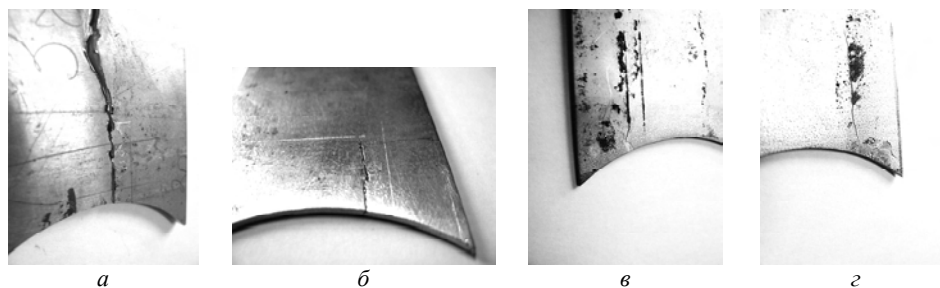


0 – исходное состояние металла (без ЭДО); 1 – односторонняя ЭДО в условиях свободного сопротивления; 2 – двусторонняя ЭДО в тех же условиях; 3 – односторонняя ЭДО в условиях жесткого закрепления

Рис. 3. Влияние схемы ЭДО на количество циклов  $N$  до разрушения при усталостных испытаниях на изгиб и симметричном цикле нагрузки с амплитудой 160 МПа

При этом следует отметить, что использование жесткого закрепления повысило значение  $N$  в 20 раз по сравнению с исходным – до  $34,7 \times 10^4$ . Сравнивая  $N$ , полученные при испытаниях обработанных в условиях реализации второй и третьей схем крепления образцов, можно сделать вывод, что интенсификация пластического деформирования в условиях жесткого закрепления [7] обеспечивает стойкость к развитию усталостной трещины, сравнимую с условиями свободного сопротивления, но при меньшем количестве электродинамических воздействий.

Анализ характера рельефа усталостной трещины при распространении до 30 мм показал, что в исходном состоянии наблюдался линейный характер ее распространения вдоль поперечной оси образца (рис. 4, *а*). При этом ширина ее раскрытия  $b$  на расстоянии 15 мм от свободной кромки образца составляла от 0,45 и более миллиметров.



*а*) образец без обработки;  
*б*) ЭДО стороны А в условиях свободного сопротивления;  
*в*) и *г*) ЭДО сторон А и Б в условиях свободного сопротивления  
 Рис. 4. Внешний вид усталостной трещины при различных схемах ЭДО образцов сплава АМг6

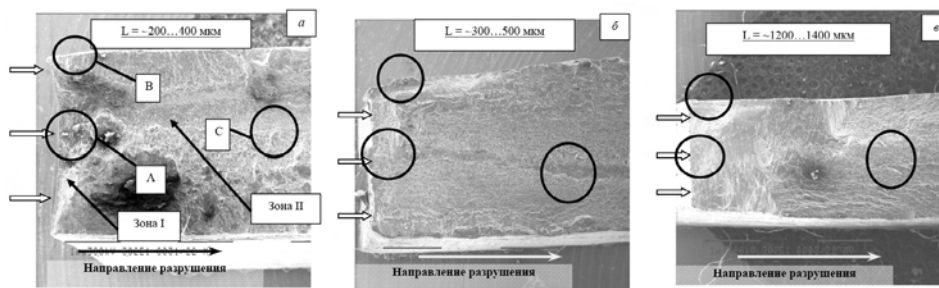
Трещина на поверхности стороны А обработанного при свободном сопротивлении образца имеет более развитую, по сравнению с исходной (без ЭДО), конфигурацию, а значение  $b$  не превышает 0,2 мм (рис. 4, *б*) – что можно объяснить поверхностным пластическим деформированием металла.

Двусторонняя же ЭДО, по сравнению с односторонней (рис. 4, *б*), изменяет характер распространения трещины на обработанных поверхностях у свободной кромки образца (рис. 4, *в*, *г*), а значение  $b$  не превышает 0,12 мм. Так, в зонах старта трещины наблюдали разворот ее фронта на сторонах А и Б от поперечной оси образца, соответственно, на углы, близкие к  $45^\circ$  и  $90^\circ$  – что может быть вызвано эффектом электростимулированной пластичности. А характер распространения трещины у свободной кромки обработанного в условиях жесткого закрепления образца был близок к показанному на рис. 4, *в*, *г* (однако в зоне старта угол разворота ее фронта не превышал  $30^\circ$ , а значение  $b$  достигало 0,15 мм).

На рис. 5, *а–в* показан общий вид поверхности изломов исследуемых образцов и, в частности на: *а* – исходный образец (без применения ЭДО); *б* – образец, обработанный с одной стороны; *в* – с двух. При этом на поверхности излома хорошо просматривается изменение ориентации разрушения при переходе от усталостной трещины к магистральному разрушению. Таким образом, по макростроению изломов возможно обозначить две **зоны**:

I – медленного развития усталостной трещины в направлении от концентратора напряжений (см. тройные стрелки);

II – ускоренного (магистрального) развития трещины, где направление показано черной стрелкой внизу каждого кадра.

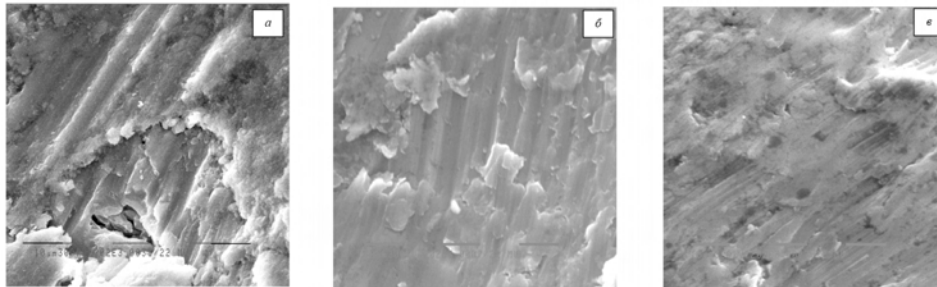


*а)* исходный образец (без ЭДО); *б)* односторонняя ЭДО; *в)* двусторонняя ЭДО  
 Рис. 5. Внешний вид поверхности разрушения образцов сплава АМг6 после циклического нагружения (х30), где  $\Rightarrow$  – направление замедленного развития усталостной трещины в направлении от концентратора напряжений в зоне I;  $\rightarrow$  – направление ускоренного (магистрального) развития трещины в зоне II; разрушение у: А – концентратора напряжений, Б – наружной поверхности, С – магистрального участка

В зоне I изучали участки А и В, первый из которых соответствует концентратору напряжений, а второй – рельефу обработанной поверхности. Эта зона имеет заглаженную поверхность и свидетельствует о первой стадии зарождения разрушения, характеризующейся зарождением трещин и их распространением по плоскостям скольжения. На рис. 5 указаны зона I и ее размер L. Видно, что: на исходном образце (рис. 5, а) протяженность зоны I составляет порядка ~200...400 мкм; в случае обработки с одной стороны (рис. 5, б) L = ~300...500 мкм, а при обработке с двух сторон (рис. 5, в) L = ~1200...1400 мкм. Сопоставлением размеров L зоны I в обработанных образцах с исходным состоянием материала показано, что размер I увеличивается в 1,3...1,5 раза при односторонней обработке и в 3,5...6 раза при обработке с двух сторон – что свидетельствует об увеличении протяженности стадии зарождения разрушения и, соответственно, более длительном процессе распространения усталостной трещины на этой стадии [6]. Анализ же строения исследуемых изломов показал, что в исходном состоянии металл имеет меньшую, чем при односторонней обработке, сопротивляемость развитию трещины, тогда как наибольшая сопротивляемость распространению трещины характерна для двусторонне обработанного образца.

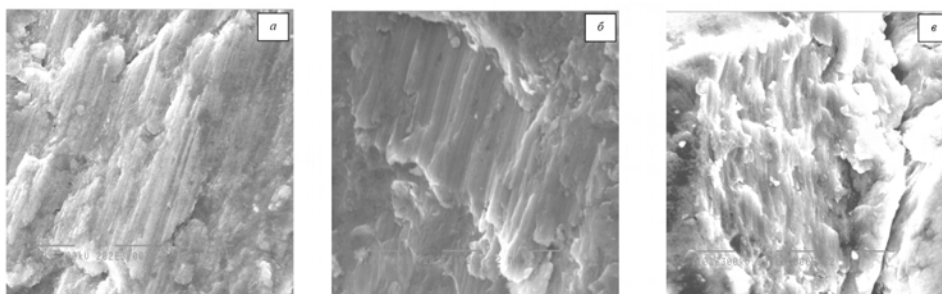
В исследуемых изломах были детально изучены несколько областей (рис. 5, а), а именно – по участкам разрушения в зонах усталостной трещины (зона I зарождения разрушения у концентратора) и магистрального разрушения (зона II) области: «А» – в зоне I; «В» – в зоне I со стороны обработанной боковой поверхности образца; «С» – в зоне II (магистрального разрушения).

Результаты исследований элементов микрорельефа поверхности разрушения зоны I в локальной области «А» (у концентратора напряжений) показаны на рис. 6. В исходном состоянии ширина видимых на поверхности излома полос скольжения составляет  $\delta = \sim 2...5$  мкм (рис. 6, а), тогда как при односторонней обработке  $\delta = \sim 2...4$  мкм (рис. 6, б), а при двусторонней –  $\delta = \sim 1...1,5$  мкм (рис. 6, в). При этом характер разрушения – смешанный, с преобладанием квазихрупкой составляющей.



*а)* исходный образец (без ЭДО); *б)* односторонняя ЭДО; *в)* двусторонняя ЭДО  
*Рис. 6.* Внешний вид поверхности разрушения образцов сплава АМгб в зоне А (рис. 5, *а*) после циклического нагружения (x 2020)

В области «В» зоны I у поверхности образцов в исходном состоянии и при односторонней ЭДО ширина полос скольжения  $\delta = \sim 2...3$  мкм (рис. 7, *а*, *б*), а при обработке с двух сторон  $\delta = \sim 1...2$  мкм (рис. 7, *в*). Также для обработанного с двух сторон образца характерно наличие сглаженных зон со стороны обработанной поверхности в области «В», причем этот факт, наряду с меньшей протяженностью  $\delta$  при двусторонней ЭДО, свидетельствует о повышенной, по сравнению с исходной и односторонней ЭДО, сопротивляемости развитию трещины по плоскостям скольжения.



*а)* исходный образец (без ЭДО); *б)* односторонняя ЭДО; *в)* двусторонняя ЭДО  
*Рис. 7.* Внешний вид поверхности разрушения образцов сплава АМгб в зоне В (рис. 5, *а*) после циклического нагружения (x 2020)

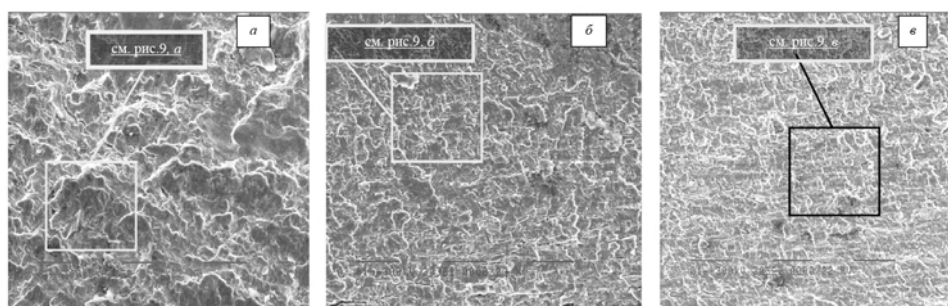
Анализ микрорельефа поверхности разрушения зоны I в локальных областях «А» (у концентратора напряжений) и «В» (со стороны обработанной боковой поверхности) показал, что металл образца после двусторонней ЭДО характеризуется двукратным диспергированием структурных элементов по сравнению с исходным состоянием и односторонней ЭДО – что подтверждается данными испытаний (рис. 3).

Магистральное же разрушение (зона II) в исследуемых образцах развивалось внутризеренно при квазихрупком характере разрушения, однако по размерам элементов микрорельефа (фасеткам) на рис. 8 видны существенные отличия. Детальными исследованиями зоны II в области «С» установлено (рис. 9, 10), что в исходном состоянии размер фасеток  $d_f = 30...70$  мкм (рис. 9, *а*), а ширина полос скольжения  $\delta = \sim 2...3$  мкм (рис. 10, *а*). После односторонней ЭДО  $d_f = 20...50$  мкм (рис. 9, *б*),  $\delta = \sim 1...2$  мкм (рис. 10, *б*), а после двусторонней –  $d_f 10...20$  мкм (рис. 9, *в*),  $\delta = \sim 0,5...1$  мкм (рис. 10, *в*).

Анализ элементов микрорельефа поверхности разрушения зоны II в локальной области «С» показал, что обработанный с двух сторон металл харак-

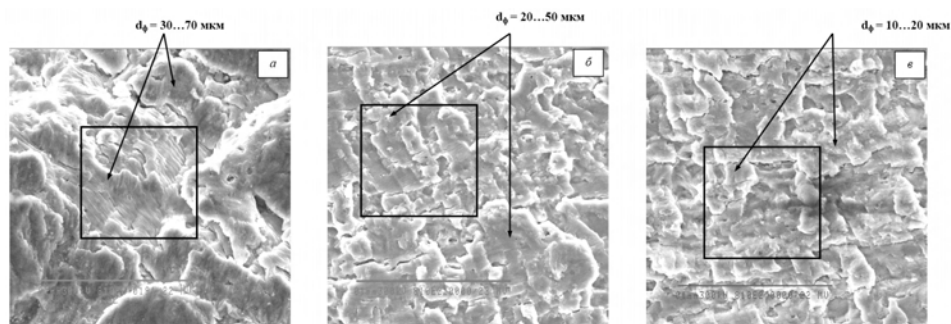


теризується таким об'ємом диспергування структурних елементів, як зменшення розміра фасеток, в 3 рази більше по сравнению с исходным состоянием и в 2 раза по сравнению с односторонней ЭДО. При двусторонней ЭДО достигается уменьшение ширины полос скольжения в 3...4 раза по сравнению с исходным состоянием и в 2...3 раза – по сравнению с односторонней обработкой.



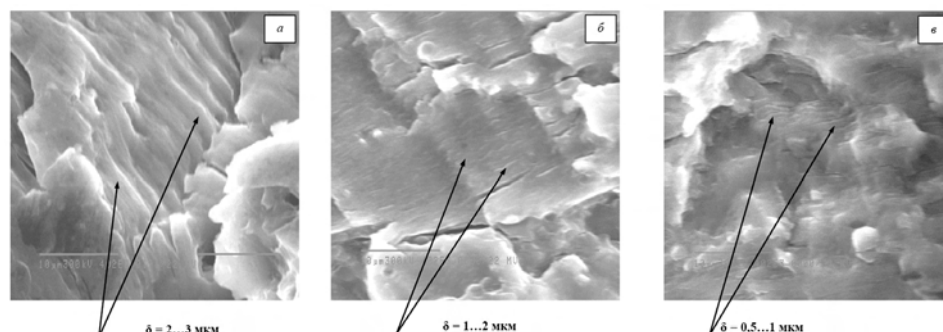
*a)* исходный образец (без ЭДО); *б)* односторонняя ЭДО; *в)* двусторонняя ЭДО

*Рис. 8.* Внешний вид поверхности разрушения образцов сплава АМг6 в зоне С (рис. 5, *a*) после циклического нагружения (x 203; выделенные фрагменты укрупненно показаны на рис. 9)



*a)* исходный образец (без ЭДО); *б)* односторонняя ЭДО; *в)* двусторонняя ЭДО

*Рис. 9.* Внешний вид укрупненных фрагментов (x 810) поверхности разрушения образцов сплава АМг6 в зоне С (рис. 5, *a*), где  $d_f$  – размер фасеток



*a)* исходный образец (без ЭДО); *б)* односторонняя ЭДО; *в)* двусторонняя ЭДО

*Рис. 10.* Внешний вид укрупненных фрагментов (x 4020) поверхности разрушения образцов сплава АМг6 в зоне С (рис. 5, *a*), где  $\delta$  – ширина полос скольжения

Описанные выше структурные изменения поверхности разрушения обеспечивают повышение сопротивления усталости и трещиностойкости сплава АМгб – что и подтверждают механические испытания образцов.

Следовательно, проведенные исследования показали эффективность осуществляемой с целью повышения сопротивления разрушению при циклических нагрузках в условиях симметричного изгиба электродинамической обработки сплава АМгб. Исходя из этого, применение ЭДО основного металла и сварных соединений, а также элементов тонколистовых конструкций (в зоне ожидаемых пиков рабочих напряжений) позволяет повысить в целом эксплуатационный ресурс работающих при циклических нагрузках изделий.

### Выводы

1. Разработана экспериментальная методика оценки влияния схемы закрепления на сопротивление разрушению сплава АМгб при его электродинамической обработке (ЭДО) импульсным током.

2. Использование ЭДО в условиях свободного сопротивления образцов сплава АМгб позволяет, по предварительным оценкам, повысить от 4,5 до 24 раз, по сравнению с исходным (без ЭДО), их сопротивление развитию усталостной трещины при циклическом симметричном изгибе.

3. Использование ЭДО в условиях жесткого закрепления образцов сплава АМгб позволяет повысить до 20 раз, по сравнению с исходным, сопротивление развитию усталостной трещины при циклическом симметричном изгибе, причем при меньшем (если сравнивать со схемой свободного сопротивления) количестве электродинамических воздействий.

4. Применение ЭДО позволяет повысить стойкость структуры сплава АМгб к замедленному разрушению при циклическом симметричном изгибе.

*Розглянуто результати фактографічних досліджень впливу електродинамічної обробки на підвищення спротиву руйнуванню плоских зразків алюмінієвого сплаву АМгб при циклічному навантаженні. Показано, що умови закріплення оброблюваних зразків мають суттєвий вплив на стійкість сплаву АМгб до зародження тріщини при симетричному циклічному навантаженні з близькою до умовного порогу пластичності металу амплітудою.*

**Ключові слова:** електродинамічна обробка, алюмінієвий сплав, аналіз фрактограм, зародження тріщини, стійкість до руйнування.

*Results of fractographic investigations of effect of electrodynamic treatment on increase of fracture resistance for flat specimens from aluminum alloy AMg6 under cyclic loading were studied. It was shown that conditions of fastening for workable specimen influence substantially on AMg6 alloy resistance to crack nucleation under symmetric loading cycle with amplitude close to proof yield strength of metal.*

**Keywords:** electrodynamic treatment, aluminum alloy, fractography analysis, crack nucleation, durability.

1. Лобанов Л. М. Повышение сопротивления усталости сварных соединений металлоконструкций высокочастотной механической проковкой (Обзор) /Л. М. Лобанов, В. И. Кирьян, В. В. Кныш, Г. И. Прокопенко // Автомат. сварка. – 2006. – № 9. – С. 3–11.

2. *Кныш В. В.* Повышение сопротивления усталости сварных соединений высокочастотной механической проковкой / В. В. Кныш, А. З. Кузьменко, О. В. Войтенко // Там же. – 2006. – № 1. – С. 43–47.
3. *Tang F.* Research on Residual Stress Reduction by a Low Frequency Alternating Magnetic Field / F. Tang, A. L. Lu, J. F. Mei et al. // *Journal of Materials Processing @ Technology*. – 1998. – **74**. – P. 255–258.
4. *Лобанов Л. М.* Влияние электродинамической обработки на сопротивление разрушению алюминиевого сплава АМг6 при циклическом нагружении / Л. М. Лобанов, Н. А. Пашин, В. А. Яшук, О. Л. Миходуй // *Проблемы прочности*. – 2015. – № 3. – С. 91–98.
5. *Лобанов Л. М.* Особенности структурообразования алюминиевых сплавов АМг5 и АМг6 под воздействием импульсов электрического тока / Л. М. Лобанов, Н. А. Пашин, В. П. Логинов // *Вісник Українського матеріалознавчого товариства*. – 2010. – № 3. – С. 33–42.
6. *Яковлева Т. Ю.* Локальная пластическая деформация и усталость металлов. – К.: Наук. думка, 2003. – 236 с.
7. *Касаткин Б. С.* Напряжения и деформации при сварке / Б. С. Касаткин, В. М. Прохоренко, И. М. Чертов. – К.: Вища школа. – 1987. – 246 с.