

УДК 621.791.09:785.375:539.4

Л. М. Лобанов, Н. А. Пащин, В. А. Костин, О. Л. Миходуй

ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АМГ6 ПРИ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Досліджено вплив електродинамічної обробки на спротив деформуванню та ефект Портевена ла Шательє для алюмінієвого сплаву АМГ6 при різних умовах розтягу. Показано вплив обробки на механічні характеристики сплаву АМГ6 при статичному розтягу. Представлені результати досліджень впливу обробки на зміну рельєфу поверхні зламів сплаву АМГ6.

Ключові слова: електродинамічна обробка, початкові напруження, алюмінієвий сплав, розряд струму, зарядна напруга, ефективність обробки, спротив деформуванню.

Одним из новых методов импульсного воздействия электрического тока на металлы и сплавы является электродинамическая обработка (ЭДО), позволяющая регулировать напряженное состояние элементов сварных конструкций. [1].

Проводили исследования механизмов влияния ЭДО на напряженное состояние алюминиевых сплавов [2], малоуглеродистых и конструкционных сталей [3–4], а так же сварных соединений из этих материалов. Изучали особенности изменения микро- и макроструктур [5], пластического деформирования [6] и остаточного формоизменения [7] образцов металлов и сплавов под воздействием импульсного тока, инициируемого ЭДО. При этом результаты исследований, представленных в [1–7], базировались на экспериментальной методике, основанной на растяжении плоских образцов прямоугольного сечения, их ЭДО с текущим контролем снижения нагрузки, которое принимали в качестве характеристики ЭДО. В то же время условия нагружения исследуемых образцов влияют на механические характеристики металлических материалов при импульсных и динамических нагрузках [8], а так же на процессы, инициируемые в металлах и сплавах при прохождении разрядов электрического тока [9]. Воздействие ЭДО на металл определяется взаимодействием динамической нагрузки и импульсного тока в момент разряда емкостного накопителя [5]. Это вызывает необходимость исследования особенностей деформирования конструкционных материалов при электродинамических воздействиях, реализуемых при различных условиях нагружения исследуемых образцов. Одним из специфических проявлений механизмов деформирования, характерного, например, для сплавов меди, алюминия и хромоникелевых сталей, являются слабые скачки напряжений на диаграммах растяжения, определяемые, как эффект Портевена ла Шательє [8–9]. В целом проявление эффекта Портевена ла Шательє зависит от ряда внутренних факторов, таких как тип кристаллической решетки, исходное структурное состояние материала, размер зерна, а так же внешних, к которым относятся условия нагружения (режим нагружения и скорость,

© Лобанов Леонід Михайлович, академік НАН України, заступник директора ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України, Пащин Микола Олександрович, кандидат технічних наук, Костін Валерій Анатолійович, Миходуй Ольга Леонідівна — наукові співробітники цього ж інституту.

жесткость испытательной машины) и конструктивно-технологических (уровень предварительной деформации, размер и форма образцов) [9]. Так как процесс ЭДО является технологическим фактором, а условия нагружения — внешним, влияющим на процессы деформирования обрабатываемых материалов, то изучение особенностей реализации эффекта Портевена ла Шателье при электродинамических воздействиях является актуальной проблемой. Одним из методов изучения особенностей эволюции структуры металлических материалов является фрактографические исследования изломов образцов, разрушенных после приложения внешних воздействий. Применение этого анализа топографии изломов разрушенных образцов, на которых моделировались различные схемы нагружения при ЭДО, позволяет получить информацию, необходимую для понимания природы электродинамических воздействий на металлы и сплавы.

Цель настоящей работы — исследовать влияние условий нагружения образцов сплава АМг6 без применения и в сочетании с ЭДО на снижение сопротивления металла деформированию и проявление эффекта Портевена ле Шателье.

Для оценки влияния ЭДО на снижение сопротивления деформированию сплава АМг6 проводили обработку предварительно растянутых плоских образцов прямоугольного сечения с размерами 30.0 × 4.0 мм. Для генерирования импульсного тока использовали установку, описанную в [4], а ЭДО выполняли посредством контакта медного электрода с поверхностью металла на рабочей части образца [5]. Растяжение образцов выполняли на разрывной машине ЦДМ-10 с максимальным усилием растяжения 10 т при стандартной скорости деформирования 6 мм/мин и температуре 293 К. Машина укомплектована механическим приводом и системой ручной регулировки усилия растяжения, что позволяет отнести ее к устройствам “жесткого типа” с замкнутым силовым контуром.

Исследовали два варианта условий растяжения образцов. По первому варианту, рассмотренному в работах [2–6], растяжение производили дискретно, с остановкой для выполнения ЭДО образцов единичными разрядами тока и регистрацией снижения начальной нагрузки. В этом случае обработку образцов металла проводили по “неподгружаемой” схеме, то есть в условиях снижения запаса энергии системы “образец-машина” в результате ЭДО. Таким образом, каждый последующий разряд тока воздействовал на образец, частично разгруженным предыдущим разрядом. При втором варианте осуществляли компенсацию снижения нагрузки после каждого разряда тока посредством подгрузки образца — по “подгружаемой” схеме, что позволило восстанавливать начальную нагрузку в течение всего цикла ЭДО.

ЭДО проводили при значениях зарядного напряжения $U = 500$ В и заряда емкостного накопителя $C = 6600$ мФ сериями по пять разрядов тока. Выполняли обработку образцов, предварительно растянутых до значения начальной нагрузки — σ_0 , соответствующей 290 МПа.

Исследовали влияние вариантов растяжения образцов сплава АМг6 на снижение сопротивления деформированию $\Delta\sigma$ и относительное изменение напряжений в результате обработки $\frac{\Delta\sigma}{\sigma_0}$. Следует отметить, что значения из-

меряемых параметров при двух реализуемых вариантах растяжения практически идентичны после первого токового разряда ($n = 1$ на рис. 1). Это связано с

тем, что реализацию различных условий растяжения начинали после второго токового разряда ($n = 2$) и продолжали до завершения цикла ЭДО.

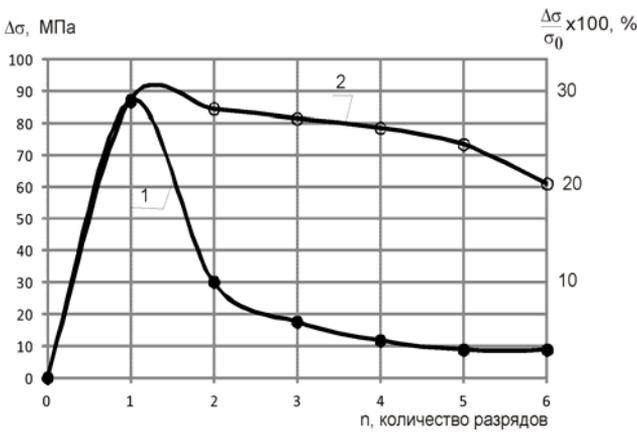


Рис. 1. Зависимость снижения сопротивления деформированию $\Delta\sigma$ и эффективности обработки $\frac{\Delta\sigma}{\sigma_0} \cdot 100\%$

образцов сплава АМг6 от количества разрядов тока n при значениях зарядного напряжения $U = 500$ В, начального растягивающего напряжения $\sigma_0 = 294$ МПа и схемы растяжения (кривая 1 — без подгрузки, кривая 2, — с подгрузкой)

На основе анализа данных, представленных на рис. 1, можно видеть, что разность значений $\Delta\sigma$ в серии ЭДО после второго разряда достигает 50–60 МПа (кривые 1 и 2). Таким образом, последовательное подгружение образцов обеспечивает более высокие значения $\Delta\sigma$ в течении всего цикла обработки по сравнению с неподгружаемым растяжением. Это подтверждают данные [10], где представлены данные по влиянию условий нагружения на относительную эффективность обработки $\frac{\Delta\sigma}{\sigma_0} \cdot 100\%$. Так, если при некомпенсированном рас-

тяжении после второго разряда тока ($n = 2$) значения $\frac{\Delta\sigma}{\sigma_0}$ не превышает 10%,

то при повторном нагружении — 30%. При этом если при отсутствии подгружения эффективность электродинамического воздействия к окончанию обработки ($n = 5$) снижалась практически до нулевых значений, то при восстанавливаемой нагрузке значения $\frac{\Delta\sigma}{\sigma_0} \cdot 100\%$ составляли не менее 20% в течение

всего цикла ЭДО. Таким образом, при сопоставлении кривых 1 и 2 (рис. 1), можно заключить, что условия нагружения являются одним из факторов, влияющих на характеристики напряженного состояния металла при электроимпульсных воздействиях, что подтверждается данными работы [10]. Следует отметить, что при снижении напряжений в результате электродинамических воздействиях при $n = 2-5$ преобладает упругий механизм. Это подтверждает постоянство значений $\Delta\sigma$ и $\frac{\Delta\sigma}{\sigma_0} \cdot 100\%$ на кривой 2 (рис. 1) для подгружаемых

образцов.

Проводили исследования влияния ЭДО на механические характеристики сплава АМг6, такие как условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, временное сопротивление σ_B , относительное удлинение металла после предварительной нагрузки — $\delta_{пр}$ и после разрушения — δ (табл. 1). С этой целью образцы, нагруженные по двум вышеописанным схемам до 292 МПа и обработанные электродинамическими воздействиями, после сброса нагрузки и регистрации $\delta_{пр}$ были дове-

дены до разрушения. Для определения механических характеристик сплава АМг6 проводили стандартные испытания на одноосное растяжение, результаты которого представлены в строке 1, табл. 1. Проводили оценку влияния предварительного деформирования материала, полученного статическим растяжением без применения ЭДО на $\delta_{пр}$, δ , $\sigma_{0,2}$ и σ_B . С этой целью образцы, предварительно растянув до 290 МПа и сбросив нагрузку до 0, после регистрации $\delta_{пр}$ доводили до разрушения (строка 2, табл. 1).

Таблица 1

Механические характеристики сплава АМг6 после ЭДО при различных условиях растяжения без ЭДО (строки 1, 2) и после ЭДО (строка 3)

Образец	Напряжение, U, В	Начальное напряжение, МПа,	Без подгрузки				С подгрузением			
			$\delta_{пр}$, %	δ , %	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	$\delta_{пр}$, %	δ , %	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа
1	без ЭДО	–	–	30	140	314	–	–	–	–
2	без ЭДО	290	6,8	25	235	300	–	–	–	–
3	ЭДО	290	7,6	20	250	330	7,85	20	250	330

При сравнении результатов стандартных испытаний (строка 1, табл. 1) и полученных после предварительного деформирования (строка 2, табл. 1) можно видеть, что предварительная нагрузка вызывает деформационное упрочнение сплава АМг6, следствием которого является возрастание значения условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ с 140 до 235 МПа (до 70%) при сопутствующем снижении статической прочности σ_B с 314 до 300 МПа. Сопоставляя механические характеристики предварительно деформированных образцов (строки 2 и 3, табл. 1), можно видеть, что ЭДО вызывает в неподгруженном и подгруженном металле возрастание значений $\delta_{пр}$ соответственно на 12 и 16% (строка 3, табл. 1), а так же увеличение значений $\sigma_{0,2}$ и σ_B соответственно на 5 и 10%. При этом условия нагружения образцов, обработанных разрядами тока, не оказывают влияния на характеристики $\sigma_{0,2}$ и σ_B . Следует отметить, что предварительное деформирование как с сопутствующей ЭДО, так и без нее, вызывает в сплаве АМг6, наряду с повышением упругих характеристик ($\sigma_{0,2}$) понижение пластических свойств δ с 30 до 20%.

На основании данных табл. 1 можно заключить, что исследуемые схемы нагружения образцов после ЭДО не оказывают существенного влияния на основные механические характеристики сплава АМг6 при статическом растяжении.

Изучали влияние растяжения образцов сплава АМг6 ЭДО при различных условиях нагружения на проявление эффекта Портевена ле Шателье. Диаграммы деформирования металла в исходном состоянии (строка 1, табл. 1), при предварительной нагрузке без ЭДО (строка 2, табл. 1), а так же при двух вариантах растяжения с сопутствующей ЭДО (строка 3, табл. 1) представлены на рис. 2. Эффект Портевена ле Шателье проявляется на диаграммах в виде скачков напряжений с различной амплитудой и периодичностью.

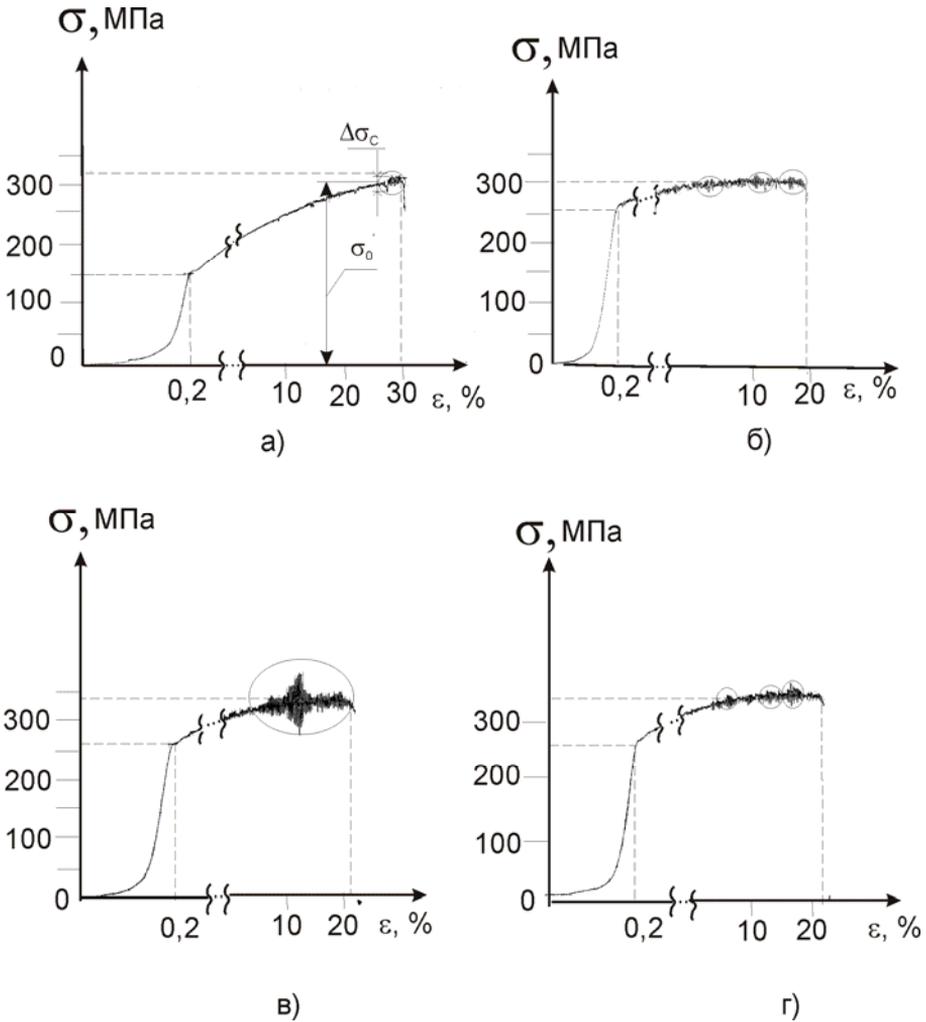


Рис. 2. Диаграммы деформирования сплава АМгб при одноосном растяжении, где $\Delta\sigma_c$ — величина скачка напряжений, σ_0 — текущее среднее значение напряжений, — участки пиковых амплитуд: а) стандартное растяжение образцов в исходном состоянии; б) растяжение образцов, предварительно деформированных до значений $\sigma_0 = 290$ МПа; в) растяжение образцов после ЭДО по неподгружаемой схеме нагружения; г) растяжение образцов после ЭДО с восстановлением начальной нагрузки

Проводили оценку амплитуды скачков напряжений $\frac{\Delta\sigma_c}{\sigma_0} \cdot 100\%$, где $\Delta\sigma_c$

— величина скачка, σ_0 — среднее текущее значение напряжений. При стандартном растяжении металла по условиям, соответствующим строке 1 табл. (рис. 2, а) скачки напряжений начинаются в области активного пластического течения, монотонно возрастают, чередуясь с однородными участками диаграммы, (максимальная амплитуда скачков не превышает 10–11%). Отметим, что пики амплитуды расположены на участке диаграммы, соответствующей предразрушению образца.

Распределение скачков по стадиям деформирования на образцах, предварительно нагруженных по условиям, соответствующим строке 2 табл. 1, представлено на рис. 2, б. В этом случае скачки начинаются после условного предела текучести, монотонно изменяясь до максимальных значений — 10% с последующим спадом. При этом на участке диаграммы за пределом текучести имеют место несколько пиковых значений скачков напряжения, последний из которых находится на участке предразрушения.

Иной вид имеет диаграмма при растяжении металла после ЭДО образцов, обработанных без подгрузки по условиям, соответствующим строке 3, табл. 1 (рис. 2, в), где монотонный характер возрастания скачков завершается одним пиком с максимальным увеличением до 30% и последующим спадом до 0 на участке предразрушения.

Диаграмма деформирования подгруженных образцов после ЭДО (рис. 2, г) подобна представленной на рис. 2, б, но с увеличением скачков до 14%.

При сравнении диаграмм (рис. 2, в, г), можно видеть, что образование скачков на диаграммах, соответствующих растяжению образцов без подгрузки реализуется в виде резкого перехода от монотонного деформирования к скачкообразному пластическому течению с амплитудой скачка, значительно большей, чем при подгрузке. Скачки начинаются, когда в металле имеются структурные неоднородности, вызванные его пластическим деформированием [11]. Согласно [2] ЭДО инициирует в сплаве АМгб локализованные области пластического течения, определяющие параметры скачков. Так, локализованная область образования скачков на диаграмме рис. 2, в вызвана неравномерностью снижения значений $\Delta\sigma_c$ при возрастании количества разрядов тока, при которой максимальное снижение напряжений наблюдали после первого токового воздействия при $n = 1$ (рис. 1, а, б, кривая 1). Таким образом, амплитуду скачков при некомпенсируемом растяжении задает область пластического течения, сформированная, в основном, первым токовым разрядом. При подгрузке образцов пластическое течение металла после ЭДО реализуется более равномерно на всех стадиях деформирования за счет восстановления начальной нагрузки. Следствием этого является распределение скачков по всей диаграмме, а их максимальные амплитудные значения меньше, чем при неподгружаемом растяжении, что видно при сравнении (рис. 2, в, и рис. 2, г).

На основании изучения макрорельефов изломов образцов, диаграммы деформирования которых представлены на рис. 2, можно заключить, что условия нагружения металла при электродинамических воздействиях влияют на характеристики разрушения сплава АМгб.

Изломы образцов, разрушенных стандартным однократным растяжением (рис. 3, а, б) и подвергнутых предварительному деформированию без применения ЭДО (рис. 3, в, г), имеют рельеф, определяемый согласно классификации Я. Б. Фридмана, соответственно как отрыв и срез. Согласно данной классификации при отрыве линия разрушения перпендикулярна направлению нагрузки (рис. 3, а), макрорельеф излома имеет гладкую поверхность, что соответствует малому объему пластически деформированного металла в зоне разрушения (рис. 3, б). При срезе линия разрушения наклонена к направлению нагрузки (рис. 3, в), макрорельеф излома имеет развитую поверхность и характеризуется значительным объемом пластического деформирования (рис. 3, г).



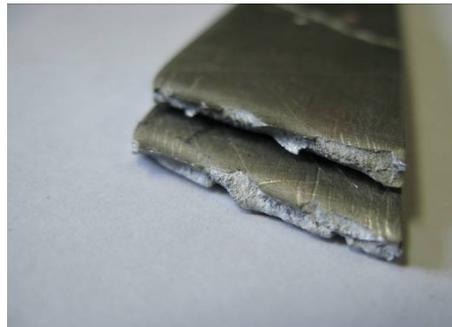
а)



б)



в)



г)



д)



е)



ж)



з)

Рис. 3. Внешний вид разрушенных образцов сплава АМгб, где а), в), д), ж) — макрорельеф излома, б), г), е), з) — поверхность излома, где зона Б — участок серебристого цвета: а), б) — стандартное растяжение образцов в исходном состоянии; в), г) — растяжение образцов, предварительно деформированных до значений $\sigma_0 = 290$ МПа; д), е) — растяжение образцов после ЭДО по неподгружаемой схеме нагрузки; ж), з) — растяжение образцов после ЭДО с восстановлением начальной нагрузки

Характерной особенностью рельефа разрушенной поверхности образцов, обработанных разрядами тока, является наличие полосы серебристого оттенка, расположенной в центральной части излома (зона Б, рис. 3, е, з). Наличие полосы можно объяснить тем, что при используемой схеме ЭДО [5] в момент разряда емкостного накопителя имеет место градиент плотности тока по сечению образца. При этом повышенные значения плотности тока соответствуют месту расположения полосы в центральной части излома. Это свидетельствует о том, что распределение энергии электродинамического воздействия по сечению образца влияет на изменение внутренней структуры материала, которая в процессе разрушения формирует различный поверхностный рельеф, определяемый методами фрактографического анализа.

Изломы образцов, обработанные разрядами тока без подгружения (рис. 3, д, е), имеют “губы среза” по краям сечения, а в середине — плоский макрохрупкий рельеф, то есть по продольным кромкам образца разрушение идет по механизму среза, а в центральных зонах — соответствует отрыву. Такой характер разрушения является промежуточным между стандартным растяжением (рис. 3, а, б) и предварительным деформированием (рис. 3, в, г). Это объясняется упругой релаксацией начальных напряжений металла образца при ЭДО и изменением зоны пластической деформации.

Изломы образцов, обработанные с подгружением (рис. 3, ж, з), имеют геометрические характеристики, подобные представленным на (рис. 3, д, е), но с более выраженными “губами среза”. Таким образом, многократное восстановление начальной нагрузки при сопутствующей ЭДО стимулирует образование зоны повышенной вязкости металла у вершины трещины, что может положительно влиять на характеристики усталостной прочности сплава АМгб.

Для изучения влияния ЭДО на особенности микромеханизма разрушения сплава АМгб проводили фрактографические исследования топографии изломов образцов, разрушенных при различных условиях нагружения, представленных в табл. 1.

Исследования особенностей структурных изменений фрактограмм изучали с использованием растрового электронного микроскопа JSM-840 “JEOL” и системы микроанализаторов “Analitik Link” 860/500 при уско-ряющем напряжении 20 кВ.

Исследовали особенности микрорельефа центральной зоны и краев разрушенных участков образцов, представленных на рис. 3.

Микроскопическая оценка механизма разрушения сплава АМгб в исходном состоянии свидетельствует о его смешанном характере (рис. 4, а-г). По всей толщине материала наблюдали ямочный тип излома, характеризуемый плоскими ямками отрыва овальной формы и средним диаметром 5–15 мкм. При этом на изучаемом рельефе имеют место развитые фасетки квазискола (зона А, рис. 4, а, б) с площадью до 2500–3000 мкм² и однонаправленные гребни отрыва перемычек (стрелки на рис. 4, в, г). При этом топография излома характеризуется структурной неоднородностью, где гребни отрыва чередуются со фрагментами квазискола и участками ямок. Следует отметить, что на краю образца количество фрагментов скола больше, чем в центральной части, что можно объяснить деформированием при прокатке.

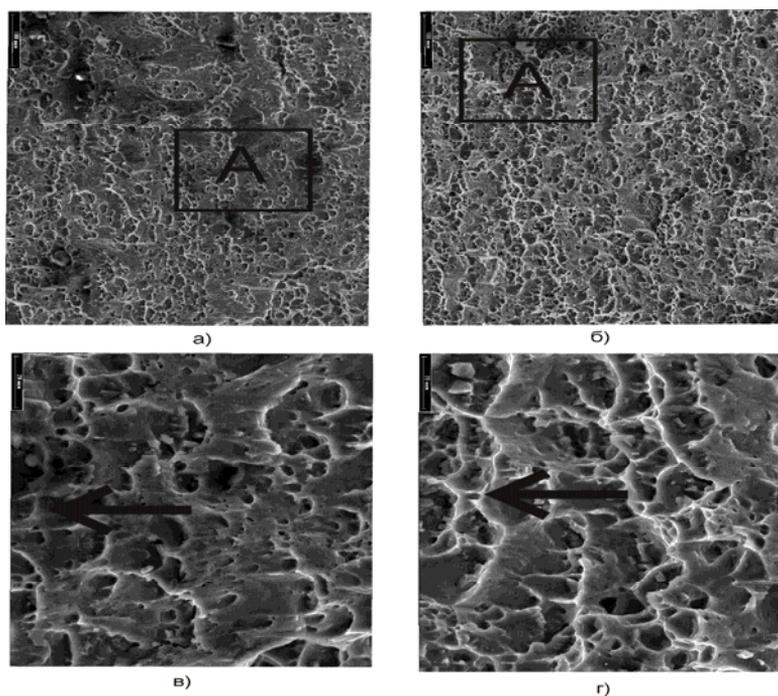


Рис. 4. Фрактограммы излома образца сплава АМг6 при однократном растяжении: а) X200 — край образца; б) X200 — центр; в) X1000 — край; г) X1000 — центр, где зона А — фасетки квазискола, — направление отрыва гребней

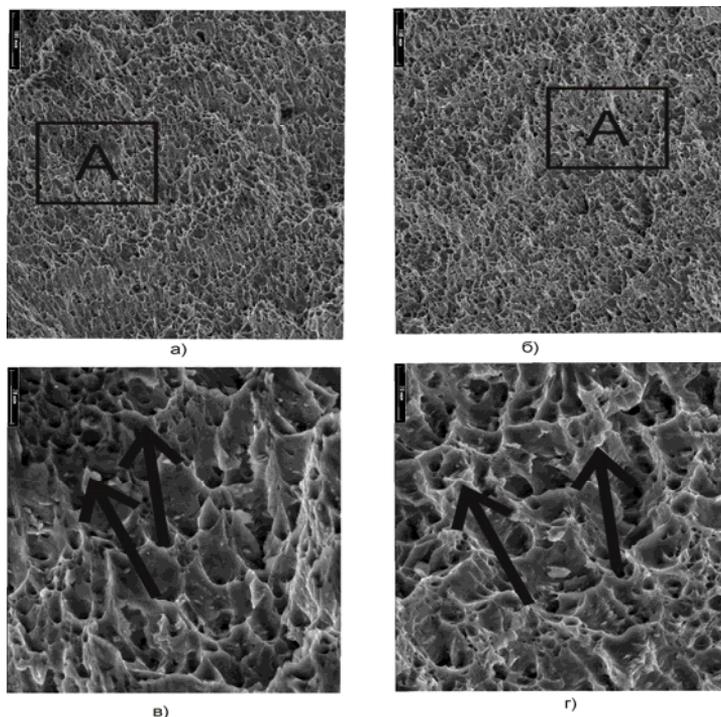


Рис. 5. Фрактограммы излома образца сплава АМг6 при растяжении после предварительного деформирования до значений $\sigma_0 = 290$ МПа: X200 — край образца (а); X200 — центр (б); X1000 — край (в); X1000 — центр (г), где зона А — фасетки квазискола, — направление отрыва гребней (г)

Более развит ямочный рельеф и гребни отрыва при разрушении материала после предварительного деформирования (рис. 5) без применения ЭДО, что подтверждает вязкий характер излома (рис. 3, в, г). При сопоставлении фрактограмм края (рис. 5, а) и центральной части образца (рис. 5, б) можно видеть подобие поверхностного рельефа. Это свидетельствует о том, что предварительное упруго-пластическое деформирование стабилизирует характер разрушения по всему сечению образца. При этом ямки отрыва имеют более вытянутую форму по сравнению с рис. 4, а их средний диаметр не превышает 5 мкм. В целом рельеф имеет мелкоямочный характер, доля фасеток квазискола снизилась на 60–80% при уменьшении площади отдельных фрагментов до 100–200 мкм² (зона А, рис. 5, а, б). Следует отметить, что предварительная нагрузка стимулирует образование гребней отрыва при изменении их направления на 45–50 град. (стрелки на рис. 5, в, г), что соответствует разрушению по механизму среза.

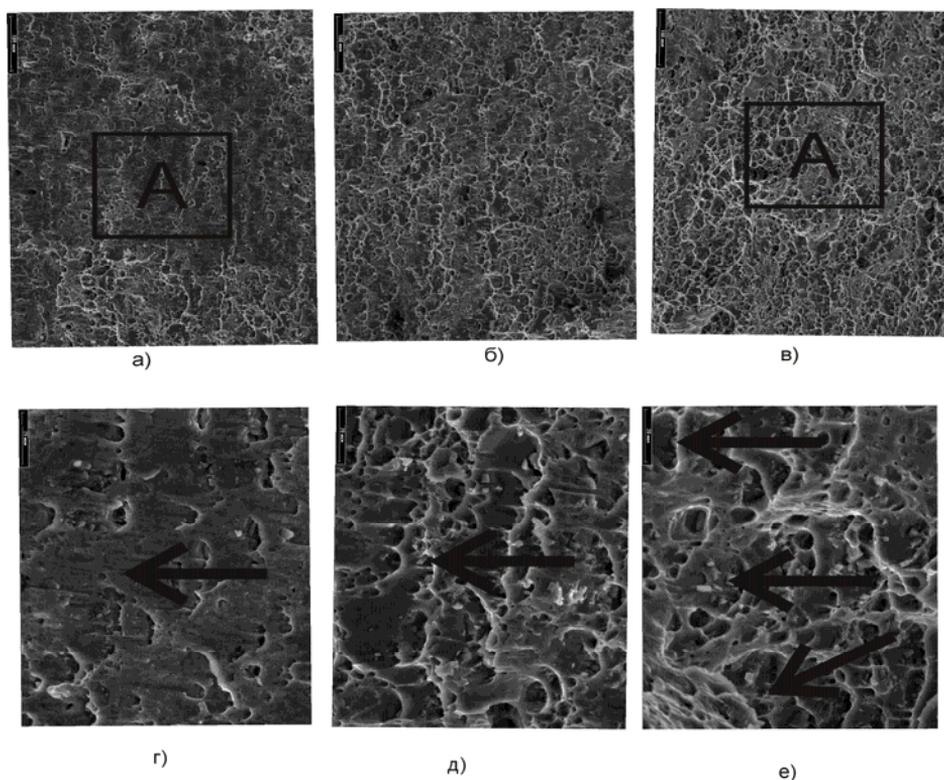


Рис. 6. Фрактограммы излома образца сплава АМг6 при растяжении после ЭДО без подгрузки: а) X200 — центр образца (зона Б на Рис.3,е); б) X200 — центр за зоной Б; в) X200 — край; г) X1000 — центр (зона Б); д) X1000 — центр за зоной Б; е) X1000 — край, где зона А — фасетки квазискола, → — направление отрыва гребней

На фрактограммах излома образцов, обработанных разрядами тока без подгрузки (рис. 6) наблюдается несколько характерных участков рельефа, соответствующих смешанному характеру разрушения по механизму отрыва и среза при максимальной плотности тока разряда (серебристая полоса в средней части излома — зона Б, рис. 3, е), отрыву при пониженной плотности тока (за зоной Б) и срезу по краям образца (рельеф поверхности “губ среза”). Цен-

тральная часть излома в области максимальной плотности тока (рис. 6, а) характеризуется локализацией фасеток квазискола прямоугольной формы и средней площадью 3000–4000 мкм² (зона А), чередующихся с мелкими ямками отрыва овальной формы со средним диаметром 5–15 мкм. При сравнении с рельефами поверхности разрушения, соответствующим однократному растяжению (рис. 4, б) и после предварительного деформирования (рис. 5, б) наблюдали увеличение доли фрагментов скола соответственно на 50 и 80%, что можно объяснить пондеромоторным (нетермическим) действием импульсного тока при электродинамических воздействиях, так как участков подплавления на рельефе поверхности разрушения не выявлено. Следствием уменьшения доли ямочного рельефа, соответствующего вязкому разрушению, является снижение пластических свойств сплава АМг6, определяемых δ (табл. 1, строка 3) по сравнению с металлом без ЭДО (табл. 1, строка 1). Подтверждением влияния импульсного тока высокой плотности на изменение топографии изломов является уменьшение количества гребней отрыва перемычек и их толщины с 1–2 мкм до 0,3–0,5 мкм (рис. 6, г) по сравнению с однократным растяжением без ЭДО (рис. 4, в). При этом направление отрыва гребней сохраняется (стрелка на рис. 6, г). Рельеф центральной зоны излома, соответствующей пониженной плотности тока (рис. 6, б), характеризуется снижением доли фрагментов скола по сравнению с рис. 6, а и увеличением составляющей мелкоямочного рельефа, подобного представленному на рис. 4, б. Следует отметить, что нетермическое воздействие тока, даже при пониженных значениях плотности, стимулирует в материале повышение доли фрагментов скола, что можно видеть при сравнении рис. 4, б и рис. 6, б. При этом понижение плотности тока разряда повышает долю вязкого разрушения, определяемую по увеличению толщины гребней при сохранении направления их отрыва, что видно при сравнении рис. 6, г и рис. 6, д. Заметное изменение рельефа имеет место на краевом участке излома у “губ среза”, где доля фасеток квазискола заметно снизилась, их площадь не превышает 300 мкм² (зона А, рис. 6, в) и преобладает мелкоямочный рельеф, подобный представленному на рис. 5, б. При этом ориентацию гребней отрыва перемычек, представленную на рис. 6, в, определяет совместное воздействие механизмов отрыва (рис. 4, б) и среза (рис. 5, б). Направления микроотрывов гребней указаны стрелками на рис. 6, е, из которого видно, что при смешанном разрушении в зоне “губ среза” преобладает механизм отрыва.

На фрактограммах излома образцов, обработанных разрядами тока с подгрузкой (рис. 7) наблюдали участки рельефа, соответствующие разрушению при максимальной плотности тока разряда (зона Б, рис. 3, з), пониженной плотности тока (за зоной Б) и на краях образца на поверхности “губ среза”). Центральная часть излома в области максимальной плотности тока (рис. 7, а) характеризуется снижением доли фасеток квазискола на 50% при уменьшении их средней площади до 1000–2000 мкм² (зона А, рис. 7, а) по сравнению с рис. 6, а. При этом возросла доля ямочного излома, характеризующаяся мелкими ямками отрыва овальной формы со средним диаметром до 5 мкм. При сравнении с рельефами поверхности разрушения, соответствующим однократному растяжению (рис. 4, б) и после предварительного деформирования (рис. 5, б) увеличение доли фрагментов скола меньше, чем при ЭДО без подгрузки (рис. 6, а), что можно объяснить незначительной пластической деформацией, инициируемой в образце при периодическом восстановлении начальной нагрузки после текущего разряда тока в серии ЭДО.

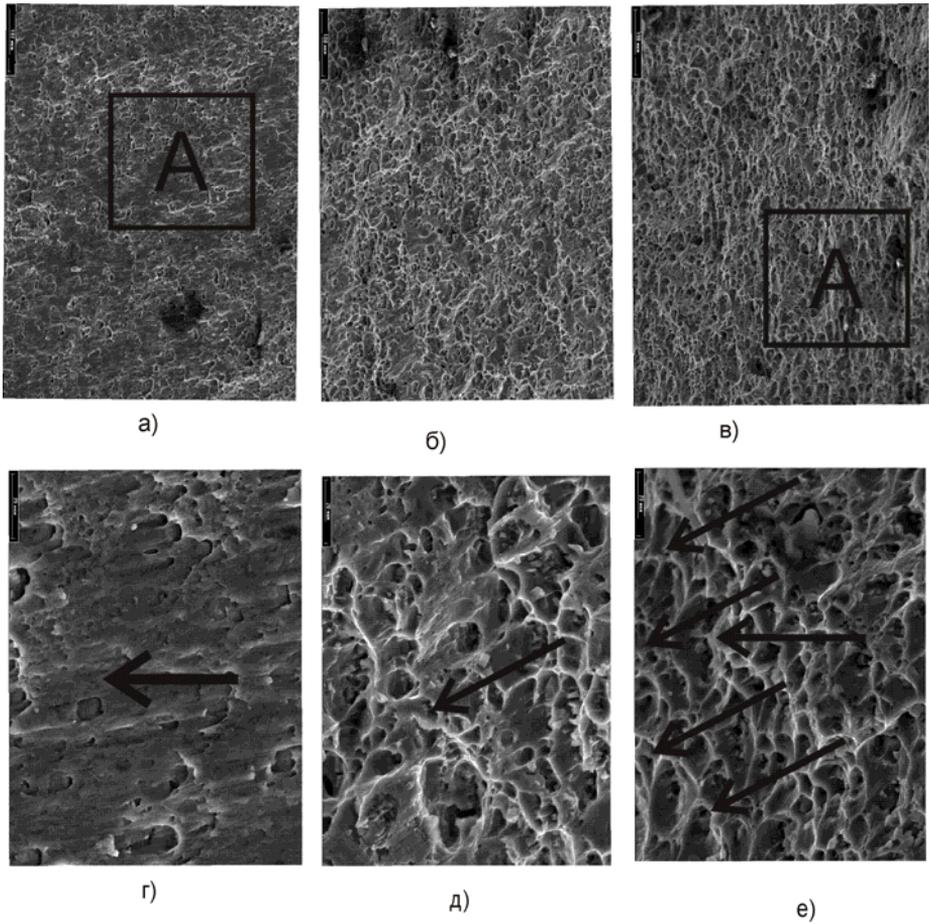


Рис. 7. Фрактограммы излома образца сплава АМг6 при растяжении после ЭДО с подгрузкой: X200 — центр образца (зона Б на Рис. 3, з) (а); X200 — центр за зоной Б (б); X200 — край (в); X1000 — центр (зона Б) (г); x1000 — центр за зоной Б (д); x1000 — край, где зона А — фасетки квазискола, → — направление отрыва гребней (е)

Увеличение доли ямочного рельефа, соответствующего вязкому разрушению, приводит к незначительному повышению пластических свойств сплава АМг6, характеризуемых δ_{np} (табл. 1, строка 3). Подтверждением влияния текущего подгружения на повышение вязкости является увеличение числа гребней отрыва и их толщины с 0,3–0,5 мкм (рис. 6, г) до 1–2 мкм (рис. 7, г) При этом направление отрыва гребней сохраняется (стрелка на рис. 7, г). Рельеф центральной зоны излома, соответствующей пониженной плотности тока (рис. 7, б), характеризуется снижением доли фрагментов скола по сравнению с рис. 7, а и мелкоямочным рельефом, подобного представленному на рис. 5, б.

Текущее подгружение металла после каждого электродинамического воздействия снижает негативное влияние импульсного тока, стимулируя в материале повышение доли мелких ямок, что можно видеть при сравнении рис. 6, б и рис. 7, б. При этом восстановление нагрузки повышает долю вязкого разрушения, определяемую по увеличению толщины гребней с 1–2 до 5 мкм при незначительном изменении направления отрыва, что видно при сравнении рис.

б, д и рис. 7, д. Таким образом, на участке макрохрупкого излома металла в условиях подгрузки наблюдаются локальные зоны перехода к вязкому разрушению. Заметное изменение рельефа имеет место на краевом участке излома у "губ среза", где доля фасеток квазискола заметно снизилась по сравнению с рис. 6, в, а их площадь не превышает 100 мкм^2 (зона А, рис. 7, в) и преобладает мелкоямочный рельеф, подобный представленному на рис. 5, б. При этом ориентация отрыва перемычек, представленная на Рис.6,в, определяется в основном механизмом среза, что видно по расположению гребней согласно направлениям стрелок (рис. 7, е).

Это говорит об интенсификации пластического течения материала, обработанного импульсами тока в условиях восстанавливаемой нагрузки. Анализируя данные (рис. 7), можно сделать вывод, что ЭДО в условиях подгрузки обрабатываемого металла формируют в материале локальные зоны вязкости, повышающих пластические свойства материала образца, что приводит к снижению уровня его напряженного состояния.

Выводы

Установлено, что при одноосном растяжении образцов сплава АМгб без подгрузки, с подгрузением при ЭДО имеют место отличия в проявлении эффекта Портовена ла Шателье, выражаемые в различной конфигурации скачков напряжений на диаграммах деформирования металла.

Показано, что ЭДО растянутых образцов сплава АМгб при их текущем подгрузении до начального уровня напряжений вызывает в материале пониженное сопротивление деформированию по сравнению с вариантом без подгрузки. При этом ЭДО не оказывает отрицательного воздействия на условный предел текучести и временное сопротивление сплава АМгб.

На основе фрактографического анализа установлено, что при различных условиях нагружения образцов сплава АМгб без применения электродинамических воздействий микромеханизм разрушения металла может варьироваться от отрыва к срезу. При использовании ЭДО имеет место механизм разрушения, характеризующийся наличием "губ среза" по краям макроизлома и зоной отрыва на среднем его участке.

Показано, что при электродинамических воздействиях в зонах металла, соответствующих максимальной плотности тока, имеет место повышение доли участков микроскола при понижении доли вязкой составляющей разрушения.

Исследовано влияние электродинамической обработки (ЭДО) на снижение сопротивления деформированию и эффект Портевена ла Шателье для сплава АМгб при различных условиях растяжения. Показано влияние ЭДО на механические характеристики сплава АМгб при статическом растяжении. На основании данных фрактографического анализа исследовано влияние условий растяжения при ЭДО на изменение рельефа поверхности изломов разрушенных образцов сплава АМгб.

Ключевые слова: электродинамическая обработка, начальные напряжения, плоский образец "лопаточного типа", алюминиевые сплавы, разряд тока, зарядное напряжение, схема растяжения, эффективность обработки, снижение сопротивления деформированию, прерывистая текучесть, скачок напряжений.

Was investigate of influence of electrodynamic treatment on relative efficiency and effect of Portvena-la Shatelie for aluminium alloy AMg6 with different conditions of strain. Was showed the influence of treatment on modifications of relief on surface of destruction alloy AMg6.

Keywords: *Electrodynamic treatment, initial stress, aluminium alloy, pulsed current, charge voltage, relative efficiency, resistance of material to deformation.*

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. *Лобанов Л. М. Влияние электродинамической обработки на напряженное состояние сварных соединений алюминиевого сплава АМг6 / Л. М. Лобанов, Н. А. Пашин, В. П. Логинов // Там же. – 2007. – № 6. – С. 11–13.*
3. *Лобанов Л. М. Влияние электродинамической обработки на напряженное состояние сварных соединений стали Ст3 / Л. М. Лобанов, Н. А. Пашин, В. П. Логинов и др. // Там же. – 2007. – № 7. – С. 10–12.*
4. *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.*
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. *Лобанов Л. М. Особенности формирования пластических деформаций при электродинамической обработке сварных соединений стали Ст3 / Л. М. Лобанов, В. И. Махненко, Н. А. Пашин и др. // Автомат. сварка. – 2007. – № 10. – С. 10–15.*
7. *Лобанов Л. М. Влияние электроимпульсной обработки на остаточные формоизменения тонколистовых сварных конструкций / Л. М. Лобанов, Н. А. Пашин, В. П. Логинов // Там же. – 2010. – № 3. – С. 13–17.*
8. *Белл Дж. Ф. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. Часть 2. Конечные деформации. – М.: Наука. 1984. – 432 с.*
9. *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 им. Г. С. Писаренко НАН Украины. – 2008. – 504 с.*
10. *Lu A. L. Research on residual – stress reduction by a low frequency alternating magnetic field / J Mat. Proces. Techn. – 1998. – 74. – P. 255–258.*