



# МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ В УСЛОВИЯХ УСТАЛОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СПЛАВА АМг6, ПОЛУЧЕННЫХ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ

Т. М. ЛАБУР, д-р техн. наук, В. А. ШОНИН, Т. Г. ТАРАНОВА,  
В. А. КОСТИН, В. С. МАШИН, кандидаты техн. наук, И. Н. КЛОЧКОВ, инж.  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Представлены результаты исследования структуры поверхности разрушения после циклических испытаний с асимметрией цикла нагружения  $R_\sigma = 0,4$  и  $R_\sigma = -1$  образцов сварных соединений сплава АМг6, полученных плавящимся электродом. Выявлены особенности морфологии в различных участках излома и установлен механизм развития усталостной трещины. Отмечено, что разрушение сварных соединений на микроуровне носит смешанный и многоочаговый характер. Выполнение высокочастотной проковки в узкой зоне поверхности перехода шва сплава АМг6 к основному металлу с использованием стальных бойков обеспечивает формирование более плавной геометрии переходной зоны от шва к основному металлу и снижение средних значений коэффициента концентрации напряжений.

*Ключевые слова:* дуговая сварка, алюминиевый сплав, сварка плавящимся электродом, сварные соединения, испытания на усталость, морфология поверхности разрушения

Применение традиционных материалов и разработка новых требует знаний об изменении физических и структурных характеристик в условиях циклической нагрузки, поскольку они отражают уровень сопротивления материала развитию макротрещин в заданном структурном состоянии и режимах эксплуатации. Периодичность нагружения усиливает локализацию пластической деформации в материале, изменяет его напряженное состояние и вызывает структурную перестройку в микрообъемах, что является ответной реакцией на внешние воздействия [1–6]. Исчерпание способности материала к дальнейшей пластической деформации приводит к его разрушению.

В сварных соединениях различают структурные зоны, в которых под действием термического цикла сварки образуются сложные многофазные структуры. Различия гетерогенных зерен основного металла и образованных при сварке кристаллитов шва вызывают появление градиента концентрации напряжений в сварном соединении. Наряду с увеличением ширины межзеренного пространства в зоне нагрева растет количество эвтектических фаз, образующихся вследствие развития химической неоднородности по основным легирующим элементам и примесям из-за сегрегации их вдоль границ зерен [2]. В результате изменяются размеры, форма и конфигурация расположения выделений фаз, коагуляция включений интерметаллидных фаз, приводящих к образованию в зоне соединения участков с более грубой структурой, что оказывает влияние на локализацию

пластических деформаций в металле ЗТВ, приводя к реализации различных микромеханизмов разрушения, сопровождающих процессы зарождения и распространения трещин [3].

Целью данной работы является установление методом фрактографического анализа морфологических и структурных особенностей микрорельефа поверхности усталостного разрушения сварных соединений высокопрочного алюминиевого сплава АМг6 толщиной 12 мм, полученных плавящимся электродом. Сварку образцов осуществляли в смеси аргона и гелия (50 % + 50 %) импульсной дугой на режиме  $I_{св} = 220$  А,  $U_d = 23$  В,  $v_{св} = 30$  м/ч с использованием источника питания ТРС-450 («Fronius», Австрия). Из стыков были вырезаны образцы сварных соединений поперек шва с технологическим усилением и без него.

После сварки некоторые соединения сплава подвергали механической проковке в узкой зоне поверхности перехода шва к основному металлу путем использования однорядной группы стальных бойков диаметром 5 мм, приводимых в направленное движение малогабаритным портативным ультразвуковым генератором (мощностью 0,3 кВт) и ручным инструментом с пьезокерамическим преобразователем ультразвуковых колебаний в механические [7]. Скорость перемещения бойков вдоль шва составляла 5 мм/с.

Испытания на усталость выполняли в условиях переменной нагрузки вдоль оси образца с частотой 5...6 Гц по стандартной методике на машине МТС-318.25 с максимальной осевой нагрузкой 25 т. Ошибка измерения прилагаемого усилия не превышала 1 %.

Состояние металла после сварки и выполнения высокочастотной механической проковки повер-



хности зоны сплавления шва с основным металлом изучали методом фрактографического анализа. Изменение формы и размеров отдельных фрагментов рельефа изломов сварных соединений исследовали на растровом электронном микроскопе JSM-840 с системой микроанализатора Link-860/500 (при ускоряющем напряжении 15, 25 и 30 кВ).

Визуальный анализ поверхности разрушения образцов сварных соединений сплава АМг6 после испытаний при циклической нагрузке с коэффициентом асимметрии  $R_\sigma = 0$  показал, что усталостная трещина зарождается на границе сплавления шва с основным металлом и распространяется в направлении ЗТВ с дальнейшим переходом в основной металл, образуя магистральную трещину (рис. 1). Излом содержит три характерные рельефные зоны: чисто усталостное разрушение, усталостное разрушение с шероховатой поверхностью в результате пластической деформации, зону долома, образование которой происходило по механизму вязкого разрушения. Наличие различной топографии рельефных участков на изломах исследуемых образцов указывает на разную степень пластической деформации, которая сопровождает процессы зарождения и распространения магистральной усталостной трещины во время испытания. Цветовая окраска участков излома, где усталостная трещина зарождается и распространяется, блестящая, а зона долома имеет матовый цвет. На ее рельефе имеется несколько глубоких трещин, которые уходят вглубь образца и ориентированы вдоль оси приложения циклической нагрузки. Их протяженность на поверхности излома составляет 10...50 мкм, что можно

объяснить недостаточным качеством проработки сплава в процессе изготовления полуфабриката.

Топография участка, где сформировался очаг зарождения усталостной трещины, обусловлена характерными особенностями структуры металла шва на сплаве АМг6 и условиями циклического испытания (рис. 1, а-з). Уровень локальных микронапряжений, которые остались на границе кристаллитов металла шва после фазовых превращений в ходе сварочного цикла, оказывает влияние на процесс зарождения микротрещин. Изменение энергии активации в металле и концентрация пластических сдвигов в отдельных, наиболее напряженных кристаллитах шва при достижении критического значения размаха напряжения, сопровождается их локализацией, формированием полос скольжения, смещением одной части кристалла относительно другой вдоль одинаково ориентированных кристаллографических поверхностей [4, 5]. Это не только вызывает появление источника усталостной трещины, но и определяет характер ее дальнейшего распространения.

В плоскости излома трещина представляет собой плоскую поверхность в виде веера, развивающегося в радиальном направлении относительно оксидной пленки, расположенной в шве вблизи зоны сплавления. Это указывает на то, что пленка является очагом зарождения усталостной трещины. На поверхности излома присутствуют плоские участки межзеренного разрушения. Наблюдаются также признаки хрупкого зарождения трещины со ступеньками сброса (рис. 1, б), которые появляются при встрече вершины микротрещины с винтовыми дислокациями, пересекающими плоскость скола [4, 6]. Это могут быть дислокации,

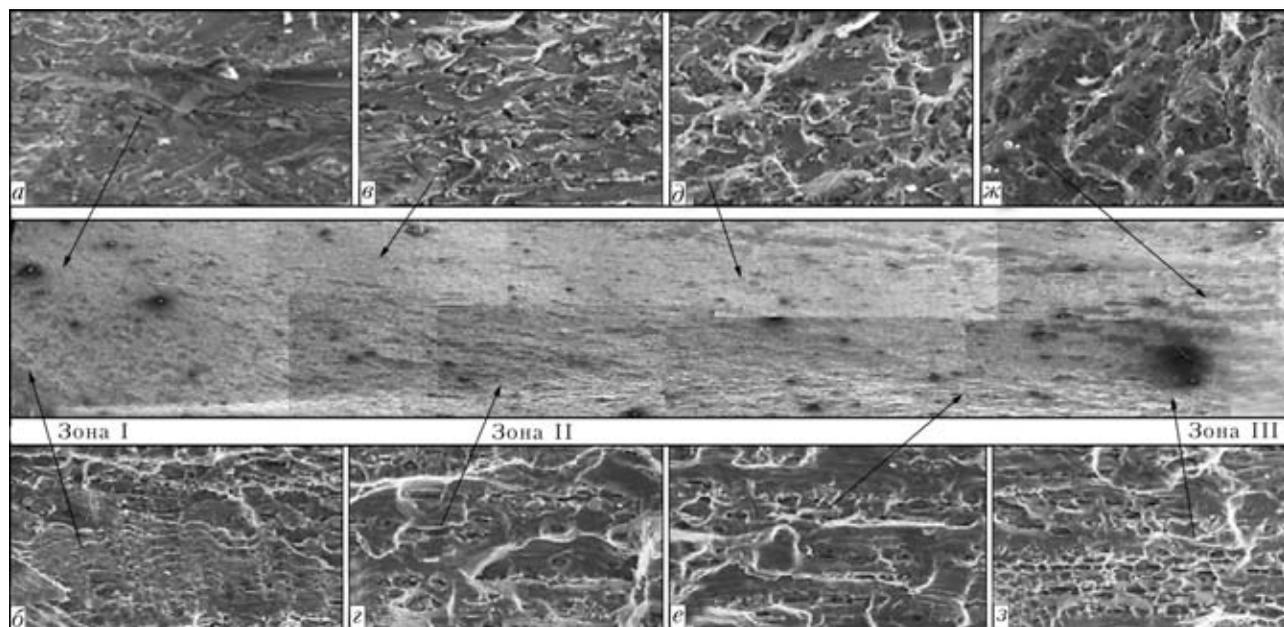


Рис. 1. Панорама излома ( $\times 13$ ) и фрактограммы его отдельных фрагментов ( $\times 500$ ) сварных соединений сплава АМг6, полученных плавящимся электродом и испытанных при циклической нагрузке с коэффициентом асимметрии  $R_\sigma = 0$ : а-з — см. в тексте

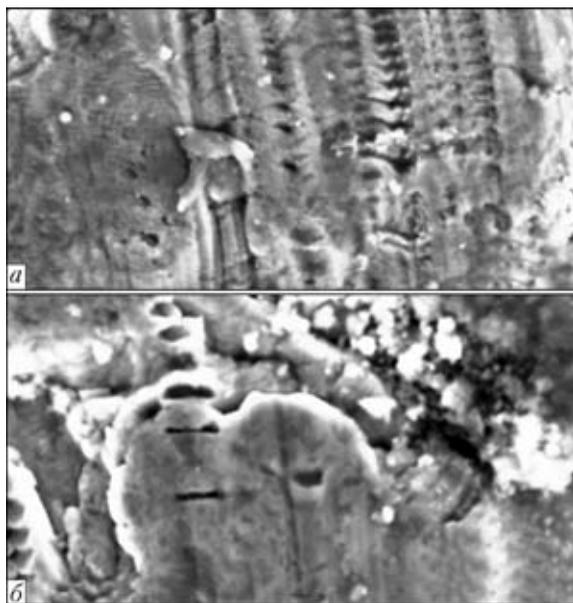


Рис. 2. Фрактограммы изломов ( $\times 1000$ ) с характерным расположением специфических отметин «траковых следов»: а, б — см. в тексте

существующие в сплаве или генерированные вершиной усталостной трещины. Следов действия вязкого микромеханизма, реализация которого происходит в результате локализации пластической деформации в условиях знакопеременной нагрузки, недостаточно. Значительное количество деформированных кристаллитов шва на поверхности излома исследуемого образца в состоянии после сварки свидетельствует о том, что в ходе распространения трещины развитие полос скольжения происходит интенсивно.

В период стабильного роста магистральная трещина развивается межкристаллитно вдоль границ зерен, которые декорированы интерметаллидными фазами. Их коагуляция во время сварочного нагрева, а также увеличение ширины межзеренного пространства, объема эвтектических фаз, образовавшихся в результате сегрегации легирующих элементов и примесей, вызывают ослабление металла в приграничных областях и интенсивное зарождение микротрещин по механизму скола. Морфологические элементы рельефа, которые при этом формируются, можно сравнить по величине с матрицей (твердым раствором), областями расположения интерметаллидных фаз, элементами фасеточной структуры. По мере ее распространения ширина продольных микротрещин не изменяется, оставаясь равной 1,5...2 мкм. Увеличение длины происходит путем объединения отдельных микротрещин, а траектория при этом приобретает зигзагообразную форму (см. рис. 1, в, з).

За пределами усталостной трещины расположена зона действия механизма смешанного разрушения, в которой, помимо плоских участков рельефа, наблюдаются признаки осуществления пластической деформации при распространении

магистральной трещины по механизму отрыва (рис. 2). Переход в зону смешанного разрушения происходит в результате возрастания количества деформированных зерен. Ветвистость микротрещин, наблюдающаяся на изломе, указывает на то, что расположение фазовых частиц крупных размеров на границе между кристаллитами препятствует поступательному продвижению магистральной трещины. Это приводит к ее торможению, повышению дополнительной локальной деформации в микрообъеме металла и, как следствие, изменению направления ее распространения. Все эти процессы сопровождаются не только изменением структуры рельефа вблизи трещины, но и развитием усталостных бороздок, похожих на полосы фасеточных структур (см. рис. 1, д–е), появление которых связано с повышением плотности дислокаций [8]. Имеются также участки рельефа, где трещина развивается через кристаллит, а именно, транскристаллитно. Рельефная выпуклость усталостных бороздок свидетельствует о направлении и характере распространения магистральной трещины.

На поверхности данного участка излома можно также увидеть специфические отметины, которые носят название «траковых следов» (рис. 2, а). Их относят к признакам усталостных изломов, образующихся при разрушении алюминия и его сплавов [8]. Отметины характеризуются исключительно четким расположением рисунка и только на гладких участках рельефа. Между собой они образуют дорожки, совпадающие с направлением распространения магистральной трещины. Количество отметин на разных участках излома не совпадает, а расстояние между ними уменьшается по мере увеличения длины рядов (рис. 2, б). В литературе отсутствует четкое обоснование причин появления «траковых следов» на рельефе усталостных изломов. Их связывают с проявлением вторичного эффекта влияния включений, фазовых выделений или твердых нерастворимых структурных составляющих, которые выступают над поверхностью трещины во время ее перемещения, а также результатом взаимодействия локальных касательных и нормальных переменных напряжений [9–11].

К особенностям структуры рельефа зоны долома излома следует отнести наличие значительного количества ямок параболической формы, возникающих при сдвиговом механизме разрушения (см. рис. 1, е–з). Они образуются из микропор в результате развития пластической деформации и пластической декогезии в условиях циклической нагрузки [9]. Такие процессы обычно протекают вдоль границ между включениями и матрицей в случаях, когда силы сцепления между ними недостаточны, и вызывают увеличение локальной концентрации напряжения, приводящей к зарождению микротрещин. На это указывает наличие

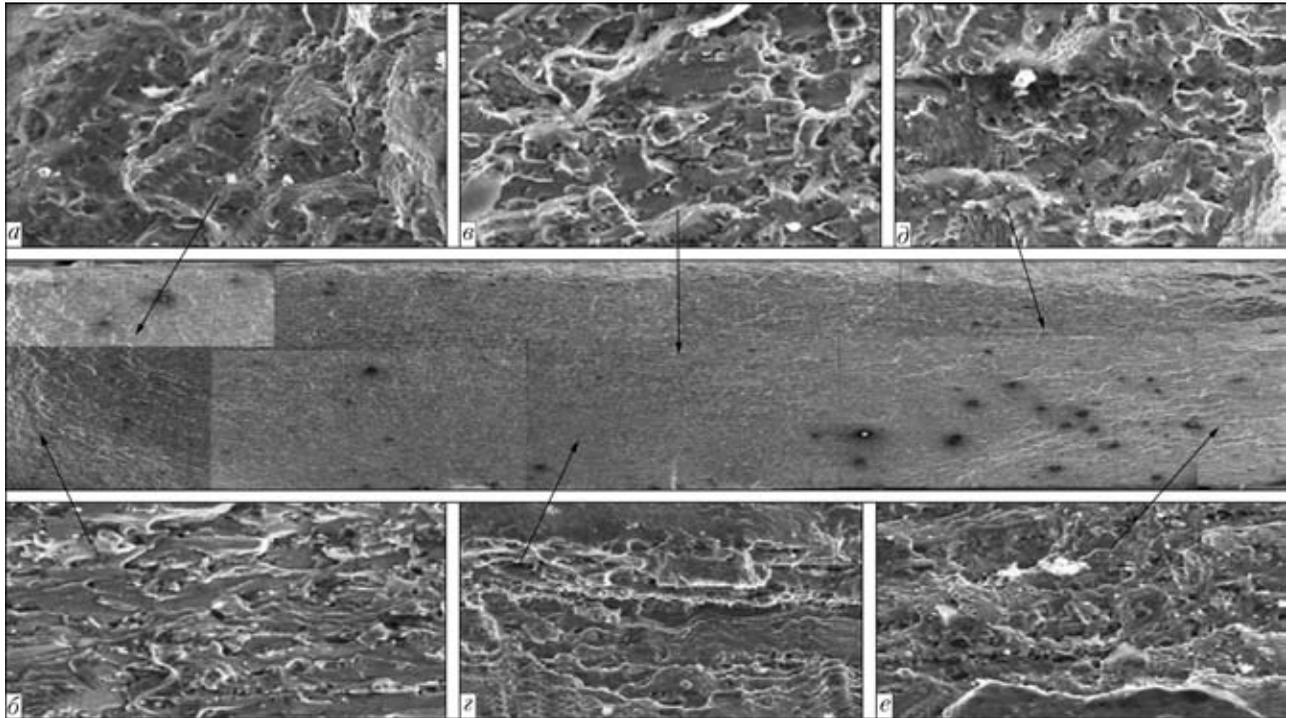


Рис. 3. Панорама излома ( $\times 13$ ) и фраттограммы его отдельных фрагментов ( $\times 500$ ) сварных образцов сплава АМг6, полученных плавящимся электродом и испытанных при циклической нагрузке с коэффициентом асимметрии  $R_{\sigma} = 0,4$ : а-е — см. в тексте

фрагментов разрушенных включений или выделений фаз на дне ямок. Вдоль границ зерен наблюдаются микротрещины. Изменение ориентации ямок и увеличение количества микротрещин на рельефе участка долома по сравнению с общей панорамой излома исследуемого образца свидетельствуют об отличии локальных условий пластического деформирования на этапе завершения процесса разрушения.

Обобщив полученную информацию, можно отметить следующие характерные особенности морфологии структуры на изломе сварного соединения сплава АМг6, а именно: очаг зарождения усталостной трещины находится на поверхности вблизи зоны сплавления шва с основным металлом; инициатором образования усталостной трещины является оксидная пленка; наличие трех рельефных зон на изломе свидетельствует о смешанном и многоочаговом характере разрушения образцов в условиях циклической нагрузки.

Изменение коэффициента асимметрии при циклических испытаниях от  $R_{\sigma} = 0$  до более сложных условий ( $R_{\sigma} = -1$ ) вызывает усиление локализации пластической деформации и, как следствие, изменение характера рельефа изломов исследуемых образцов сварных соединений (рис. 3). Усталостная трещина зарождается за пределами шва в металле ЗТВ и распространяется в направлении основного металла, образуя магистральную трещину. Ее развитие происходит в результате слияния отдельных микротрещин, возникающих вдоль площадок скольжения или на пересечении плоскостей скольжения двух систем. Ма-

гистральная трещина развивается интеркристаллитно вдоль границ зерен, вызывая хрупкое межкристаллитное разрушение со следами небольших пластических деформаций. Такие изломы образуются в условиях снижения сил когезии между структурными составляющими, расположенными на границах между зёрнами. Их уровень в этом случае должен быть меньше, чем когезия в плоскости скола или плоскости скольжения [1–4]. Наибольшая степень снижения сцепления между зёрнами отмечается на образцах при циклическом испытании с коэффициентом асимметрии  $R_{\sigma} = -1$ , о чем свидетельствует уменьшение в три раза количества циклов до разрушения (490120 циклов). Отмеченное явление может быть следствием хрупкой природы интерметаллидных фаз или наличием остаточного напряжения в результате сегрегации легирующих элементов и примесей в условиях сварки.

Повышение частоты нагружения при  $R_{\sigma} = 0,4$  сопровождается увеличением степени разориентации бороздок относительно направления движения макротрещины и появлением мелких вторичных бороздок, следов скольжения, ступенек (см. рис. 3, а-в). При этом отмечается уменьшение шага усталостных бороздок и увеличение количества вторичных микротрещин, которые зарождаются на усталостных бороздках и распространяются перпендикулярно поверхности разрушения вглубь материала. Неодновременность реализации движения отдельных микротрещин при испытании вызывает объединение ступенек и приводит к изменению механизма распространения

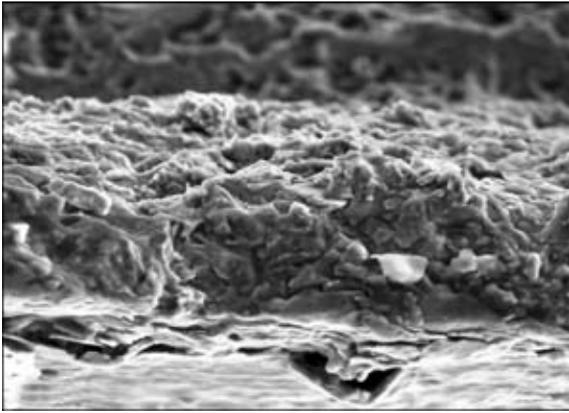


Рис. 4. Фрагмент поверхности ( $\times 500$ ) разрушения сварных соединений сплава АМг6 вблизи поверхности зоны перехода шва к основному металлу после проведения испытания на усталость при  $R_{\sigma} = -1$

усталостной трещины от хрупкого к смешанному типу (см. рис. 3,  $z-e$ ). При этом на изломе возрастает количество пластических мостиков, а при формировании гребешков фасеток появляются фрагменты пластических сдвигов. Все вместе усиливает разнообразие морфологии рельефа по ширине и протяженности усталостных бороздок и полос фасеточных структур. Физической основой подобного процесса является увеличение уровня локальной пластической деформации металла вследствие структурной перестройки, например, пересечения трещины скола тела зерна или разрушения (расслоения) блоков одного кристаллографического порядка [1–3].

Зона долома в таком образце содержит на рельефе большое количество ямок параболической

формы, образовавшихся в результате процессов отрыва и сдвига (см. рис. 3). При этом повышение уровня локальной пластической деформации в микрообъеме изменяет форму и направление ориентации ямок, увеличивает количество микротрещин по сравнению с общей картиной рельефа зоны долома. Местом появления первичных микротрещин выступают границы матрицы с нерастворимыми интерметаллидными включениями или фазовыми выделениями, что указывает на снижение между ними сил декогезии в условиях сварочного нагрева вследствие сегрегации элементов легирования и примесей. Результаты исследования хорошо согласуются с данными работ [1–5]. В них отмечается, что высокая частота нагружения при циклических испытаниях с коэффициентом асимметрии  $R_{\sigma} = 0,4$  вызывает быстрое изменение напряженного состояния в металле и приводит как к образованию на изломах бороздчатого рельефа, так и разрушению сколом по структурным составляющим и межфазным границам, что способствует появлению вторичных усталостных трещин.

Высокочастотная проковка поверхности в узкой зоне сплавления шва с основным металлом сплава АМг6 обеспечивает формирование плавного геометрического перехода шва в основной металл и снижение средних значений коэффициента концентрации напряжений. Положительный эффект проковки проявляется также в создании благоприятной структуры, обеспечивающей увеличение сопротивления микропластической деформации поверхностного слоя и образования

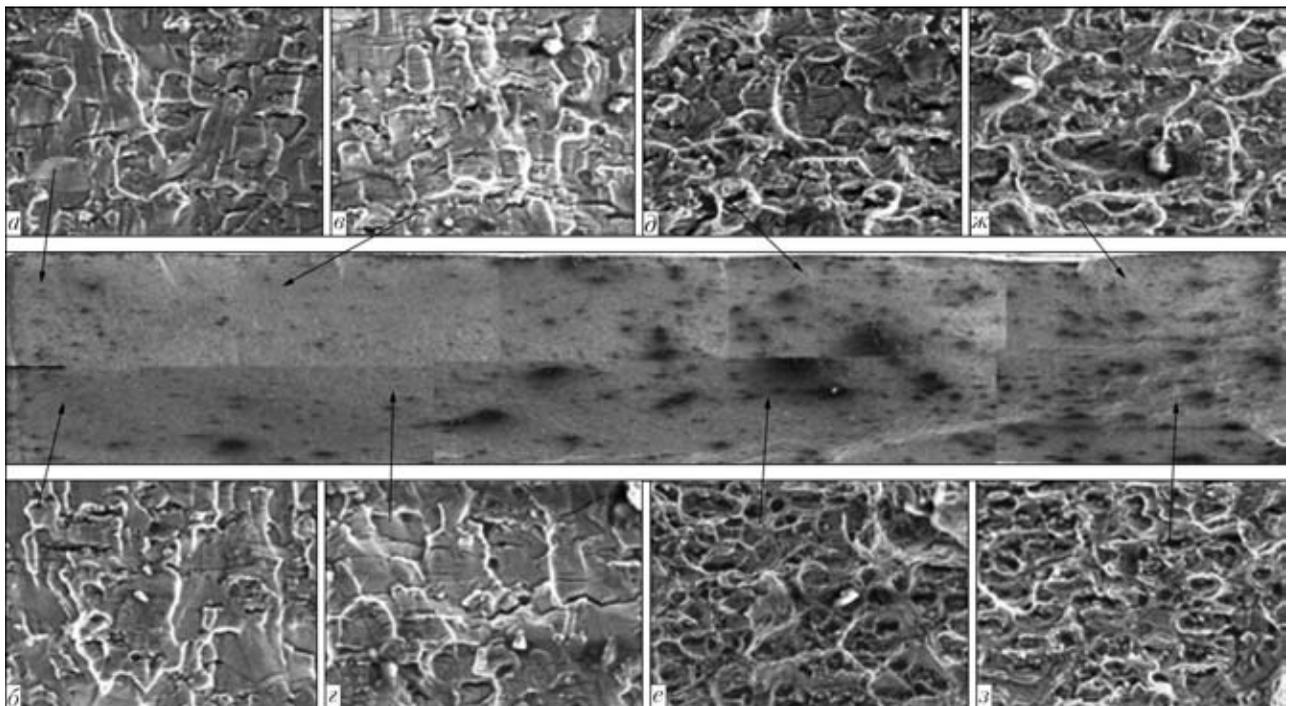


Рис. 5. Панорама излома ( $\times 13$ ) и фрактограммы его отдельных фрагментов ( $\times 500$ ) сварных соединений сплава АМг6, полученных плавящимся электродом, обработанных механической проковкой и испытанных при циклической нагрузке с коэффициентом асимметрии  $R_{\sigma} = -1$ :  $a-z$  — см. в тексте

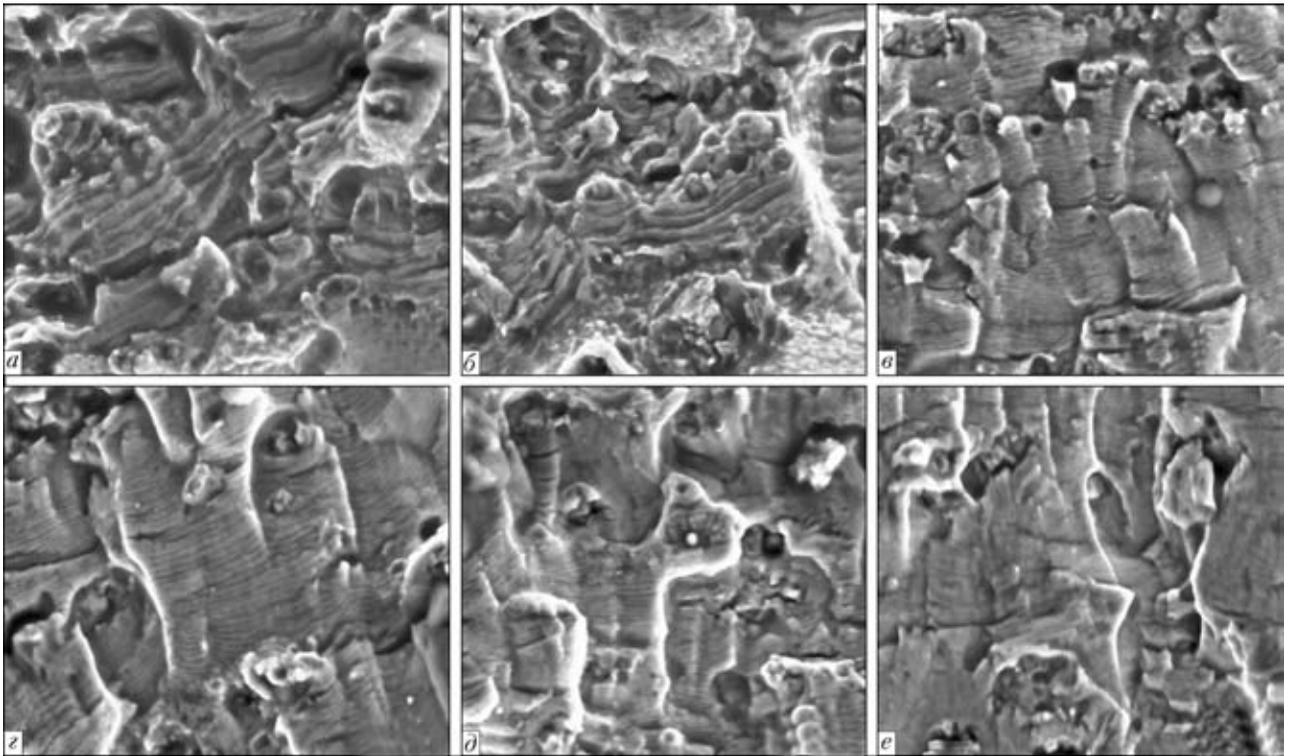


Рис. 6. Примеры участков ( $\times 1000$ ) резкого перехода рельефа от вязкого характера образования бороздок до хрупкого их расслоения: *a–e* — см. в тексте

высоких остаточных сжимающих напряжений [12]. Как показали фрактографические исследования поверхности разрушения образцов сварных соединений после циклических испытаний в малоцикловой области с коэффициентом асимметрии  $R_{\sigma} = 0,4$ , эффект упрочнения металла от выполнения проковки незначительный (см. рис. 4). Количество циклов до разрушения при этом составляет 17000. В приповерхностном слое зоны сплавления на изломе вдоль границ зерен располагаются участки квазискола, содержащие на фоне мелких и небольших ямок отдельные микротрещины. Кроме того, в приповерхностных слоях возможно формирование резкого перехода от вязких бороздок к хрупкому расслоению (см. рис. 5). При увеличении 1000 деталей рельефа видно, что линия, которая отделяет бороздки от других структурных составляющих, является трещиной (рис. 6, *в–д*). Она образуется в результате одновременного расслоения металла по нескольким кристаллографическим плоскостям, что может быть обусловлено уменьшением их прочности под действием деформации, вызывающей сжимающие напряжения. Следует отметить, что расслоение не является очагом зарождения усталостной трещины. Следовательно, упрочненный проковкой слой вовлечен в процесс усталостного разрушения, а его очаг смещен под деформированным слоем. Развитие трещины происходит на участке излома, характеризующегося пониженным сопротивлением разрушению.

## Выводы

1. Установлен интеркристаллитный механизм развития усталостной трещины при циклических испытаниях с асимметрией цикла нагружения  $R_{\sigma} = 0$  сварных соединений сплава АМг6, полученных плавящимся электродом. Наличие на поверхности излома трех рельефных зон свидетельствует о том, что разрушение сварных соединений на микроуровне носит смешанный и многоочаговый характер. Локализация пластической деформации в сварном соединении и, как следствие, зарождение трещины происходят в результате изменения размеров, формы и характера расположения выделений фаз, а также коагуляции включений интерметаллидных фаз, протекающих при сварочном нагреве, что снижает общее сопротивление металла распространению усталостной трещины.

2. Изменение коэффициента асимметрии при циклических испытаниях от  $R_{\sigma} = 0$  до более сложных условий ( $R_{\sigma} = -1$ ) вызывает усиление локализации пластической деформации, сокращение шага усталостных бороздок и увеличение количества вторичных микротрещин, которые берут начало на усталостных бороздках и распространяются перпендикулярно поверхности разрушения вглубь металла. На стадии распространения трещины усталостные бороздки характеризуются периодичностью шага с малым изменением ориентировки при переходе от кристаллита к кристаллиту.



3. Высокочастотная проковка в узкой зоне поверхности перехода шва сплава АМгб к основному металлу с использованием стальных бойков обеспечивает формирование более плавной геометрии переходной зоны от шва к основному металлу и снижение средних значений коэффициента концентрации напряжений. На рельефе упороченного слоя наблюдаются участки квазискола, содержащие на фоне мелких и небольших ямок отдельные микротрещины вдоль границ зерен. В приповерхностных слоях зоны сплавления возможно образование большого количества плоских участков и микротрещин, а также формирование резкого перехода от вязких бороздок к хрупкому расслоению. При этом усталостная трещина развивается под прокованным слоем металла.

1. *Владимиров В. И.* Физическая природа разрушения металлов. — М.: Металлургия, 1984. — 280 с.
2. *Ботвина Л. Р.* Кинетика разрушения конструкционных материалов. — М.: Наука, 1989. — 230 с.
3. *Иванова В. С., Ботвина Л. Р., Кудряшов В. Г.* Прочность и пластичность. Разрушение под действием кратковременных нагрузок. Вязкое и хрупкое разрушение. — М.:

Results of examination of structure of the fracture surface on samples of the metal-electrode welded joints of alloy АМg6 after cyclic tests with loading cycle asymmetry  $R_\sigma = 0.4$  and  $R_\sigma = -1$  are given. Peculiarities of morphology in different fracture regions have been revealed, and mechanism of propagation of the fatigue crack has been established. It is noted that fracture of the welded joints at a microlevel is of a mixed and multicentric character. High-frequency peening in a narrow АМG6 alloy weld to base metal transition zone by using steel strikers provides formation of a smoother geometry of the weld to base metal transition zone and decrease in values of the stress concentration factor.

ВИНИТИ, 1971. — С. 54–102. — (Итоги науки и техники. Сер. Металловедение и термическая обработка).

4. *Коцаньда С.* Усталостное разрушение металлов / Пер. с пол. — М.: Металлургия, 1976. — 455 с.
5. *Яковлева Т. Ю.* Локальная пластическая деформация и усталость металлов. — Киев: Наук. думка, 2003. — 236 с.
6. *Херцберг Р. В.* Деформация и механика разрушения конструкционных материалов / Пер. с англ. — М.: Металлургия, 1989. — 576 с.
7. *Лобанов Л. М., Кир'ян В. І., Книш В. В.* Підвищення ресурсу зварних металокопункцій високочастотною механічною проковкою // Фіз.-хім. механіка матеріалів. — 2006. — №1. — С. 56–61.
8. *Гордеева Т. А., Жегина И. П.* Анализ изломов при оценке надежности материалов. — М.: Машиностроение, 1978. — 199 с.
9. *Фрактография и вязкость разрушения алюминиевых и титановых сплавов* / В. С. Иванова, В. Г. Кудряшов, Б. А. Копелиович, Ю. К. Штовба // Технология легких сплавов. — 1974. — № 3. — С. 65–70.
10. *Фрактография и атлас фрактограмм: Справочник* / Пер. с англ. — М.: Металлургия, 1982. — 489 с.
11. *Фрактография — средство диагностики разрушенных деталей* / Под ред. М. А. Балтер. — М.: Машиностроение, 1987. — 160 с.
12. *Совершенствование сварных металлических конструкций* / Под ред. М. М. Жербина. — Киев: Наук. думка, 1992. — 273 с.

Поступила в редакцию 01.10.2010

## НОВАЯ КНИГА

### Неразрушающий контроль в Украине

*Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики готовит к изданию справочник «Неразрушающий контроль в Украине». В нем будет представлена информация о предприятиях и организациях Украины, занимающихся исследованиями и разработками в области неразрушающего контроля, изготовлением и продажей материалов, приборов и оборудования, оказанием услуг в области технического диагностирования. Это издание будет способствовать обмену информацией, ускорению решения многих задач по неразрушающему контролю и технической диагностике.*

#### Книга будет включать следующие разделы:

- Неразрушающий контроль в институтах НАН Украины
- Неразрушающий контроль в университетах
- Изготовители и поставщики средств неразрушающего контроля
- Производственные лаборатории и предприятия
- Обучение и сертификация персонала
- Испытательные лаборатории и сертификация продукции
- Стандартизация и метрология в неразрушающем контроле
- Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики
- Итоги профессиональных конкурсов УО НКТД
- Конференции и выставки
- Книги, журналы, интернет

Объем издания — ориентировочно до 300 с., формат 70×100/16. Тираж 1000 экз.

Предлагаем Вам разместить в книге информационные и рекламные материалы о предприятиях, разработках, услугах и пр. Вы также можете заказать необходимое количество экземпляров.

Тел.: (044) 287-26-66; тел./факс: (044) 289-21-66; e-mail: [ndt@paton.kiev.ua](mailto:ndt@paton.kiev.ua)