



## ХАРАКТЕР РАЗРУШЕНИЯ СПЛАВА В96 В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УСЛОВИЙ НАГРЕВА ПРИ СВАРКЕ

Т. М. ЛАБУР, д-р техн. наук, Т. Г. ТАРАНОВА, В. А. КОСТИН, кандидаты техн. наук, чл.-корреспонденты НАН Украины А. Я. ИЩЕНКО, Г. М. ГРИГОРЕНКО, А. А. ЧАЙКА, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Методом фрактографического анализа изучены особенности рельефа поверхности разрушения образцов, вырезанных из различных участков зоны термического влияния сварных соединений высокопрочного алюминиевого сплава В96. Установлены общие закономерности зарождения и распространения трещин в условиях внецентренного растяжения. Выявлены причины возникновения очагов концентрации напряжения и образования микротрещин на границах между зернами.

*Ключевые слова:* фрактографический анализ, высокопрочный алюминиевый сплав, теплофизические условия сварки, механизм разрушения, рельеф излома, магистральная трещина

Разрушение реального твердого тела представляет собой сложный процесс, включающий множество генетически взаимосвязанных или дополняющих друг друга явлений. Как правило, разрушение образцов, деталей машин или элементов конструкций происходит по нескольким параллельно или последовательно протекающим механизмам. Имеющиеся данные о природе разрушения пластичных материалов, включая алюминиевые сплавы [1–3], свидетельствуют о том, что снижение сопротивления материала зарождению и распространению трещин обусловлено переходом от механизма внутризеренного разрушения к межзеренному и зависит от различных факторов внутреннего и внешнего воздействия. Все механизмы разрушения объединяет единый индикатор процесса разрушения — работа, необходимая для осуществления процессов зарождения и распространения трещины. Хрупкие виды разрушения требуют незначительной работы разрушения, а вязкие — больших энергетических затрат. Следует отметить, что сам по себе уровень энергии разрушения не является показателем типа разрушения, который можно установить только на основе исследования характера изменения энергии разрушения при вариации некоторых структурных и механических факторов. К таким факторам относятся режимы и способы сварки, послесварочная термическая или термомеханическая обработка, а также условия эксплуатации сварных конструкций.

Известно, что структура и свойства сварных соединений высокопрочных алюминиевых сплавов зависят от способа и режима сварки [1]. Перегрев металла приводит к сегрегации легиру-

ющих элементов и примесей в структуре соединения. В результате происходит развитие неоднородности по их содержанию и образование межзеренных прослоек, состоящих из пересыщенных фаз, которые вызывают рост концентрации напряжения в металле и оказывают существенное влияние на эксплуатационные свойства сварных соединений.

Характер процессов, протекающих в зоне термического влияния (ЗТВ), как правило, определяют путем измерения твердости. Однако при этом выявляется лишь один аспект проблемы — снижение прочности при сварочном нагреве. Исследование его влияния на сопротивление зарождению и распространению трещин в соединениях сопряжено с определенными трудностями, обусловленными физической и структурной неоднородностью металла ЗТВ.

Целью настоящей работы является изучение на основе результатов фрактографических исследований особенностей изменения структуры металла ЗТВ под действием термического цикла сварки и влияния последнего на характер разрушения соединения.

Для достижения указанной цели проанализировали фрактограммы разрушенных образцов из сплава В96 системы легирования Al–Zn–Mg–Cu при сварке плавлением. На отдельных образцах моделировали условия нагрева и охлаждения при термическом цикле сварки. Подробно эта методика исследования изложена в работе [3]. Топографию поверхности разрушения, ее зависимость от вида напряженного состояния металла сварного соединения, его структурной неоднородности по составу изучали методом растровой электронной микроскопии. Характер и особенности микродеформации и сопутствующие этому структурные изменения, происходящие в металле сварных соединений при статическом нагружении, изучали



с использованием растрового электронного микроскопа JSM-840 с системой микроанализатора «Линк» 860/500 при ускоряющем напряжении 15, 25 и 30 кВ. Взаимодействие электронного пучка растрового микроскопа со структурными составляющими, которые содержат легирующие элементы, в том числе магний, медь, цирконий и скандий, и входят в состав исследуемых сплавов, создает определенный контраст изображения. Это позволяет осуществить качественную оценку изменения формы и размеров отдельных фрагментов структуры сплавов в различных теплофизических условиях, имеющих место при термическом цикле сварки в каждом из исследуемых участков ЗТВ.

Как показали исследования поверхности изломов образцов методом фрактографического анализа, разрушение металла, которое моделирует состояние перегрева в зоне сплавления шва с основным металлом, происходит параллельно оси прикладываемой нагрузки. Перегрев металла при сварке в условиях температуры неравновесного солидуса вызывает оплавление зерен вдоль их границ, что и наблюдается на рельефе излома поверхности разрушения образца из сплава В96 (рис. 1). При дуговых способах сварки в структуре металла зоны сплавления имеет место утолщение границ зерен, наблюдается наличие тройных стыков и значительное количество эвтектики, а при сварке электронным лучом образуется в основном полидрическая структура. Эвтектик в этом случае формируется меньше, что положительно влияет на уровень твердости металла [3].

Рельеф участка излома поверхности разрушения надреза неоднороден и отличается смешанным характером, если напряженное состояние, последовательность нагружения и микроструктура благоприятствуют одновременной реализации двух механизмов разрушения — вязкого и хрупкого (рис. 1, а). Разрушение происходит как в результате действия интеркристаллитного механизма на оплавленных зернах (рис. 1, б), так и скола по телу зерна (рис. 1, в). Ориентация плоскостей, по которым распространяются трещины, в этом случае совпадает с кристаллографической ориентацией решетки. Предполагается, что причиной разрушения такого характера является, помимо структурных превращений, декогезия границ зерен, происходящая вследствие их оплавления и выделения легкоплавких фазовых включений в межзеренном пространстве в условиях высокой (550 °С) температуры нагрева. Растягивающие напряжения, возникающие при охлаждении металла, приводят к нерав-

номерности микропластической деформации зерен и концентрации напряжения на их границах, особенно вблизи оплавленных зерен, в которых вследствие нагрева при сварке образуются микропустоты, вызывающие наряду с образованием фазовых включений зарождение трещин в зоне сплавления.

Напряженное состояние создается в металле ЗТВ вследствие высокой диффузионной подвижности легирующих элементов (цинка, магния, меди) и примесей, перемещающихся из объема зерен на их границу. Образование эвтектической прослойки и рост концентрации напряжения приводят к возникновению условий для облегченного зарождения микротрещин вдоль границ зерен по механизму квазискола. На это указывает камневидный рельеф излома, который обычно характерен для смешанного характера зарождения трещины, когда растрескиваются хрупкие структурные составляющие и за счет механизма сдвига происходит вязкое разрушение матрицы.

В средней части образца отмечается транскристаллитный тип излома, при котором зарождение трещины происходит в хрупких включениях, расположенных вдоль границ зерен (рис. 1, з). Там, где включения отсутствуют, имеет место вязкий (внутризеренный) характер разрушения. Различие в размерах частиц фаз, выделяющихся при нагреве, и расстояниях между ними обуславливает неоднородный характер расположения ямок на рельефе излома. Они преимущественно мелкие, а следовательно, энергоемкость их образования при разрушении небольшая. На участке излома,

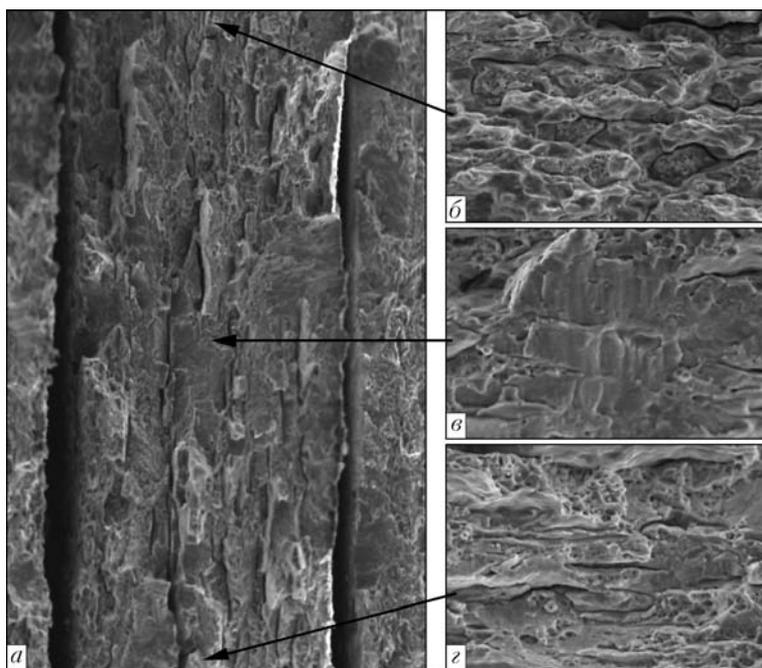


Рис. 1. Поверхность разрушения образца из сплава В96 после перегрева при  $T = (550 \pm 2) \text{ } ^\circ\text{C}$  в течение 3 с, моделирующего состояние металла в зоне сплавления: а — общий вид излома,  $\times 100$ ; б–з — участки соответственно под надрезом, изломом, остановки магистральной трещины,  $\times 500$

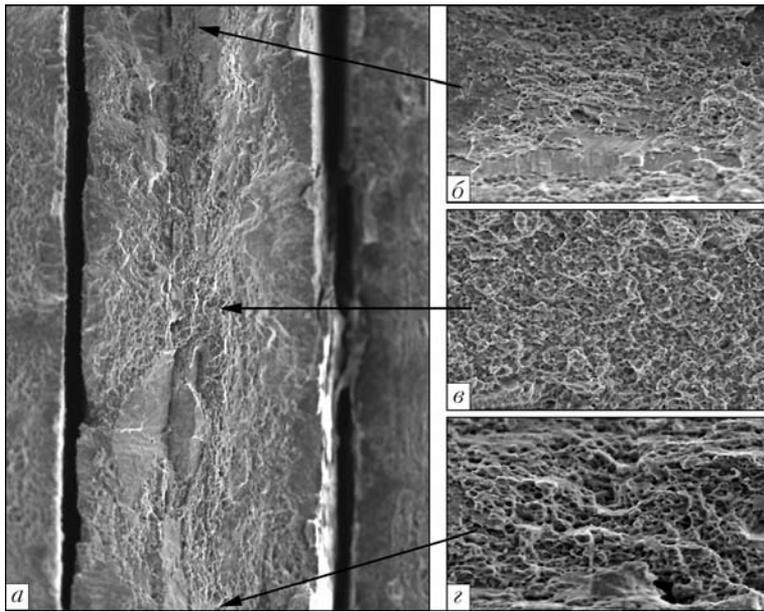


Рис. 2. Поверхность разрушения образца из сплава В96 после закалки при  $T = (460 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$  в течение 1 ч и охлаждения в воде: *a–г* — здесь и далее см. рис. 1

где происходит остановка магистральной трещины, преобладают вязкие фрагменты рельефа. Их наличие указывает на зарождение микротрещины на плоскости контакта матрицы и включения вследствие декогезии, протекающей в сплаве в процессе сегрегации легирующих элементов при сварочном нагреве.

Характер развития магистральной трещины в образцах, нагретых до температуры закалки ( $460 \text{ }^\circ\text{C}$ , 1 ч) с последующим охлаждением в воде (что моделирует термический цикл сварки электронным лучом), существенно отличается от развития трещин на изломах после перегрева. Как видно из рис. 2, *a*, «вязких» фрагментов здесь больше, а трещин меньше. Очагом зарождения

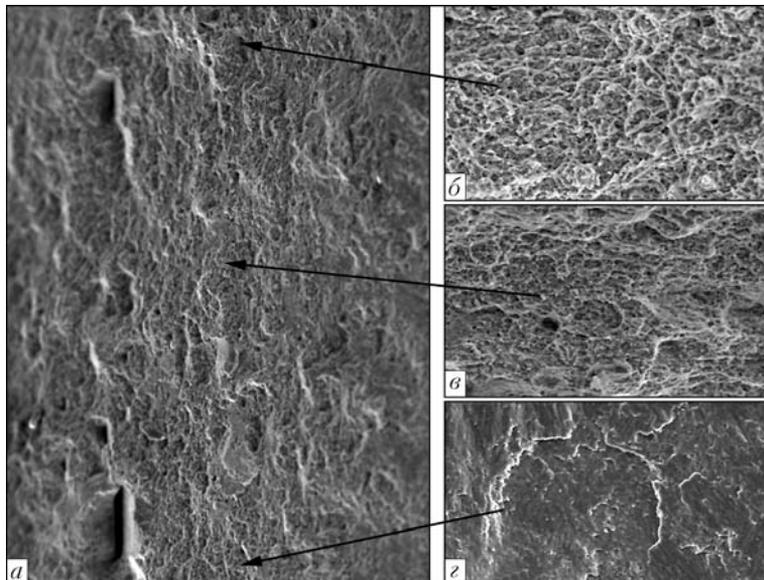


Рис. 3. Поверхность разрушения образца из сплава В96 после нагрева до температуры отжига  $T = (460 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$  в течение 20 мин и охлаждения в воде

трещины является скопления фаз, выделившихся в случае нагрева при сварке, а также наличие интерметаллидных включений. После разрушения они не участвуют в образовании фасеток при отрыве под действием нормальных напряжений, и поэтому оказываются на их дне (рис. 2, *б*, *в*).

Вблизи крупных выделений фаз наблюдается наличие отдельных участков скола на фоне вязкого рельефа и многочисленных мелких фасеток. Их ориентация указывает на то, что зарождение трещины происходит на различных кристаллографических плоскостях. Подобный механизм зарождения трещины может иметь место лишь в том случае, если пластичность сплава достаточно высокая, а напряжение течения недостаточно, чтобы трещина распространялась только по механизму слияния пор. Аналогичный характер разрушения отмечается на участке

излома в средней части образца и вблизи устья магистральной трещины (рис. 2, *в*, *г*). Рядом с вязкими фасетками наблюдается квазискол. Отмеченные особенности рельефа свидетельствуют о малой пластической деформации металла, степень которой в локальных областях можно оценить исходя из геометрических размеров отдельных элементов рельефа — фасеток или гребней отрыва. В середине излома вдоль линии проката располагаются преимущественно трещины незначительной протяженности, что указывает на высокий уровень напряжения на данном участке структуры металла ЗТВ. Имеет также место перпендикулярная ориентация гребней, расположенных вдоль вытянутых фасеток.

Участок излома остановки магистральной трещины отличается значительным межзеренным разрушением, происходящим под действием напряженного состояния высокого уровня. Перебегающие участки ямочного и хрупкого межзеренного разрушения указывают на охрупчивание структурных составляющих в условиях, моделирующих термический цикл сварки неплавящимся электродом.

Характер поверхности излома образца из сплава В96 после нагрева до температуры отжига и охлаждения в воде, присущий термическому циклу сварки электронным лучом. В изломе содержится около 80 % вязкого рельефа (рис. 3). Вследствие высокой скорости охлаждения в металле выделяются дисперсные включения размером



от 1 до 5 мкм. Это приводит к образованию многочисленных фасеток небольших размеров с невысокими гребнями. Как и в предыдущих образцах, гребни строго ориентированы в направлении, перпендикулярном приложенной нагрузке.

В средней части излома количество вязких фрагментов уменьшается, а скольных возрастает. Характер разрушения на участке излома, где произошла остановка магистральной трещины, преимущественно вязкий, хотя зарождение трещины происходит на хрупких включениях, вследствие отрыва последних от матрицы. Это свидетельствует о неполном развитии зернограницных сегрегаций на данном участке ЗТВ шва, выполненного электронно-лучевой сваркой с охлаждением в воде.

Характер рельефа образца из сплава В96 изменяется при охлаждении на воздухе после нагрева до температуры отжига (рис. 4). Тип разрушения образца в этом случае также смешанный, однако среди многочисленных фасеток, содержащих мелкие включения фаз, наблюдаются хрупкие фрагменты рельефа (см. рис. 3, а), которые отсутствуют при охлаждении в воде. Мелкие ямки на рельефе исследуемого сплава, различные по размерам и глубине, указывают на малое сопротивление зарождению микротрещин во время действия нормальных напряжений. Появляющиеся при нагреве металла фазы вдоль границ зерен вызывают дополнительные микронапряжения и тем самым вносят свой вклад в напряженное состояние структуры и обуславливают локальный характер зарождения трещин в наиболее хрупких участках ЗТВ. Подтверждением этого является наличие на дне ямок осколков интерметаллидных частиц, разрушенных при растрескивании. В центре излома образца (рис. 4, б, в) гребни имеют четкую ориентацию по направлению действия сил растяжения. Этот участок отличается рельефом смешанного характера, однако содержит меньшее количество скольных фрагментов, чем участок под надрезом. Сколы преимущественно располагаются вблизи семейства гребней. Указанный участок можно определить как место смены механизма зарождения трещин в кристаллографической плоскости. Помимо скольных фрагментов, излом содержит фрагменты рельефа, поверхность которых напоминает оксидные пленки, которые,

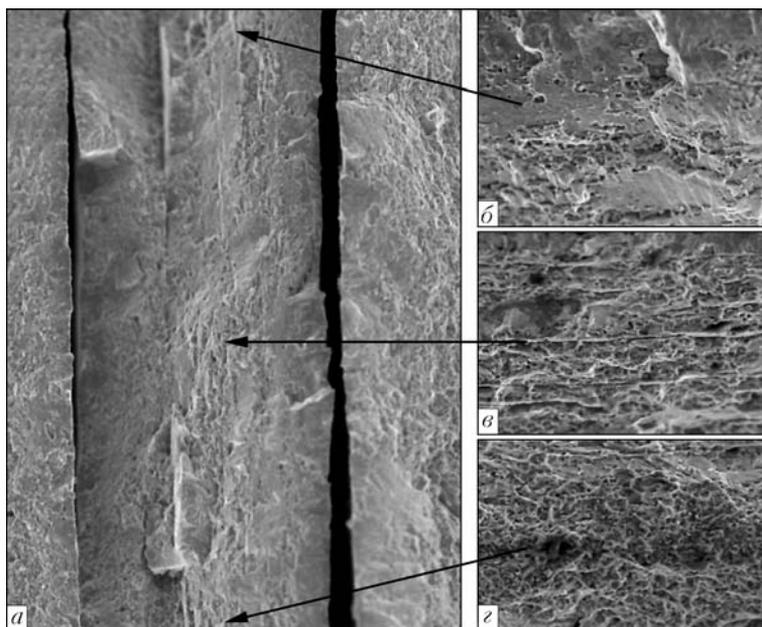


Рис. 4. Поверхность разрушения образца из сплава В96 после закалки при  $T = (460 \pm 2)^\circ\text{C}$  в течение 1 ч и охлаждения на воздухе

возможно, и являются одной из причин изменения механизма зарождения трещин. Подобный характер излома наблюдается на том участке образца, где происходит остановка магистральной трещины (рис. 4, г).

Основной причиной зарождения трещин в образце после нагрева до температуры отжига и охлаждения на воздухе является разрушение грубых частиц, расположенных по границам зерен. Они имеют вид геометрических фигур и образуются преимущественно на участках, где располагается легкоплавкая эвтектика, содержащая соединения

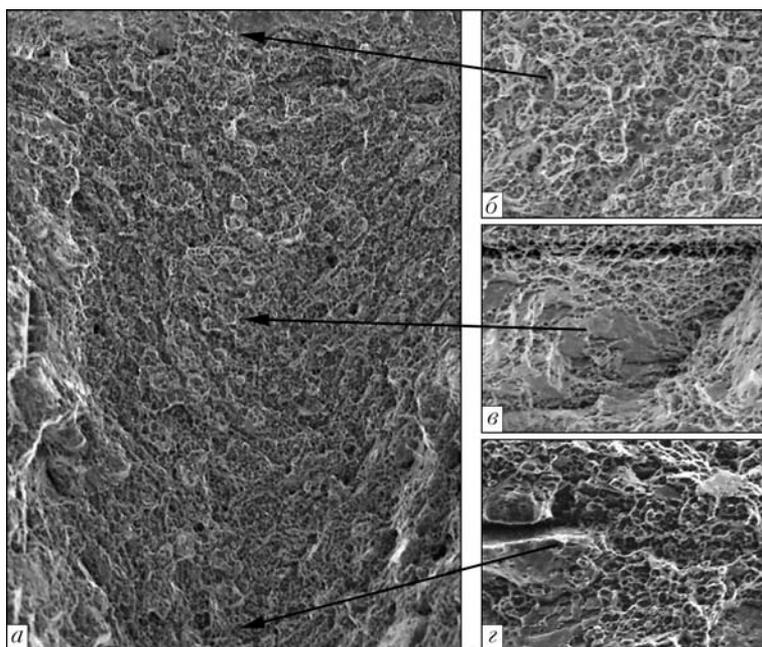


Рис. 5. Поверхность разрушения образца из сплава В96 после нагрева до температуры отпуска  $T = (360 \pm 2)^\circ\text{C}$  в течение 3 мин и охлаждения на воздухе

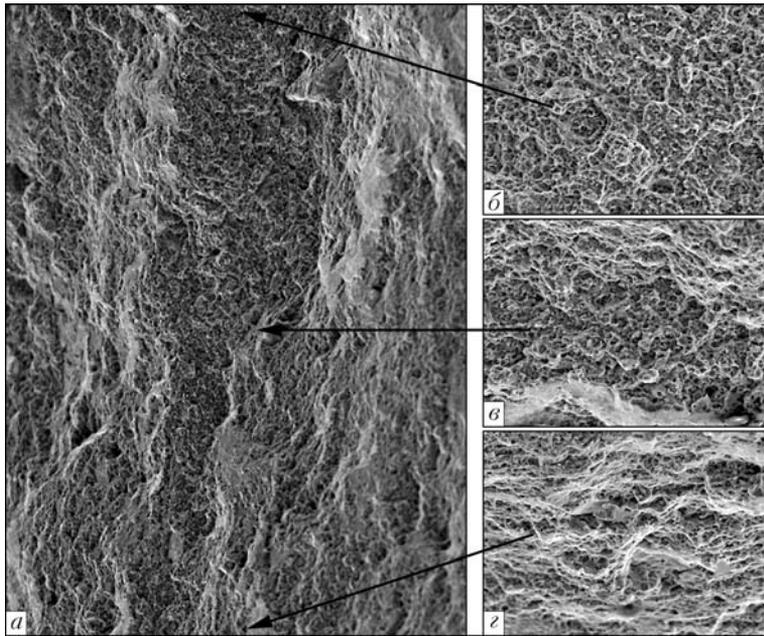


Рис. 6. Поверхность разрушения образца из сплава В96 после отжига при  $T = (360 \pm 2)^\circ\text{C}$  в течение 20 мин и охлаждения в воде

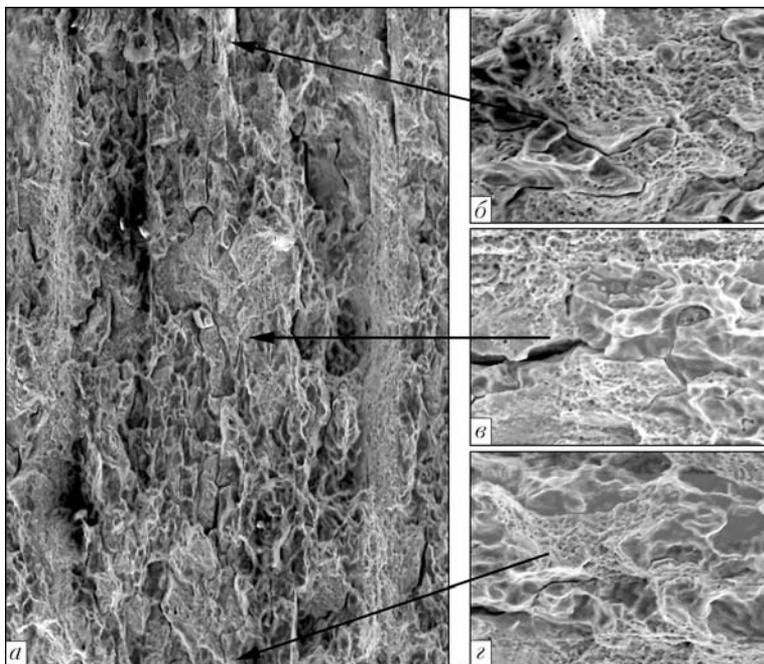


Рис. 7. Поверхность разрушения образца из сплава В96 на участке старения при  $T = (140 \pm 2)^\circ\text{C}$  в течение 7 ч после нагрева при сварке

основных легирующих элементов — цинка, меди, магния. При этом трещины имеют протяженность в 3–4 раза большую, чем образовавшиеся при охлаждении металла в воде (1...5 мкм).

Излом образцов из сплава В96 в состоянии после нагрева до температуры отпуска и охлаждения на воздухе содержит значительное количество фрагментов с небольшими вязкими фасетками (рис. 5, а). Зарождение трещины происходит в результате разрушения фазовых частиц, расположенных вдоль границ зерен. Они имеют вытянутую форму и направлены вдоль ориентации проката основного металла, что при разрушении при-

водит к образованию фасеток такой же формы. Зарождение трещин происходит вследствие отрыва по плоскостям сопряжения отличающихся между собой структурных составляющих, чем и объясняется появление многочисленных фасеток квазискола. Вокруг фасеток расположены в основном единичные гребни, а между ними — участки скола, образовавшиеся в результате пластических сдвигов металла в условиях деформации при испытании на вцентренное растяжение.

Поскольку воздействие термического цикла на данном участке весьма кратковременно (3 мин), то значительного изменения текстуры на изломе сплава не наблюдается. В средней части образца (рис. 5, б, в) «вязкие» фасетки перемежаются с небольшими участками квазискола, что может быть обусловлено изменением кристаллографической структуры плоскости исследуемого образца в процессе распространения трещины. Кроме того, на изломе встречаются отдельные участки, которые напоминают пустоты, формирующиеся на эвтектических образованиях [1]. Они не имеют четких контуров и значительно шире, чем хрупкие трещины. На вязкий характер их зарождения указывают мелкие фасетки с невысокими гребнями и включениями на дне. Характер рельефа излома участка образца, где произошла остановка магистральной трещины (рис. 5, г), такой же, как и в его центральном участке. При охлаждении в воде образца из сплава В96, нагретого до температуры отпуска, в рельефе излома проявляется большее количество вязких участков (рис. 6). Это указывает на действие более благоприятных теплофизических условий, которые модели-

ровали сварку электронным лучом. На высокую склонность к пластической деформации металла межзеренного пространства указывают развитые гребни вокруг фасеток, хотя последние имеют небольшие размеры. Об этом также свидетельствует и отсутствие микротрещин на поверхности разрушенных образцов.

После искусственного старения при  $T = 140^\circ\text{C}$  в течение 7 ч разрушение образцов из сплава В96 происходит также по смешанному типу — вязкие участки чередуются с хрупкими (рис. 7). Соотношение площадей, которые они занимают на изломе, составляет примерно 1:2. Трещины зарождаются преимущественно в теле включений, выде-



лившихся в процессе старения на границе между зернами. Сливаясь, они образуют камневидный рельеф излома, что характерно для случая, когда в металле действуют два или более механизмов разрушения. Можно предположить, что подобное явление обусловлено резким снижением зернограницной энергии вследствие адсорбции или под действием неоднородной сегрегации легирующих элементов и примесей на границах зерен [2]. Осколки разрушенных включений мелкодисперсные и располагаются на дне фасеток.

В средней части образца и вблизи участка, где магистральная трещина остановилась (рис. 7, в, з), характер излома аналогичный. Образование трещин происходит по слоям вдоль линии проката. Они глубокие с плоскими стенками, что, видимо, связано с хрупким механизмом распространения трещины, протекающим мгновенно по всей высоте образца под надрезом.

Поверхность разрушения образца из сплава В96 в исходном состоянии имеет хрупкий рельеф с расслоением (рис. 8). Отсутствие в изломе зоны пластической деформации указывает то, что разрушение происходило в два этапа. Первый — это плоскодеформированное состояние, связанное с напряженным состоянием, вызванным прокатом в процессе изготовления образца и условиями его испытания. В этом случае металл не способен активно поглощать энергию пластической деформации. Второй — это плосконапряженное состояние, которое приводит к образованию фасеток с невысокими гребнями и трещин незначительной длины. В середине образца характер рельефа аналогичный, формируется также семейство гребней, ориентация которых совпадает с направлением приложенного усилия в условиях внецентренного растяжения. На рис. 8, з представлен фрагмент вязкого рельефа вблизи участка скола. Подобный характер рельефа имеет поверхность излома на участке, где магистральная трещина остановилась при разрушении образца.

Таким образом, теплофизические условия, присутствующие при сварке дугой неплавящимся электродом, приводят к образованию на границе зерен микротрещин и смешанному характеру разрушения

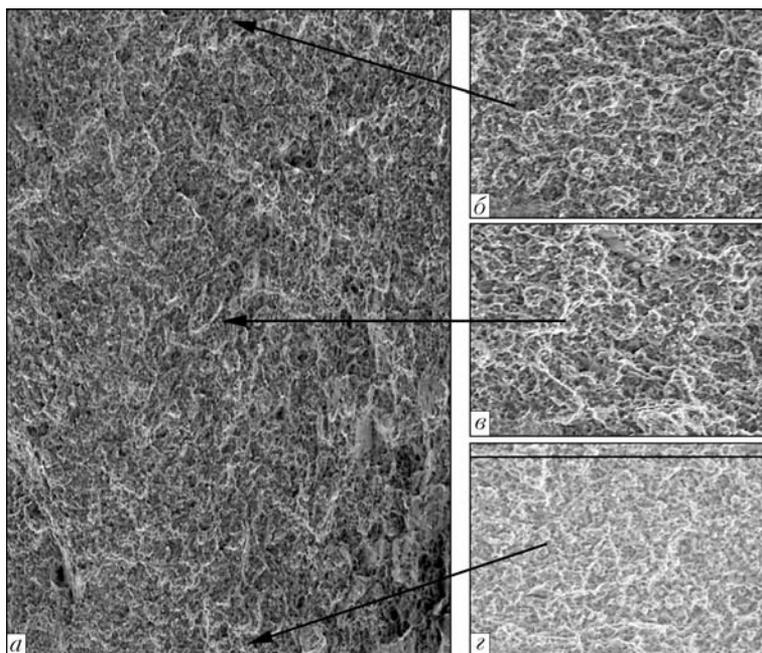


Рис. 8. Поверхность разрушения образца из сплава В96 в исходном состоянии

образца из сплава В96, что может быть обусловлено резким снижением зернограницной энергии вследствие адсорбции или неоднородной сегрегации легирующих элементов и примесей под действием термического цикла.

Более высокая скорость охлаждения металла в условиях электронно-лучевой сварки способствует увеличению количества «вязких» фрагментов рельефа на изломах с более мелкими (от 1 до 5 мкм) частицами, выделяющимися по объему зерен и вдоль их границ. Для предотвращения охрупчивания структурных составляющих металла ЗТВ сварных соединений желательнее выполнять сварку с меньшей погонной энергией, что повышает сопротивление металла зарождению трещин, а также обеспечивает благоприятные условия сочетания силовых и энергетических характеристик вязкости разрушения в сварных конструкциях.

1. Ищенко А. Я., Склабинская И. Е. Особенности превращения в зоне термического влияния при сварке некоторых высокопрочных алюминиевых сплавов // Автомат. сварка. — 1979. — № 5. — С. 26–29.
2. Рабкин Д. М. Металлургия сварки плавлением алюминия и его сплавов. — Киев: Наук. думка, 1986. — 256 с.
3. Особенности зарождения и распространения трещин при разрушении сварных соединений алюминий-литиевого сплава 1441 / Т. М. Лабур, А. Я. Ищенко, Т. Г. Таранова, Г. М. Григоренко, В. А. Костин // Автомат. сварка. — 2005. — № 5. — С. 11–16.

Fracture surface relief peculiarities of samples cut out from different segments of the HAZ of high-strength aluminum alloy welds B96 were studied by fractography analysis method. General laws of crack initiation and propagation at eccentric tension were determined. The reasons for initiation of centers of stress concentration and microcrack formation on grain boundaries were established.

Поступила в редакцию 06.07.2005