

01,07

Динамика деформационных полос и разрушение алюминий-магниевого сплава АМг6

© А.А. Шибков, А.Е. Золотов, М.А. Желтов, А.В. Шуклинов, А.А. Денисов

Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина,
Тамбов, Россия

E-mail: shibkov@tsu.tmb.ru

(Поступила в Редакцию 27 октября 2010 г.
В окончательной редакции 15 января 2011 г.)

Динамика полос деформации на стадии предразрушения алюминий-магниевого сплава АМг6 исследована с помощью скоростной видеосъемки. Выявлен различный характер корреляции между распространяющимися полосами деформации и развитием магистральной трещины в искусственно состаренном и рекристаллизованном сплаве.

Работа выполнена при частичной поддержке аналитической ведомственной целевой программы „Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2011 гг.)“ и федеральной целевой программы „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009–2013 гг.

1. Введение

Вязкое разрушение конструкционных металлов и сплавов — одна из традиционных проблем физики прочности и пластичности. В последнее десятилетие в связи с ростом производства листового проката алюминиевых сплавов для нужд автомобильной промышленности возникло сравнительно новое направление исследований, связанное с изучением физической природы разрушения сплавов, демонстрирующих скачкообразную деформацию, особенно практически важных сплавов систем Al–Mg, Al–Cu и Al–Li. Скачкообразная, или прерывистая, деформация металлических сплавов проявляется в так называемом эффекте „лестницы“ („лестничная“ ползучесть или эффект Савара–Массона при одноосном растяжении или сжатии с постоянной скоростью роста напряжения $\dot{\sigma}_0 = \text{const}$ [1]) или в более известном эффекте Портевена–Ле Шателье (ПЛШ) — появлении повторяющихся сбросов напряжения при деформировании с постоянной скоростью $\dot{\epsilon}_0 = \text{const}$ [2]. В этих ситуациях прерывистая деформация сопровождается локализацией пластического течения в статических или распространяющихся полосах деформации [3–8].

Полосы макролокализованной деформации создают технологический брак при производстве листового проката алюминиевых сплавов: они ухудшают качество поверхности промышленных изделий и могут вызывать преждевременную коррозию и разрушение. Последнее непосредственно связано с влиянием полос деформации на механизмы разрушения. Классическая теория вязкого разрушения, однако, не учитывает локализацию деформации в макроскопических полосах деформации, а основана на представлении о зарождении диффузионных микропор, их коалесценции и слиянии в магистральную трещину [9–13]. Эксперимент показывает, что на разрушение сплавов, проявляющих прерывистую

деформацию, сильное влияние оказывают деформационные полосы: в условиях эффекта ПЛШ, несмотря на порообразование, магистральная трещина всегда проходит по одной из статических полос деформации, которые накапливаются в деформируемом материале [14,15]. Ключевая роль полос макролокализованной деформации, самосогласованных по схеме „креста“ на стадии образования шейки перед разрывом, была выявлена в [16] на некоторых сплавах, не демонстрирующих прерывистую деформацию. В условиях проявления эффекта Савара–Массона статические полосы не наблюдаются, с течением времени полосы делокализуются, так как представляют собой расширяющиеся шейки [8,17], и механизм разрушения должен существенно отличаться от механизма разрушения сплава, проявляющего эффект ПЛШ.

Таким образом, механизмы разрушения металлических сплавов, демонстрирующих прерывистое течение, которые бы учитывали многоуровневый характер накопления дефектов перед стартом макротрещины, включая динамическое взаимодействие процессов полосообразования и порообразования, в настоящее время не исследованы. Эта проблема представляет большой практический интерес, поскольку прерывистая деформация характерна для широкого круга конструкционных материалов, особенно алюминий-магневых сплавов с содержанием магния от 3 до 6%, применяемых при производстве автомобилей и авиационной техники. Следует подчеркнуть, что прерывистая деформация этих сплавов является структурно-чувствительным эффектом. В [18] обнаружено резкое изменение характеристик прерывистой деформации Савара–Массона после отжига в окрестности температуры ограниченной растворимости сплава АМг6 $T_{SV} \approx 275^\circ\text{C}$, которое свидетельствует о существенном влиянии частиц вторичной $\beta(\text{Al}_3\text{Mg}_2)$ -фазы на механизмы прерывистой деформации. В настоящей

работе с помощью высокоскоростной видеосъемки исследована нелинейная динамика распространяющихся полос деформации и их роль в образовании шейки и макроразрушении рекристаллизованного и искусственно состаренного сплавов АМг6, демонстрирующих прерывистую деформацию Савара–Массона.

2. Методика

Образцы сплава АМг6 (Al–5.92 wt.%Mg–0.61 wt.%Mn–0.27 wt.%Fe–0.14 wt.%Si) в форме двусторонних лопаток с размерами рабочей части $6 \times 3 \times 1.2$ mm вырезали из холоднокатаного листа ($\epsilon = 5$). Для исследования особенностей пространственно-временных структур макролокализованной пластической деформации на стадии предразрушения в искусственно состаренном и рекристаллизованном сплавах АМг6 образцы подвергали часовому отжигу в интервале температур $T_{\text{ан}} = 240\text{--}500^\circ\text{C}$ и закачивали на воздухе. Выше температуры ограниченной растворимости $T_{\text{SV}} \approx 275^\circ\text{C}$ состава сплава представляет собой α -твердый раствор магния в алюминии с рекристаллизованной зеренной структурой и средним размером зерна около $10\ \mu\text{m}$, а ниже T_{SV} , в двухфазной области, структура и состав сплава определяется процессом возврата, первичной рекристаллизации и выделения частиц вторичной $\beta(\text{Al}_3\text{Mg}_2)$ -фазы [18]. Через 1 h после термообработки образцы растягивали с постоянной скоростью роста напряжения ($\dot{\sigma}_0 = 0.2\ \text{MPa/s}$) при комнатной температуре в мягкой деформационной машине, описанной в [19].

Динамику полос деформации и трещин исследовали с помощью скоростной цифровой видеокамеры VS-FAST/G6 научно-производственной компании „Видеоскан“. Для регистрации полос деформации на всей рабочей части образца поле зрения видеокамеры выбиралось 10×10 mm, что при скорости съемки 500 frames/s и формате изображения 1204×1280 пикселей соответствует разрешению около $8\ \mu\text{m}/\text{pixel}$, т. е. размер пикселя примерно равен размеру зерна $10\ \mu\text{m}$. Обработка видеопленки состояла в вычитании с помощью компьютерной программы последовательных во времени кадров фильма. При такой обработке изображений выделяются только распространяющиеся полосы деформации и трещины. Фрактографию поверхности разрушения исследовали с помощью двухлучевого сканирующего электронно-микроскопического комплекса Neon 40 компании Carl Zeiss. Подробнее методика эксперимента и микроструктура материала исследования описаны в [17–19].

3. Результаты и обсуждение

3.1. Стадия предразрушения. В сплавах, которые деформируются монотонно, без скачков, стадией предразрушения принято считать участок кривой нагружения с показателем деформационного упрочнения $n < 0.5$ [20]. В некоторых алюминиевых сплавах

продолжительность стадии предразрушения может составлять около половины диаграммы растяжения [21]. Металлы, демонстрирующие прерывистую деформацию, разрушаются в результате развития деформационного скачка. В сплаве АМг6 в условиях растяжения с постоянной скоростью роста напряжения $\dot{\sigma}_0$ последний скачок деформации имеет амплитуду $\sim 10\%$, что составляет около 1/3 деформации образца при разрыве (см., например, рис. 1 в [17]). Длительность скачка деформации составляет обычно $0.4\text{--}0.6$ s, так что средняя по времени скорость деформации всего образца примерно $0.2\ \text{s}^{-1}$, что на 3–4 порядка выше скорости деформации на последнем плато. Фактически вся деформация на скачке осуществляется полосами деформации, которые представляют собой расширяющиеся домены высокоскоростной деформации [17,22]. Скорость деформации в полосе значительно превышает среднюю скорость деформации образца во время развития скачка. По оценке в [23] это превышение может достигать двух-трех порядков. Таким образом, развитию магистральной трещины предшествует интенсивная пространственно неоднородная пластическая деформация, происходящая на последнем деформационном скачке. Поэтому деформационные процессы на последнем скачке деформации естественно рассматривать как стадию предразрушения сплава, демонстрирующего ступенчатую деформацию Савара–Массона. Высокоскоростные измерения кинетических и морфологических характеристик деформационных полос на этой стадии позволили выявить существенно различное влияние полос на развитие магистральной трещины в рекристаллизованном и искусственно состаренном сплаве АМг6.

3.2. Полосы деформации и разрушение рекристаллизованного сплава АМг6. Данные видеосъемки со скоростью 500 frames/s показывают, что развитие последнего деформационного скачка начинается с зарождения на ребре плоского образца первичной полосы деформации обычно в средней части образца. Ее вклад в деформацию образца не превышает $\sim 0.3\%$, что почти на 1.5 порядка меньше амплитуды последнего деформационного скачка, но первичная полоса выполняет важную роль на стадии предразрушения, являясь „спусковым крючком“ — триггером развития последнего скачка деформации перед разрывом. Скорость перемещения вершины полосы составляет $\approx 1\text{--}1.5$ m/s, а начальная скорость бокового роста — около 10 cm/s. Через $10\text{--}12$ ms после зарождения первичной полосы скорость расширения полосы начинает падать и через 100 ms она составляет не более 1 mm/s. Затем каждая граница расширяющейся полосы в разные моменты времени генерирует вторичные полосы, которые расширяются подобным образом, порождают полосы второго поколения и т.д. Такой каскадный механизм размножения деформационных полос Савара–Массона подробно описан в [17]. Для его характеристики и исследования связи между пространственно-временной структурой деформационных полос и магистральной

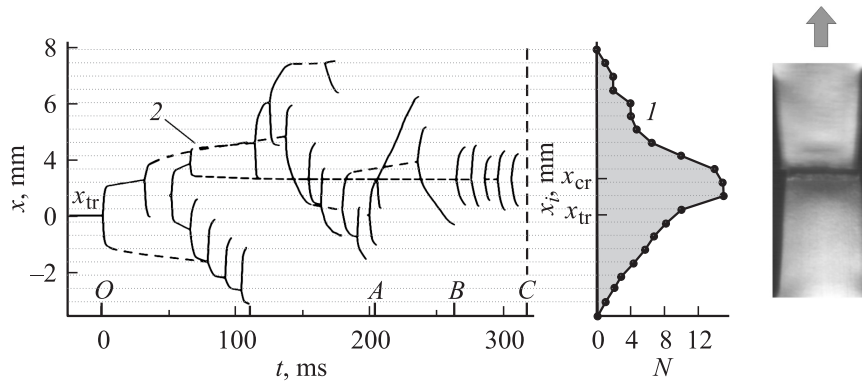


Рис. 1. Пространственное статистическое распределение полос деформации на последнем скачке деформации сплава АМг6 с рекристаллизованной зеренной структурой. 1 — гистограмма количества полос $N(x_i)$, 2 — корреляционная диаграмма $x(t)$. $T_{\text{ан}} = 450^\circ\text{C}$. $\dot{\sigma}_0 = 0.2\text{ МПа/с}$. OA — стадия размножения полос, AB — стадия расширения полос без размножения, BC — стадия образования шейки, C — момент разрыва образца, отмеченный вертикальной штриховой линией. На фотографии справа рядом с гистограммой показано положение макротрещины в момент разрыва образца.

трещиной рабочая область образца условно разделялась на 20 эквидистантных параллельных сечений, подсчитывалось количество границ полос N , пересекающих каждое сечение $x = x_i$, и строилась гистограмма $N(x_i)$, где $i = 1, 2 \dots 20$.

На рис. 1 представлена типичная гистограмма $N(x_i)$, характеризующая пространственно статистическое распределение полос деформации с отметками позиции зарождения первичной полосы-триггера x_{tr} и магистральной трещины x_{cr} , а также корреляционная диаграмма $x(t)$ — временная зависимость координаты x границы полосы относительно позиции зарождения первичной полосы $x_{\text{tr}} = 0$ для последнего скачка образца АМг6 с рекристаллизованной зеренной структурой. Из рис. 1 можно выделить по крайней мере три основные стадии развития пространственно неоднородной деформации на последнем деформационном скачке. Временной интервал OA соответствует стадии размножения полос деформации Савара–Массона. После окончания стадии размножения полос возникает одна или две полосы, которые расширяются без размножения почти на всю рабочую часть образца. Эта стадия отмечена на рис. 1 интервалом AB . Далее на временном отрезке BC происходит образование шейки с разрывом образца в момент времени C . Основные корреляционные особенности пространственно-временной структуры деформационных полос и макротрещины состоят в том, что позиция магистральной трещины: а) не совпадает с позицией первичной полосы, с которой начинается развитие последнего скачка деформации, т.е. $x_{\text{cr}} \neq x_{\text{tr}}$, б) находится в области максимума гистограммы $N(x_i)$, в) совпадает с минимальным сечением шейки.

Одномерная корреляционная диаграмма $x(t)$ несет мало информации о динамике формирования шейки. Из фрагмента видеофильма, представленного на рис. 2, видно, что главной особенностью динамики деформационных полос на стадии формирования шейки является

смена поступательного перемещения на осциллирующее с повторяющейся сменой угла полосы относительно оси растяжения при неподвижном „центре тяжести“ полосы. Сначала угол полосы совершает колебания в секторе $\approx 55\text{--}125^\circ$ с периодом $10\text{--}20\text{ мс}$, затем по мере приближения к разрыву угол полосы возрастает и за $\sim 10\text{ мс}$ до старта магистральной трещины полоса ориентируется почти перпендикулярно оси растяжения (рис. 2, кадры 112–114). Ширина полосы в ходе осцилляции остается примерно постоянной $\approx 1.0\text{--}1.5\text{ мм}$, соизмеримой с толщиной образца, 1.2 мм . Обычно наблюдается 4–6 осцилляций угла полосы до начала развития магистральной трещины.

Следует отметить, что продолжительность процесса формирования шейки составляет $40\text{--}60\text{ мс}$, реже — около 100 мс . Поэтому при съемках со скоростью 25 frames/s и меньше с помощью видеокамеры или тепловизора осцилляции угла полосы не выявляются, а регистрируется в единственном кадре лишь картина пересечения двух сопряженных полос в виде „креста“ [14,16]. Реально же крестообразная картина полос соответствует „точкам поворота“ углового осциллятора, т.е. крайним наиболее вероятным положениям осциллирующей полосы.

Из рис. 2 видно, что на стадии поворота полосы ее границы приобретают вид ломаной линии (см., например, кадр 83). Видимо, в центральной области шейки (вблизи точки излома границы полосы) создается концентрация напряжений, достаточная для образования микротрещин. Это предположение косвенно подтверждается результатами видеосъемки завершающего этапа эволюции шейки со скоростью 5000 frames/s (рис. 3). Из рисунка видно, что магистральная трещина зарождается в центральной области шейки в „центре тяжести“ осциллирующей полосы. Время распространения трещины через сечение образца не превышает 0.4 мс , что дает нижнюю оценку скорости вершины трещины около 6 м/с .

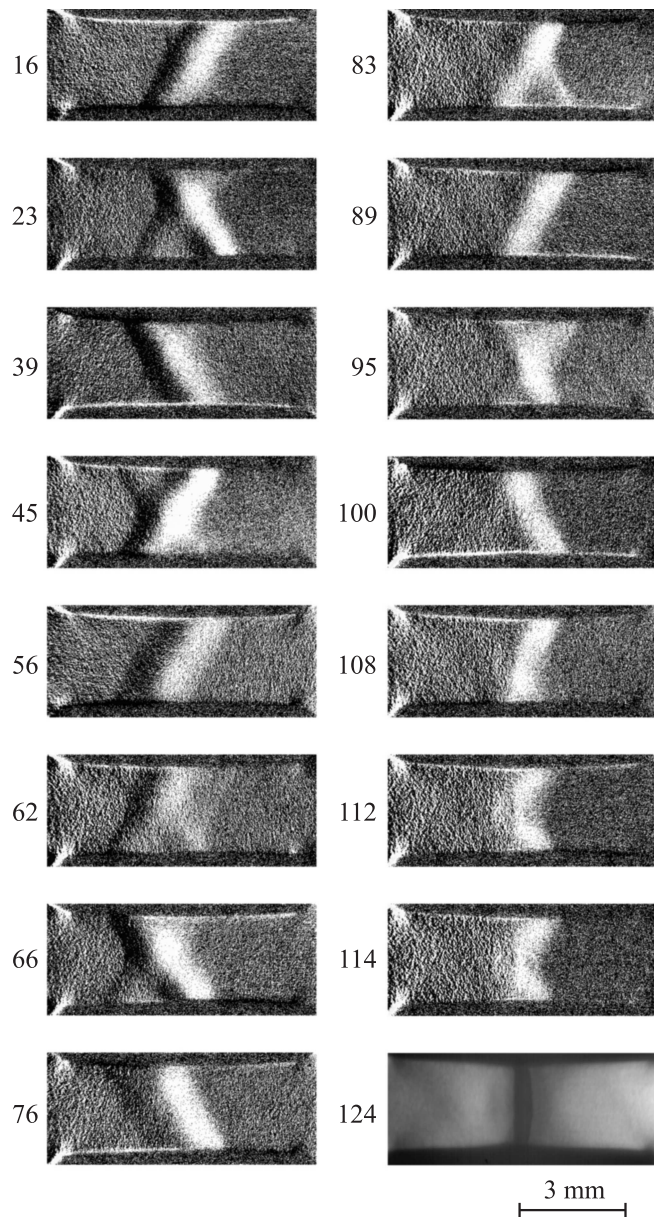


Рис. 2. Осцилляции угла полосы деформации и образование шейки перед разрывом рекристаллизованного сплава АМг6. Скорость видеосъемки 500 frames/s. Числа — номера кадров.

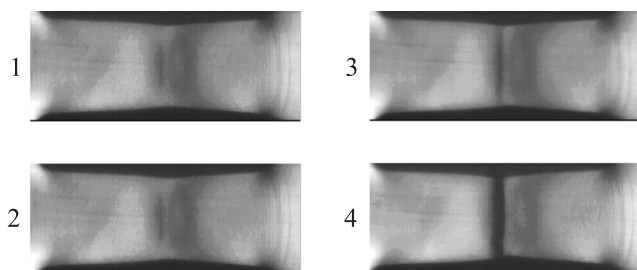


Рис. 3. Зарождение магистральной трещины в шейке образца АМг6 с рекристаллизованной структурой. 1–4 — четыре последовательных кадра перед разрывом образца, включая момент разрыва (кадр 4). Время между кадрами 200 μ s. Скорость видеосъемки 5000 frames/s.

Эта оценка соизмерима со скоростью вершины полосы Савара–Массона, измеренной на последнем скачке деформации $v_t \approx 7$ m/s.

Таким образом, в рекристаллизованном сплаве АМг6 макротрещина зарождается в центральной области шейки в „центре тяжести“ осциллирующей полосы, где происходит наиболее интенсивная пластическая деформация сдвига, а ее средняя скорость соизмерима со скоростью вершины деформационной полосы Савара–Массона ~ 10 m/s, которая является, видимо, предельной скоростью распространения пластической волны в данном материале.

3.3. Динамика деформационных полос и разрушение искусственно состаренного сплава АМг6. Несмотря на сложную динамику деформационных полос в ходе развития последнего скачка деформации в искусственно состаренном сплаве, магистральная трещина распространяется в той же плоскости, в которой распространялась первичная полоса локализованного сдвига (рис. 4). Анализ 50 видеополос показывает, что это совпадение составляет 1–2 пикселя, т.е. соизмеримо со средним размером зерна $d \approx 10 \mu$ m.

Важно отметить, что магистральная трещина представляет собой сдвиговую трещину (трещину второго рода), поверхность которой составляет угол около 45° к оси растяжения, т.е. проходит в плоскости максимальных касательных напряжений, как и полоса-триггер. Такая корреляция геометрии полосы-триггера и магистральной трещины типична для образцов АМг6, состаренных в температурном интервале 240 – 270° С. На основании анализа данных видеосъемки фронтальной, боковой и аксонометрической проекцией деформируемого образца сплава АМг6 с преципитатной микроструктурой можно сделать следующие заключения: а) первичная полоса-триггер развития деформационного скачка перед разрывом представляет собой полосу локализованного сдвига, которая распространяется под углом 45° к оси растяжения; б) скорость вершины полосы-триггера 1 – 1.5 m/s на 2 – 2.5 порядка выше начальных скоростей бокового роста, поэтому полоса-триггер имеет форму клина со средним углом $\sim 10^{-2}$ rad и радиусом вершины $\sim 10 \mu$ m, соизмеримым с размером зерна; в) полоса-триггер с точностью порядка размера зерна $\sim 10 \mu$ m определяет поверхность разрушения и в этом аспекте является предвестником магистральной трещины.

Известно, что скорость вершины плоского скопления дислокаций $v_t = N_d v_{ind}$, где N_d — количество дислокаций в скоплении, v_{ind} — скорость индивидуальной дислокации при том же уровне приложенного напряжения [24]. Поэтому скорость головной группы скопления является мерой внутренних напряжений в голове скопления. Эти локальные напряжения растут с ростом скорости полосы и могут провоцировать образование микротрещин в „опасных местах“ в поликристалле, вблизи включений, особенно находящихся у границы зерна. Поэтому естественно предположить, что динамическое взаимодействие первичной полосы-триггера,

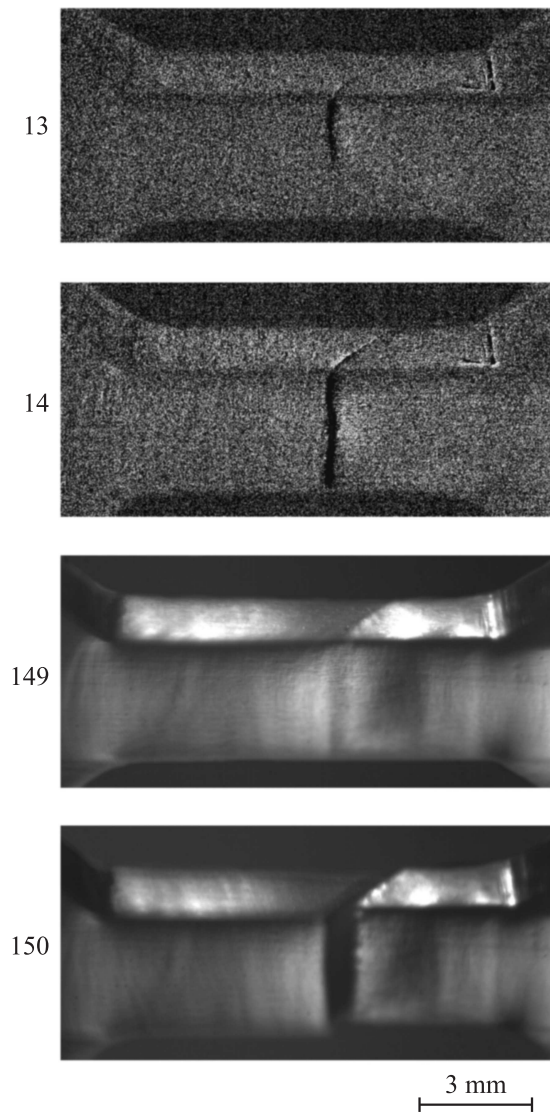


Рис. 4. Пространственная корреляция первичной полосы — триггера развития последнего скачка деформации — и магистральной трещины в искусственно состаренном сплаве АМг6, $T_{an} = 260^\circ\text{C}$. Аксонометрическая съемка, 500 frames/s. Зарождение и распространение первичной полосы представлены на кадрах 13 и 14 (результаты компьютерной обработки изображений), а разрушение — на кадрах 149, 150.

представляющей собой полосу локализованного сдвига, с частицами вторичной фазы создает в плоскости распространения полосы систему микротрещин. Эти микротрещины в дальнейшем будут подрастать всякий раз, когда через эту плоскость будет проходить граница новой полосы деформации. Поэтому поверхность разрушения полностью определяется поверхностью полосы-триггера, что и объясняет наблюдаемую корреляцию первичной полосы и магистральной трещины в сплаве АМг6 с преципитатной микроструктурой, полученной искусственным старением.

Такая схема корреляции первичной полосы локализованного сдвига и макроскопической сдвиговой трещины

не исключает порообразования, о чем свидетельствует чашечный излом. Микротрещины у включений β -фазы, образовавшиеся на стадии распространения первичной полосы, служат зародышами пор, которые растут, сливаясь в плоскую мезопору, а затем в магистральную трещину, которая распространяется поэтому в плоскости первичной полосы локализованного сдвига. Роль включений в образовании микропор хорошо известна [9–13]. Анализ фрактограмм излома позволяет выявить достаточно крупные включения β -фазы размером $0.4\text{--}0.7\ \mu\text{m}$ на дне некоторых чашек.

В сплаве АМг6 с рекристаллизованной структурой, полученной отжигом выше температуры растворения вторичной β -фазы, т.е. при $T_{an} > T_{SV}$, β -фаза отсутствует [25,26], поэтому отсутствует описанный выше механизм разрушения, связанный с динамическим взаимодействием деформационной полосы с включениями β -фазы. Радикальное изменение характера корреляции между полосами деформации и магистральной трещиной происходит в узком интервале температур отжига, около 10°C в окрестности температуры сольвус 275°C . Если при $T_{an} = 270^\circ\text{C}$ наблюдается совпадение положения и геометрии полосы триггера и макротрещины, то уже при $T_{an} = 280^\circ\text{C}$ такое совпадение никогда не наблюдается, а магистральная трещина проходит через сечение, наиболее интенсивно „обработанное“ полосами деформации, т.е. соответствующее максимуму гистограммы $N(x_i)$.

4. Выводы

1) С помощью высокоскоростной видеосъемки поверхности деформируемого с постоянной скоростью нагружения $\dot{\sigma}_0 = \text{const}$ сплава АМг6 установлено, что в ходе развития последнего скачка деформации происходит эволюционный переход от одного типа пластической неустойчивости, связанного с распространением расширяющихся деформационных полос, к другому, а именно к глобальной потере устойчивости материала — образованию шейки перед разрывом. Топологически это выражается в смене поступательного движения границ полос Савара–Массона на осциллирующее, с повторяющейся сменой угла полосы относительно оси растяжения при неподвижном „центре тяжести“ полосы на стадии образования шейки.

2) Установлено, что в искусственно состаренном сплаве АМг6 позиция магистральной трещины совпадает с первичной полосой локализованного сдвига — триггера развития последнего скачка деформации. Предполагается, что полоса-триггер, распространяющаяся со скоростью $\sim 1\ \text{m/s}$, при взаимодействии с частицами вторичной $\beta(\text{Al}_3\text{Mg}_2)$ -фазы создает в плоскости распространения систему микротрещин, по которым пройдет магистральная трещина. Роль полос деформации состоит

в том, что при пересечении границы распространяющейся полосы с этой системой микротрещин происходит их рост и последующее слияние в магистральную трещину.

3) В сплаве АМг6 со структурой собирательной рекристаллизации позиция магистральной трещины не совпадает с позицией первичной полосы, а проходит через сечение, наиболее интенсивно „обработанное“ полосами деформации. С помощью видеосъемки со скоростью 5000 frames/s установлено, что трещина зарождается в центральной области шейки, где происходит наиболее интенсивная пластическая деформация, и выходит на поверхность образца со скоростью, соизмеримой со скоростью вершины полосы деформации Савара–Массона. Предполагается, что средняя скорость вязкой трещины ограничена скоростью вершины деформационной полосы ~ 10 m/s, которая является, видимо, предельной скоростью пластической волны в данном материале.

Список литературы

- [1] Дж.Ф. Белл. Экспериментальные основы механики деформируемых тел. Наука, М. (1984). Ч. 2. 432 с.
- [2] A. Portevin, F. Le Chatelier. Trans. Am. Soc. Steels Treating **5**, 457 (1924).
- [3] K. Chihab, Y. Estrin, L.P. Kubin, J. Vergnol. Scripta Met. **21**, 203 (1987).
- [4] Y. Estrin, L.P. Kubin. In: Continuum models for materials with microstructure / Ed. H.-V. Muhlhaus. J. Wiley, N.Y. (1995). Ch. 12. P. 395.
- [5] М.А. Лебедкин, Л.Р. Дунин-Барковский. ЖЭТФ **133**, 1816 (1998).
- [6] М.А. Лебедкин. Автореф. докт. дис. ИФТТ РАН, Черноголовка (2002).
- [7] М.М. Криштал. Автореф. докт. дис. ТГУ, Тольятти (2002).
- [8] А.А. Шибков, Р.Ю. Кольцов, М.А. Желтов, А.В. Шуклинов, М.А. Лебедкин. Изв. РАН. Сер. физ. **70**, 9, 1372 (2006).
- [9] М.Л. Бернштейн, В.А. Займовский. Механические свойства металлов. Металлургия, М. (1979). 496 с.
- [10] В.И. Бетехтин, В.И. Владимиров. Кинетика микроразрушения кристаллических тел. Проблемы прочности и пластичности твердых. Наука, Л. (1979). 142 с.
- [11] В.И. Владимиров. Физическая природа разрушения металлов. Металлургия, М. (1984). 280 с.
- [12] В.В. Рыбин. Большие пластические деформации и разрушение металлов. Металлургия, М. (1986). 224 с.
- [13] P.F. Tomason. Ductile fracture of metals. Pergamon Press, Oxford (1990). 327 p.
- [14] H. Halim, D.S. Wilkinson, M. Niewczas. Acta Mater. **55**, 4151 (2007).
- [15] K. Spencer, S.F. Corbin, D.J. Lloyd. Mater. Sci. Eng. A **325**, 1–2, 394 (2002).
- [16] В.Е. Панин, Л.С. Деревягина, Е.Е. Дерюгин, А.В. Панин, С.В. Панин, Н.А. Антипина. Физ. мезомеханика **6**, 6, 97 (2003).
- [17] А.А. Шибков, А.Е. Золотов. Письма в ЖЭТФ **90**, 5, 412 (2009).
- [18] А.А. Шибков, А.А. Мазилкин, С.Г. Протасова, Д.В. Михлик, А.Е. Золотов, М.Е. Желтов, А.В. Шуклинов. Деформация и разрушение материалов **5**, 24 (2008).
- [19] А.А. Шибков, М.А. Лебедкин, М.А. Желтов, В.В. Скворцов, Р.Ю. Кольцов, А.В. Шуклинов. Завод. лаб. **71**, 7, 20 (2005).
- [20] Л.Б. Зуев, В.И. Данилов. ЖТФ **75**, 12, 102 (2005).
- [21] А.В. Стрельникова, Л.Б. Зуев, В.И. Данилов. Физ. мезомеханика **9**, 87 (2006).
- [22] А.И. Шибков, А.Е. Золотов, М.А. Желтов. ФТТ **52**, 2223 (2010).
- [23] А.А. Шибков, А.Е. Золотов, Д.В. Михлик, М.А. Желтов, А.В. Шуклинов. Деформация и разрушение материалов **9**, 22 (2009).
- [24] Ж. Фридель. Дислокации. Мир, М. (1967). 643 с.
- [25] М.В. Маркушев, М.Ю. Мурашкин. ФММ **92**, 1, 90 (2001).
- [26] М.В. Маркушев, М.Ю. Мурашкин. ФММ **92**, 2, 116 (2004).