

Влияние геометрических концентраторов напряжения на полосообразование и прерывистую деформацию алюминий-магниевого сплава

© А.А. Шибков, А.Е. Золотов, М.А. Желтов, А.А. Денисов, М.Ф. Гасанов, С.С. Кочегаров

Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, 392000 Тамбов, Россия
e-mail: shibkov@tsu.tmb.ru

(Поступило в Редакцию 12 августа 2015 г.)

С использованием метода скоростной видеосъемки распространяющихся деформационных полос исследовали влияние отверстий на полосообразование и прерывистую деформацию плоских образцов алюминий-магниевого сплава АМг5 и АМг6. Установлено, что концентрация упругого поля вблизи отверстия вызывает раннее зарождение полос макролокализованной деформации и уменьшает критическую деформацию появления первого деформационного скачка. Выявлены различия пространственно-временных картин деформационных полос вблизи отверстий в различных режимах деформирования.

Введение

Неустойчивая пластическая деформация металлов и сплавов на макроскопическом уровне проявляется в виде зуба текучести, образовании шейки перед разрывом и прерывистой деформации. Последняя выражается в форме повторяющихся ступеней на кривых растяжения с заданной скоростью роста напряжения $\dot{\sigma}_0 = \text{const}$ (эффект Савара–Массона [1]) и скачков нагрузки на кривых деформирования с постоянной скоростью $\dot{\epsilon}_0 = \text{const}$ (эффект Портевена–Ле Шателье (ПЛШ) [2]), а также в условиях ползучести $\sigma_0 = \text{const}$ („лестничная“ ползучесть [3]). Во всех случаях прерывистая деформация возникает в результате спонтанной автолокализации пластической деформации в статических или распространяющихся полосах деформации [4,5]. Прерывистое течение демонстрируют многие металлы и сплавы при комнатной и повышенных температурах [6]. Наибольшее количество публикаций по прерывистой деформации относится к алюминий-магниевым сплавам с содержанием магния от 3 до 6%, которые проявляют при комнатной температуре эффект ПЛШ [7–10], эффект Савара–Массона [11,12] и прерывистую ползучесть [13,14]. Полосы макролокализованной деформации, сопровождающие скачки деформации и/или напряжения, ухудшают качество поверхности промышленных изделий, вызывают их преждевременную коррозию и увеличивают вероятность внезапного разрушения [9]. Исследования прерывистой деформации ограничены, как правило, использованием плоских или реже цилиндрических образцов. Роль геометрии образца, наличие угловых концентраторов напряжения, отверстий, щелей и т.д. и их влияние на эффекты ПЛШ и Савара–Массона ранее не исследовались.

В настоящей работе экспериментально исследуется влияние геометрических концентраторов напряжения на полосообразование и прерывистую деформацию алюминий-магниевого сплава. В качестве концентраторов напряжения использовали небольшие отверстия, расположенные на оси растяжения плоского образца.

1. Методика

Материалами исследования служили промышленные сплавы АМг5 (Al-5.35 wt% Mg-0.41 wt% Mn) и АМг6 (Al-6.03 wt% Mg-0.5 wt% Mn), применяемые при производстве летательных аппаратов и автомобилей. Образцы, вырезанные из холоднокатаного листа, имели форму двухсторонних лопаток с размерами рабочей части $6 \times 3 \times 0.5 \text{ mm}$ с центральным круговым отверстием, диаметр которого варьировали от 0.4 до 1 mm. Серия образцов имела по два одинаковых отверстия на оси растяжения. Образцы отжигали в течение 1 h при температуре 450°C и закачивали на воздухе. После термообработки размер зерна составил $10\text{--}12 \mu\text{m}$. Использовали два режима деформирования: 1) в жесткой испытательной машине Instron 3344 со скоростью $\dot{\epsilon}_0 = 3 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ и 2) в мягкой машине, описанной в [15], со скоростью нагружения $\dot{\sigma}_0 = 0.2 \text{ MPa/s}$. Оптический in situ мониторинг деформационных полос и трещин проводили с помощью скоростной цифровой видеокамеры VS-FAST/G6 (НПО „Видеоскан“) со скоростью 500 frames/s. Обработка видеопленки состояла в вычитании помощью компьютерной программы последовательных изображений видеопленки [16]. В ряде экспериментов использовали видеосъемку с помощью двух зеркал для синхронной записи изображений противоположных фронтальных поверхностей плоского образца. Детали методики подробно описаны в [17].

2. Результаты и обсуждение

2.1. Эволюция распределений напряжений и деформаций вблизи отверстия

Рассмотрим сначала исходные, т.е. до развития пластических неустойчивостей, распределения полей напряжений и деформаций вблизи отверстия. Для кругового отверстия в пластине пространственное распределение этих полей хорошо известно из литературы [18–20].

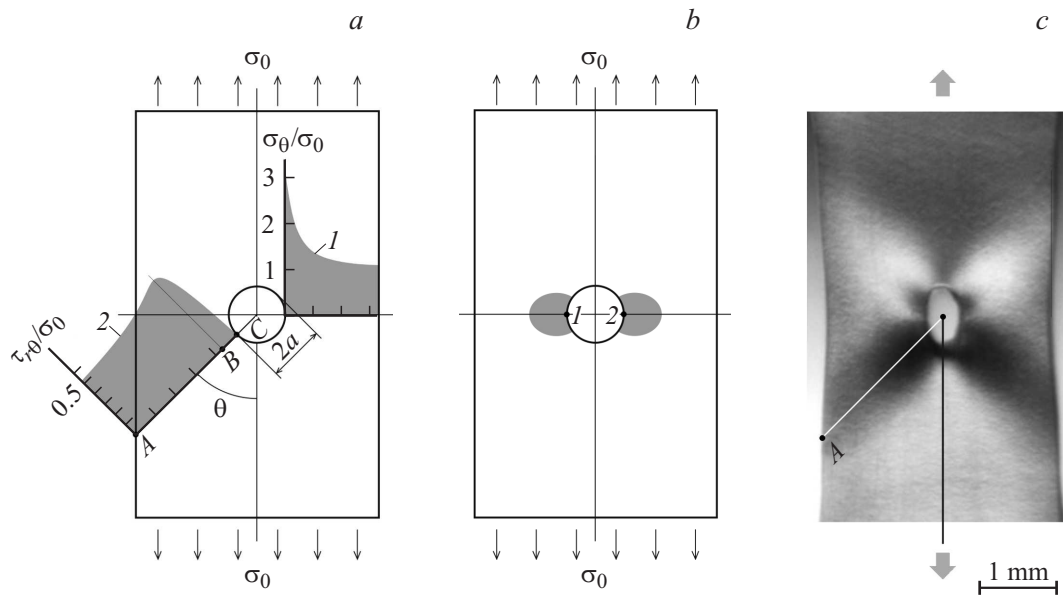


Рис. 1. Распределение напряжений и деформаций при одноосном растяжении пластины в отсутствие полос макролокализованной пластической деформации: *a* — распределение нормированных растягивающих (1) и касательных (2) напряжений при $\theta = \pi/2$ и $\theta = \pi/4$ соответственно; *b* — пластические зоны вблизи отверстия, стартующие из диаметрально противоположных точек 1 и 2; *c* — внешний вид растягиваемого образца сплава АМг5 за 0.5 с до развития деформационной полосы (данные видеосъемки). Точка А на рис. 1, *a* и *c* — наивероятная позиция зарождения первых деформационных полос; σ_0 — приложенное растягивающее напряжение.

В случае одноосного растяжения пластины с небольшим круговым отверстием, диаметр которого значительно меньше размеров пластины, распределения упругих напряжений в полярных координатах имеют вид [20]

$$\sigma_r = \frac{\sigma_0}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + \frac{\sigma_0}{2} \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} - \frac{4a^2}{r^2} \right) \cos 2\theta, \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_0}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - \frac{\sigma_0}{2} \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta, \quad (2)$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{\sigma_0}{2} \left(1 - \frac{3a^4}{r^4} + \frac{2a^2}{r^2} \right) \sin 2\theta, \quad (3)$$

где σ_0 — приложенное напряжение, a — радиус отверстия, r — расстояние от центра отверстия и θ — полярный угол относительно оси растяжения.

Для поперечного сечения, проходящего через центр отверстия и перпендикулярного оси растяжения, $\theta = \pi/2$ касательные напряжения $\tau_{r\theta} = 0$, а растягивающие напряжения $\sigma_\theta = (\sigma_0/2)(2 + a^2/r^2 + 3a^4/r^4)$ максимальны на границе отверстия ($r = a$) $\sigma_{\theta, \max} = 3\sigma_0$ (рис. 1, *a*, кривая 1). Плоскость максимальных касательных напряжений составляют соответственно углы $\pi/4$ и $(3/4)\pi$ с осью растяжения. В этих плоскостях на расстоянии $r = \sqrt{3}a$ от центра отверстия (в точке В на кривой 2) касательное напряжение достигает максимального значения $\tau_{r\theta, \max} = (2/3)\sigma_0$, что в 1.33 больше касательного напряжения в этой плоскости в отсутствие отверстия.

В материалах, не демонстрирующих эффект ПЛШ, пластическая зона вблизи отверстия, согласно приближенным расчетам в [19], начинает развиваться в окрестностях диаметрально противоположных точек 1 и 2 на границе отверстия (рис. 1, *b*), где максимальные растягивающие напряжения σ_θ достигают предела текучести σ_y при растяжении. По мере роста приложенного напряжения σ_0 пластические зоны распространяются в направлении, перпендикулярном к направлению растягивающих усилий, как схематически показано на рис. 1, *b*.

Экспериментальные исследования на плоских образцах сплавов АМг5 и АМг6 с отверстием и без отверстия показывают, что полосы макролокализованной деформации первоначально распространяются в плоскостях, близких к плоскостям максимальных касательных напряжений (рис. 2, *a*). Источниками полос являются, как правило, несовершенства поверхности на ребре плоского образца (царапины, неровности и т.д.). По данным видеосъемки, в образцах с отверстием полосы деформации практически всегда зарождаются в точках пересечения ребер образца с плоскостями максимальных касательных напряжений, выходящих на поверхность отверстия (см., например, точку А на рис. 1, *a* и *c*). На отрезке АВ полоса распространяется в направлении к отверстию в поле растущих касательных напряжений (рис. 1, *a*, кривая 2). Полоса деформации ПЛШ, как известно [12], представляет собой макроскопический механический заряд, так как содержит избыток дислокаций одного механического знака и является источником дальнедействующих упругих напряжений, которые иска-

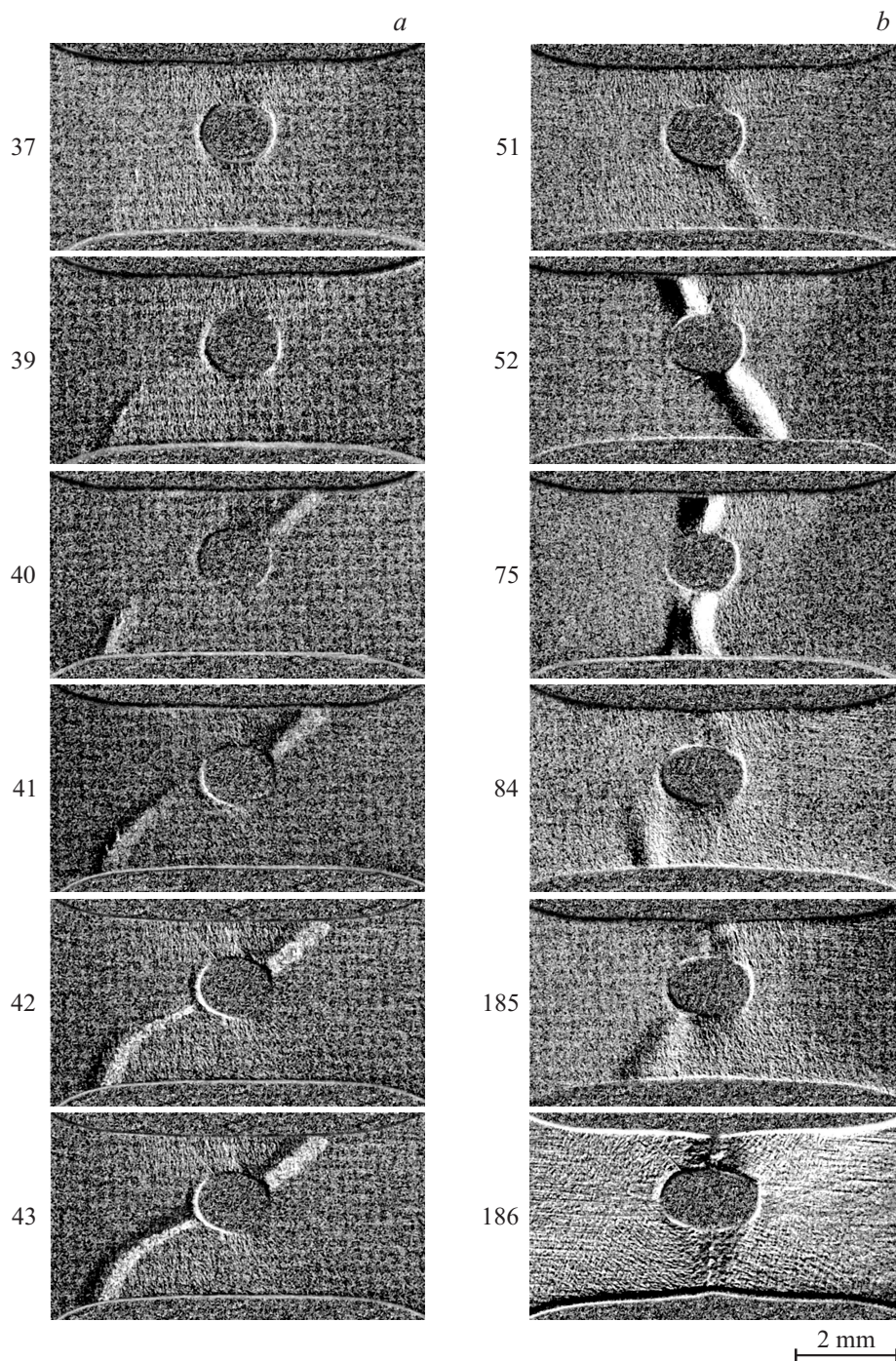


Рис. 2. Данные компьютерной обработки цифровых изображений эволюции деформационных полос в плоском образце сплава АМг5, деформируемого в жесткой испытательной машине со скоростью $\dot{\epsilon}_0 = 3 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$: *a* — зарождение и развитие первых деформационных полос, *b* — зарождение и развитие полос на последних скачках деформации; на кадре 186 показан образец с магистральной трещиной.

жают исходные (до зарождения полосы) распределения напряжений и на поверхности отверстия касательные напряжения уже не будут равны нулю. В то же время на головную группу дислокаций в полосе будут действовать внутренние напряжения со стороны дислокационного ансамбля с избытком дислокаций одного механического знака, что позволит полосе „прострелить“ отрезок *BC* в направлении к отверстию.

В точках, эквивалентных точке *B* (рис. 1, *a*), где касательные напряжения достигают максимального значения $2/3\sigma_0$, зарождение полос практически не наблюдается. Коэффициенты концентрации касательных напряжений в точке *A* (и сопряженных ей) на ребре $k_{\tau A} = \tau_{r\theta}(r_A, 45^\circ)/(\sigma_0/2)$ для образцов размерами $6 \times 3 \times 0.5 \text{ mm}$ с отверстиями диаметром 0.5, 0.7 и 1.0 mm, рассчитанные с помощью пакета программ

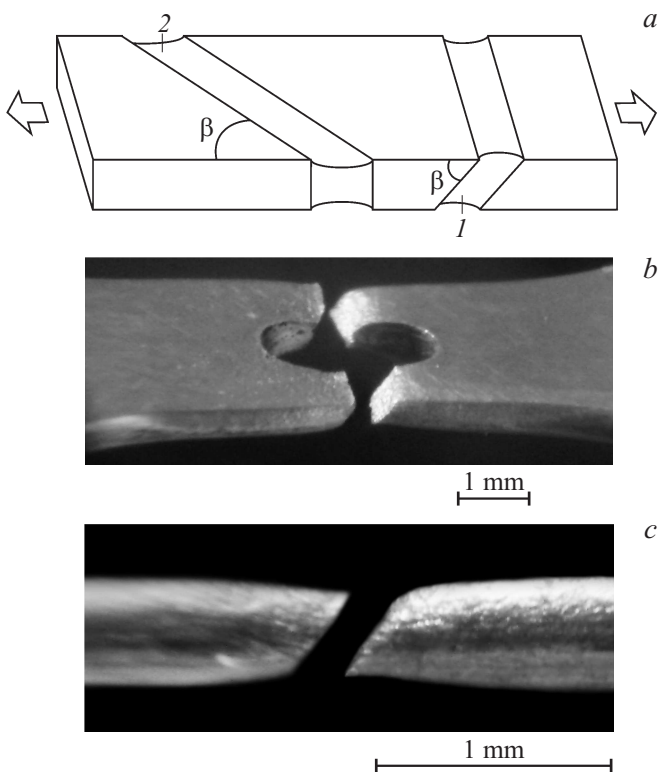


Рис. 3. Геометрия деформационных полос и магистральной трещины: *a* — схематическое изображение полос 1 и 2 типа [22], *b* и *c* — разные проекции разрушенного образца с отверстием; средний угол наклона поверхности разрушения к оси растяжения около 50° .

Comsol Microphysics 5.0, составили 1.06, 1.11 и 1.22. Соответственно с увеличением диаметра отверстия возрастает вероятность зарождения в этих точках на ребре образца деформационных полос и их последующего „притяжения“ к отверстию. В результате пластическая деформация автолокализуется в полосах, которые распространяются в центральной части образца с приближительными размерами 3×3 mm (рис. 2). Полосы макролокализованной деформации уменьшают, таким образом, эффективную длину образца за счет их притяжения к центральному отверстию; остальная часть образца не демонстрирует неустойчивую деформацию и „выполняет роль“ захватов деформационной машины.

С ростом приложенного напряжения при деформациях $\varepsilon \geq 5\%$ угол наклона деформационных полос относительно оси растяжения приближается к $55\text{--}60^\circ\text{C}$ (рис. 2, *b*), т.е. становятся ближе к направлению максимальных касательных напряжений в случае плоской пластической деформации изотропного твердого тела, составляющего угол $55^\circ 44'$ с осью растяжения [21]. Происходит дальнейшее сокращение области неустойчивой пластической деформации вблизи отверстия. С ростом приложенного напряжения возрастает скорость головной группы дислокаций полосы и при высоких напряжениях временного разрешения используемого ме-

тода мониторинга полос (2 ms) оказывается недостаточным для определения направления распространения полосы и, следовательно, позиции ее зарождения на ребре образца или на поверхности отверстия. Ясно, что поверхностные ступеньки, образованные при выходе полосы на поверхность отверстия, могут в дальнейшем служить источниками типа концентраторов напряжения для зарождения новых полос деформации, которые будут распространяться в противоположном направлении, т.е. от отверстия.

Отметим, что в плоских образцах полосы ПЛШ представляют собой бегающие или статические шейки двух типов (рис. 3, *a*): полосы, пересекающие под углом β к оси растяжения узкую грань образца, а под прямым углом — широкую грань (тип 1), и полосы, пересекающие под углом β к оси растяжения широкую грань, а под прямым углом — узкую (тип 2) [22]. Эксперимент показывает, что $\beta \approx 50\text{--}60^\circ$, что указывает на преимущественно сдвиговую моду деформации в полосах ПЛШ. В образцах с отверстием с ростом приложенного напряжения можно наблюдать морфологические переходы между полосами обоих типов, которые выглядят как осцилляции одной полосы в угловом секторе $\pm 30^\circ$ относительно центрального сечения, перпендикулярного оси растяжения (рис. 2, *b*, кадры 52, 75, 185). Разрыв образца происходит по остановившейся полосе 1-го типа; соответственно магистральная трещина является трещиной поперечного сдвига (рис. 3, *b* и 3, *c*), о чем свидетельствует поверхность излома, составляющая в среднем угол около 50° к фронтальной поверхности образца (рис. 3, *c*).

2.2. Влияние отверстия на прерывистую деформацию ПЛШ

На рис. 4, *a* представлены типичные кривые деформации образцов в жесткой испытательной машине сплава АМг5 без отверстия (кривая 1) и с отверстием диаметром 0.5 mm (кривая 2) в координатах $\sigma_0 - \Delta l$, где $\sigma_0 = F/S_0$ — инженерное напряжение без учета отверстия, F — приложенная сила, а $S_0 = w\delta$ — исходное сечение образца, Δl — удлинение образца, w , δ — ширина и толщина образца соответственно. Кривая 2' представляет собой кривую деформации образца с отверстием, перестроенную в координатах $\sigma'_0 - \Delta l$, где $\sigma'_0 = F/S'_0$ — приведенное напряжение, а $S'_0 = (w - 2a)\delta$ — приведенное начальное центральное сечение образца. Как видно из рисунка, наличие отверстия не оказывает заметного влияния на предел прочности (напряжение разрыва образца), но существенно, почти вдвое, сокращает удлинение при разрыве. Последнее, видимо, следует отнести к уменьшению эффективной длины рабочей части образца за счет „притяжения“ к отверстию зоны интенсивной пластической деформации, реализуемой полосами макролокализованной деформации.

Наиболее существенно влияние отверстия на прерывистую деформацию состоит в значительном уменьше-

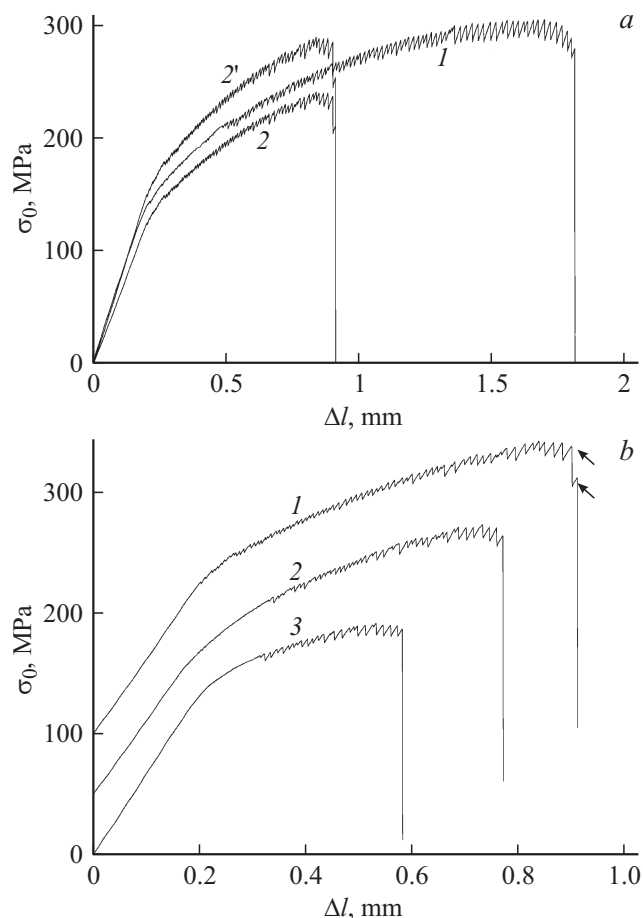


Рис. 4. Прерывистые кривые растяжения с постоянной скоростью $\dot{\varepsilon}_0 = 3 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ в жесткой испытательной машине плоских образцов сплава АМг5 с круговыми отверстиями разных диаметров: *a* — кривые растяжения образца без отверстия (*1*) и с отверстием (*2*) диаметром 0.5 mm в координатах $\sigma_0 - \Delta l$ (σ_0 — инженерное напряжение, Δl — удлинение). Кривая *2'* построена в координатах $\sigma'_0 - \Delta l$, где σ'_0 — приведенное напряжение (см. текст); *b* — сравнение прерывистых кривых растяжения в координатах $\sigma_0 - \Delta l$ образцов с отверстиями диаметрами: *1* — 0.5, *2* — 0.7 и *3* — 1.0 mm. Стрелками отмечены два последних скачка, соответствующих разрушению узкой, а затем широкой части центрального сечения образца с несимметричным отверстием.

нии критической пластической деформации ε_c появления первого скачка напряжения, которое обусловлено более ранним зарождением деформационных полос в точках с повышенным коэффициентом концентрации касательных напряжений, зависящим от диаметра отверстия. Для отверстий диаметрами 0.5 и 0.7 mm небольшие повторяющиеся скачки напряжения начинаются в начале параболического упрочнения, т.е. на стадии III (рис. 4, *b*, кривые *1* и *2*). Их средняя амплитуда оставляет около 1% ($\overline{\Delta\sigma} \approx 3 \text{ MPa}$), а по своему характеру эти скачки напряжения похожи на скачки ПЛШ типа *B* [4]. С ростом деформации они сменяются на повторяющиеся скачки напряжения типа *C* амплитудой

3–5% ($\Delta\sigma \approx 10\text{--}15 \text{ MPa}$) от уровня деформирующего напряжения. Для отверстия диаметром 1.0 mm скачки типа *B* отсутствуют, прерывистая кривая характеризуется только скачками типа *C* амплитудой до 15 MPa (рис. 4, *b*, кривая *3*).

Данные видеосъемки показывают, что на фронте „скачка *B*-типа“ зарождается и распространяется незавершенная полоса деформации (т.е. не пересекающая все сечение образца) от точки на ребре плоского образца до отверстия (рис. 2, *a*, кадр 39), а на фронте скачка напряжения *C*-типа распространяются две полосы с противоположных ребер образца в направлении к отверстию (рис. 2, *b*, кадры 51, 52), которые реализуют сдвиг одной части образца относительно другой по всему сечению. Разрушение образца происходит на фронте последнего скачка напряжения в области центрального сечения образца по полосе *1*-го типа. Для несимметричных отверстий характерно разрушение в два последовательных события, отраженных на кривой деформации (см. скачки напряжения, отмеченные стрелками на рис. 4, *b*, кривая *1*): сначала разрыв происходит по деформационной полосе в узкой части образца (рис. 2, *b*, кадр 185), затем происходит разрушение широкой части центрального сечения образца (рис. 2, *b*, кадр 186).

3. Влияние отверстий на полосообразование и ступенчатую деформацию в мягком режиме нагружения

Более сложная картина эволюции деформационных полос сопровождает ступени на кривой растяжения с постоянной скоростью роста напряжения в мягкой деформационной машине сплавов АМг5 и АМг6. В отличие от деформирования в жесткой машине деформационные полосы имеют тенденцию к ветвлению. Для исследования вопроса, является ли ветвление полос поверхностным явлением или ветвящиеся полосы пронизывают все сечение образца, использовали видеосъемку с двумя зеркалами, позволяющими одновременно наблюдать противоположные фронтальные поверхности плоского образца.

Видеосъемка показывает, что наличие отверстия провоцирует возникновение макроскопического скачка деформации амплитудой несколько процентов за счет зарождения и возникновения вблизи отверстия „розетки“ полос макролокализованной пластической деформации, состоящей из нескольких, до десятка полос (рис. 5). Первая полоса зарождается на ребре плоского образца вблизи центрального сечения и представляет собой полосу *1*-го типа: она распространяется под углом 90° к оси растяжения по внешней широкой грани образца (рис. 5, левая половина кадра 45). На противоположной широкой грани образца след полосы также составляет угол 90° к оси растяжения, смещенный относительно следа полосы на внешней поверхности на 0.5 mm, т.е.

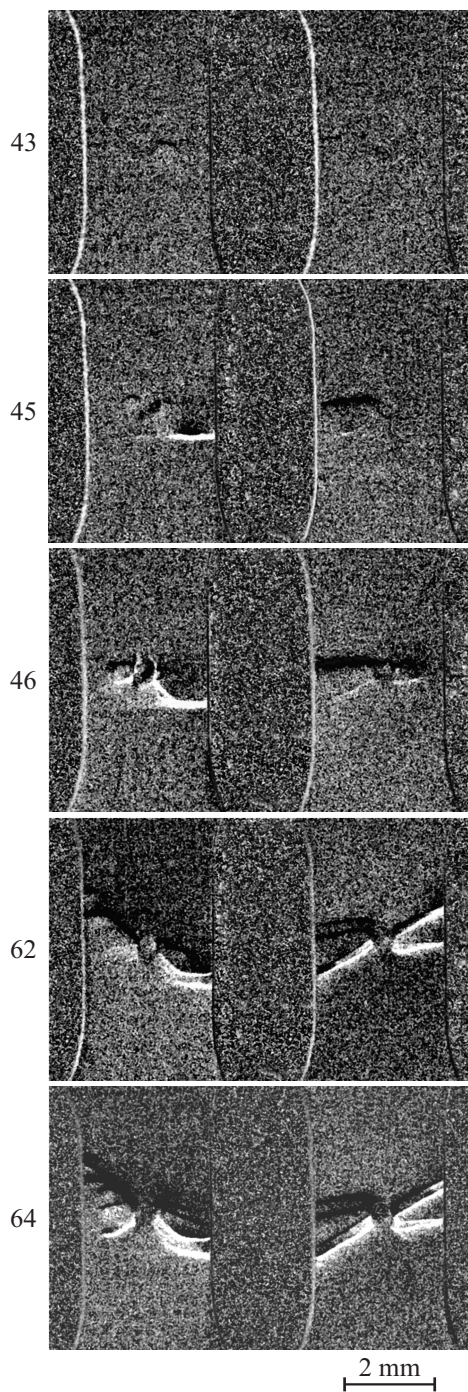


Рис. 5. Данные видеосъемки с двумя зеркалами противоположных фронтальных поверхностей, демонстрирующие зарождение и развитие деформационных полос на фронте первой деформационной ступени при растяжении в мягкой деформационной машине с постоянной скоростью роста приложенного напряжения $\dot{\sigma}_0 = 0.2 \text{ MPa/s}$ плоского образца сплава АМг6 с центральным отверстием диаметром 0.4 mm.

на величину, равную толщине образца (рис. 5, правая половина кадра 45). Это означает, что на узкой грани полоса распространяется под углом около $45^\circ - 50^\circ$ к оси растяжения. По мере приближения к отверстию эта

полоса переходит в полосу 2-го типа, составляющую угол около 60° к оси растяжения на фронтальной поверхности (кадр 46 на рис. 5). Затем формируется совокупность близко расположенных полос, которые образуют розетку в виде „бабочки“, „узлом“ которой является поверхность отверстия (см., например, кадры 62 и 64). Левые и правые кадры изображают форму „бабочки“ на противоположных фронтальных поверхностях плоского образца. Видно, что эти изображения почти зеркально симметричны, что говорит о сквозном характере зоны локализованной деформации, а преобладание наклона „бабочки“ к оси растяжения на угол около $55^\circ - 60^\circ$ свидетельствует о преимущественно сдвиговой моде деформации в этой зоне макролокализованной деформации. Разрушение происходит на последнем скачке пластической деформации; магистральная трещина распространяется по одной из деформационных полос в структуре розетки вблизи отверстия.

В серии экспериментов исследовали пространственно-временную структуру деформационных полос в образце с двумя одинаковыми отверстиями диаметром 0.4 mm, расположенными вдоль оси на различных исходных расстояниях между центрами, составляющих 2, 3 и 6 диаметров отверстия. Если расстояние между отверстиями сопоставимо с диаметром отверстия, оба отверстия приблизительно одинаково притягивают полосы макролокализованной деформации, но между ними полосы не обнаруживаются (рис. 6, a). С ростом расстояния до трех диаметров отверстия пластическая деформация сначала преимущественно локализуется вблизи одного из отверстий, затем в течение очень короткого промежутка времени, около 10 ms, пластическая деформация локализуется у другого отверстия, где и происходит затем разрыв образца. Однако с ростом расстояния между отверстиями до шести диаметров полосы локализованной деформации сначала образуют независимые розетки полос вблизи каждого отверстия, а затем по мере развития деформационного скачка, видимо, за счет взаимодействия полос (притяжения полос с избытком дислокаций противоположных механических знаков) пластическая деформация локализуется посередине между отверстиями в направлении, перпендикулярном оси растяжения (рис. 6, b).

Таким образом, отверстия оказывают существенное влияние на полособразование и прерывистую деформацию плоских образцов сплавов АМг5 и АМг6. Основное влияние отверстий состоит в том, что они являются аттракторами (или источниками) полос макролокализованной деформации. Это приводит к локализации зоны неустойчивой пластической деформации вблизи отверстия и, как следствие, к уменьшению эффективной длины образца: если в отсутствие отверстия полосы с равной вероятностью зарождаются в любых точках на рабочей части образца, то при наличии отверстия зона макроскопически неустойчивой пластической деформации имеет почти квадратную форму со стороной, равной ширине w образца, и определяется зоной действия

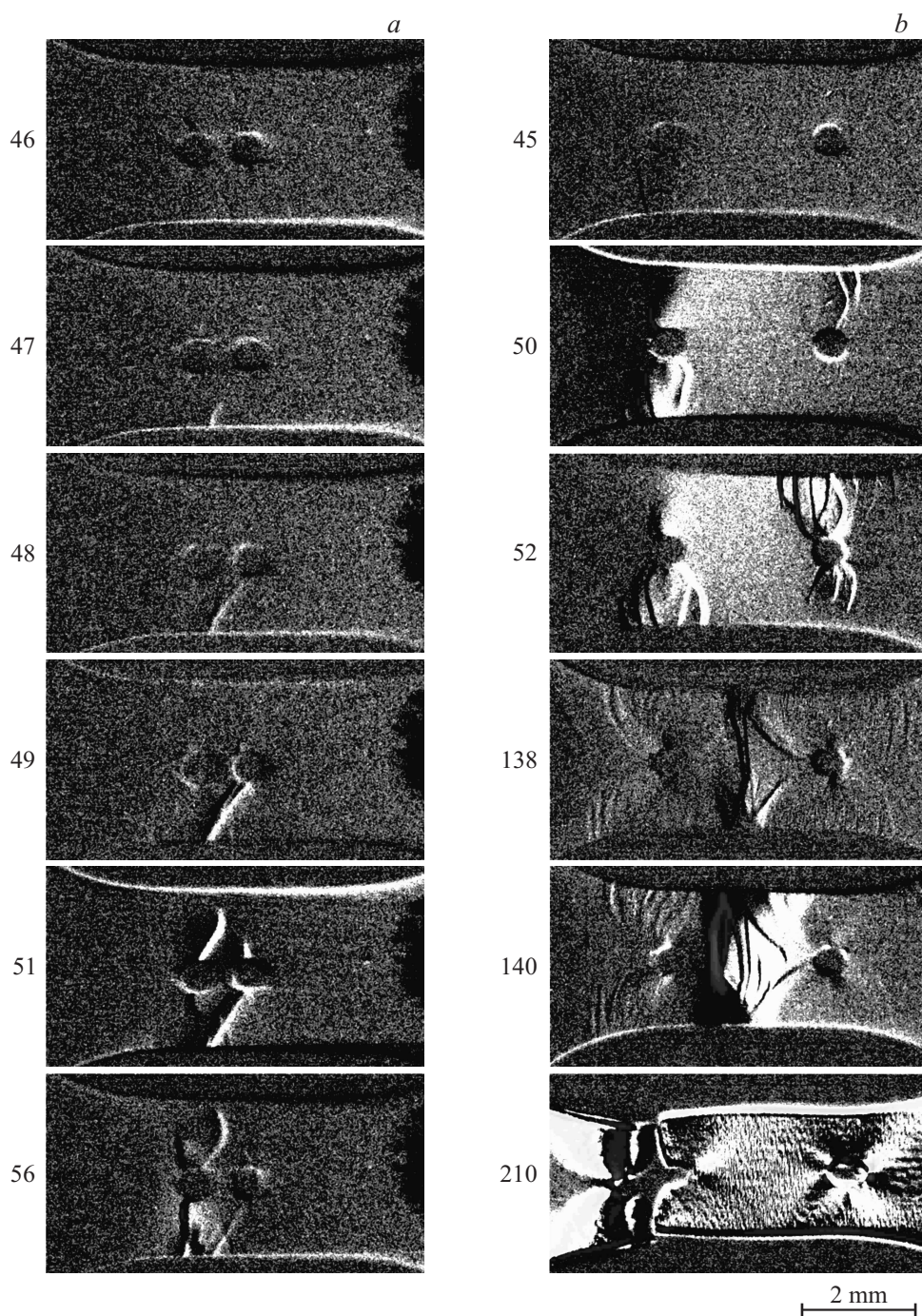


Рис. 6. Развитие пространственно-временной картины деформационных полос в образце сплава АМг6 с двумя отверстиями диаметром 0.4 mm, находящихся на расстоянии: *a* — двух диаметров отверстия, *b* — шести диаметров отверстия вдоль оси растяжения. На кадре 210 зафиксирован момент разрушения образца. $\dot{\sigma}_0 = 0.2$ МПа/с.

повышенных касательных напряжений из-за их концентрации отверстием. Для точной оценки эффективной длины образца с отверстием необходимы дальнейшие исследования. При жестком режиме деформирования, когда задана скорость растяжения $\dot{\epsilon}_0 = \text{const}$, каждому скачку разгрузки на кривой деформации соответствует зарождение одной-двух деформационных полос, в то же время при мягком режиме нагружения с заданной скоро-

стью $\dot{\sigma}_0 = \text{const}$ каждой ступени на кривой нагружения соответствует несколько, до десятка деформационных полос, которые, взаимодействуя, проявляют тенденцию к ветвлению.

В результате возникает сложная картина деформационных полос, которая сильно отличается от классической картины распределения упругих напряжений в пластине с отверстием (отверстиями) в задаче Кир-

ша [18–20]. Полосы деформации, локализующиеся вблизи отверстия, представляют собой зону макроскопически неустойчивой пластической деформации. Для материалов, которые не демонстрируют прерывистой деформации ПЛШ и Савара–Массона, пластическая зона вблизи отверстия рассчитывается обычно в рамках статической задачи при условии, что на границе между упругой и пластической областями напряжения равны пределу текучести материала [19,23]. Для материалов, демонстрирующих эффект ПЛШ, развитие полос деформации рассматривается в рамках существенно нелинейной динамической задачи: для развития пластических неустойчивостей в виде деформационных полос приложенное напряжение должно превышать предел текучести, а скорость деформации должна находиться в области отрицательной скоростной чувствительности S напряжения течения к скорости деформации, т.е. $S = \partial\sigma/\partial(\ln\dot{\epsilon}) < 0$ [24–26]. На микроскопическом структурном уровне отрицательная скоростная чувствительность связана, как предполагается, с динамическим деформационным старением (ДДС) дислокаций [26]. В рамках современных моделей ДДС макропластические неустойчивости развиваются в ситуациях, когда время ожидания τ_w дислокации у препятствия (дислокации леса и/или другие дефекты) оказывается соизмеримым с характерным временем восходящей диффузии τ_d примесных атомов к дислокациям [27]. Такие задачи применительно к росту пластической зоны вблизи концентраторов напряжения: отверстий, щелей, трещин и т.д. ранее не рассматривались. Экспериментальное и аналитическое изучение пространственно-временной локализации пластической деформации вблизи отверстий в материалах, демонстрирующих прерывистую деформацию Портевена–Ле Шателье, представляет в настоящее время нерешенную задачу, требующую дальнейшего исследования.

4. Заключение

В настоящей работе впервые проведены экспериментальные исследования влияния отверстий на прерывистую деформацию и полосообразование плоских образцов на примере алюминиевых сплавов АМг5 и АМг6, демонстрирующих ярко выраженный эффект Портевена–Ле Шателье при комнатной температуре. Основные результаты сводятся к следующему.

1. Небольшое отверстие в центре рабочей части плоского образца, деформируемого одноосным растяжением с постоянной скоростью $\dot{\epsilon}_0 = \text{const}$, является аттрактором полос макролокализованной деформации, эволюция которых вызывает прерывистую деформацию в виде повторяющихся скачков напряжения. Первые полосы деформации зарождаются не на поверхности отверстия, где касательные напряжения равны нулю, а на ребрах плоского образца в точках с максимальным коэффициентом концентрации касательных напряжений. В ре-

зультате эффективная длина образца, где происходит пластическая деформация деформационными полосами, сокращается до значения, сопоставимого с шириной образца.

2. Центральное отверстие существенно уменьшает критическую пластическую деформацию ϵ_c появления первого скачка деформации за счет в основном генерации мелких скачков, амплитудой около 3 МПа, аналогичных скачкам ПЛШ типа *B*, обусловленных развитием незавершенных полос деформации, которые зарождаются на ребре плоского образца и распространяются в сторону отверстия. С ростом приложенного напряжения скачки типа *B* сменяются на более крупные, амплитудой 10–15 МПа, скачки напряжения типа *C*, обусловленные эволюцией завершенных полос деформации, пересекающих все сечение образца и распространяющихся в направлении к отверстию.

3. При растяжении с заданной скоростью роста напряжения $\dot{\sigma}_0 = \text{const}$ характерной особенностью полосообразования является ветвление полос вблизи отверстий. Каждая ступень на кривой деформации сопровождается зарождением и распространением в направлении отверстия нескольких, до десяти, деформационных полос, формирующих сложную пространственную структуру, которая существенно отличается от классического распределения упругих напряжений вблизи отверстия.

4. Выявленные пространственно-временные (диссипативные) структуры неустойчивой пластической деформации, спонтанно генерируемые вблизи отверстий в динамически определенных условиях растяжения, когда заданы силовой закон нагружения ($\dot{\sigma}_0 = \text{const}$) или скорость деформирования ($\dot{\epsilon}_0 = \text{const}$) в сплавах, демонстрирующих эффект Портевена–Ле Шателье, представляют сложную проблему, требующую дальнейшего теоретического и экспериментального изучения.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ, проект № 15-32-20200-мол_а.

Список литературы

- [1] Белл Дж.Ф. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. Ч. 2. М.: Наука. 1984. 432 с.
- [2] Portevin A., Le Chatelier F. // Seances Acad. Sci. 1923. Vol. 176. P. 507–510.
- [3] Klueh R.L. // Mater. Sci. Eng. 1982. Vol. 54. P. 65–80.
- [4] Chihab K., Estrin Y., Kubin L.P., Vergnol J. // Scripta Metall. 1987. Vol. 21. P. 203–208.
- [5] Estrin Y., Kubin L.P. Continuum models for materials with microstructure / Ed. H.-B. Muhlhaus. NY: Wiley & Sons, 1995. P. 395–450.
- [6] Kubin L.P., Fressengeas C., Ananthakrishna G. Dislocations in Solids, Vol. 11 / Eds by F.R.N. Nabarro, J.P. Hirth. Elsevier Science, 2001.
- [7] Klose F.B., Ziegenbein A., Hagemann F., Neuhauser H., Hahner P., Abbadi M., Zeghloul A. // Mater. Sci. Eng. A. 2004. Vol. A369. P. 76–81.

- [8] *Louche H., Vacher P., Arrieux R.* // Mater. Sci. Eng. A. 2005. Vol. 404. P. 188–196.
- [9] *Halim H., Wilkinson D.S., Niewczas M.* // Acta Mater. 2007. Vol. 55. P. 4151–4160.
- [10] *Fu S.H., Zhang Q.C., Hu Q., Gong M., Cao P.T., Liu H.W.* // Sci. China Tech. Sci. 2011. Vol. 54. N 6. P. 1389–1393.
- [11] *Шибков А.А., Желтов М.А., Золотов А.Е., Денисов А.А.* // Кристаллография. 2012. Т. 58. Вып. 1. С. 511–518.
- [12] *Шибков А.А., Золотов А.Е.* // Письма в ЖЭТФ. 2009. Т. 90. Вып. 5. С. 412–417.
- [13] *Шибков А.А., Золотов А.Е., Желтов М.А., Гасанов М.Ф., Денисов А.А.* // ФТТ. 2014. Т. 56. Вып. 5. С. 848–855.
- [14] *Шибков А.А., Золотов А.Е., Желтов М.А., Денисов А.А., Гасанов М.Ф.* // ФТТ. 2014. Т. 84. Вып. 4. С. 40–46.
- [15] *Шибков А.А., Желтов М.А., Лебедкин М.А., Скворцов В.В., Кольцов Р.Ю., Шуклинов А.В.* // Заводская лаборатория. 2005. Т. 71. Вып. 7. С. 20–27.
- [16] *Шибков А.А., Желтов М.А., Кольцов Р.Ю., Шуклинов А.В., Лебедкин М.А.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2006. Т. 70. Вып. 9. С. 1372–1376.
- [17] *Шибков А.А., Золотов А.Е., Желтов М.А.* // ФТТ. 2010. Т. 52. Вып. 11. С. 2223–2231.
- [18] *Kirsch G.* // Zentralblatt Verlin Deutscher Ingenieure. 1898. N 42. P. 797–807.
- [19] *Савин Г.Н.* Распределение напряжений около отверстий. Киев: Наукова думка. 1968. 881 с.
- [20] *Тимошенко С.П., Гудьер Дж.* Теория упругости. М.: Наука, 1979. 560 с.
- [21] *Хилл Р.* Математическая теория пластичности. М.: ГИТТЛ, 1956. 407 с.
- [22] *Криштал М.М.* Взаимосвязь неустойчивости и неоднородности пластической деформации. Дис. д. ф.-м. н: Тольятти, 2002. 331 с.
- [23] *Гришин В.И.* Ученые записки ЦАГИ. 1972. Т. 3. С. 101–106.
- [24] *Penning P.* // Acta Metall. 1972. Vol. 20. P. 1169–1175.
- [25] *Kubin L.P., Estrin Y.* // Acta Metall. Mater. 1990. Vol. 38. P. 697–708.
- [26] *McCormick P.G.* // Acta Metall. 1972. Vol. 20. P. 351–360.
- [27] *McCormick P.G.* // Acta Metall. 1988. Vol. 36. P. 3061–3067.