

РЕАЛЬНАЯ СТРУКТУРА
КРИСТАЛЛОВ

УДК 539.374

МОРФОЛОГИЧЕСКАЯ ДИАГРАММА ПОЛОС
МАКРОЛОКАЛИЗОВАННОЙ ДЕФОРМАЦИИ САВАРА–МАССОНА

© 2012 г. А. А. Шибков, А. Е. Золотов, М. А. Желтов, А. А. Денисов

Тамбовский государственный университет

E-mail: shibkov@tsu.tmb.ru

Поступила в редакцию 05.10.2010 г.

С помощью скоростной видеосъемки проведены исследования *in situ* динамики и морфологии полос макролокализованной деформации Савара–Массона при растяжении с постоянной скоростью возрастания напряжения $\dot{\sigma}_0 = \text{const}$ плоских образцов алюминий–магниевого сплава АМгб. Представлена феноменологическая классификация полос Савара–Массона по морфологическим и кинетическим признакам, которая насчитывает шесть типов полос деформации, сменяющих друг друга по мере роста приложенного напряжения. Впервые получена морфологическая диаграмма полос деформации Савара–Массона, которые существенно отличаются от полос деформации А, В и С при деформировании с постоянной скоростью $\dot{\epsilon}_0 = \text{const}$ в условиях проявления эффекта Портевена–Ле Шателье.

ВВЕДЕНИЕ

Прерывистую пластическую деформацию металлических сплавов обычно связывают с эффектом Портевена–Ле Шателье (ПЛШ) – появлением повторяющихся скачков разгрузки (“зубцов”) на диаграммах растяжения или сжатия с постоянной скоростью $\dot{\epsilon}_0 = \text{const}$ в жесткой испытательной машине [1, 2]. Теории этого эффекта основаны на концепции отрицательной чувствительности деформирующего напряжения к скорости пластической деформации, обусловленной динамическим деформационным старением дислокаций [3–5]. Скачки разгрузки сопровождаются образованием статических или распространяющихся полос деформации. Их классификация была получена в [6] на основе данных видеофильмирования в косом освещении оптически полированной поверхности плоских образцов сплава Al–5% Mg. По мере увеличения скорости деформирования в интервале 10^{-6} – 10^{-3} с⁻¹ различают полосы типа С, которые зарождаются в случайных позициях на поверхности металла, но не распространяются; полосы типа В, распространяющиеся скачками, и непрерывно распространяющиеся полосы типа А. Полосы А и В распространяются в виде уединенных пластических волн с постоянной шириной, приблизительно равной толщине плоского образца.

Другими проявлениями прерывистой деформации являются лестничная ползучесть и эффект Савара–Массона, состоящий в появлении ступеней на кривых нагружения с постоянной скоростью возрастания напряжения $\dot{\sigma}_0 = \text{const}$ в мягкой испытательной машине. Эффекту Савара–Массона посвящено сравнительно небольшое ко-

личество публикаций [2, 7–10], несмотря на то, что он был открыт значительно раньше эффекта Портевена–Ле Шателье. В последнее время возрос интерес к проблеме деформационной устойчивости материалов в условиях мягкого режима нагружения, поскольку он в большей степени, чем жесткий режим, соответствует условиям эксплуатации металлических сплавов систем Al–Mg и Al–Cu, используемых в автомобильной и авиационной технике, когда задается силовой закон воздействия (сила тяги, сила сопротивления, подъемная сила, центробежная сила), а откликом является неустойчивая деформация материала и конструкции.

Динамика полос ПЛШ зависит от амплитуды скачка разгрузки системы машина–образец (отрицательная обратная связь), а в условиях проявления эффекта Савара–Массона фактор разгрузки отсутствует, поэтому пространственно–временная неустойчивость пластической деформации может развиваться по другому сценарию. В [11, 12] высказано утверждение, что полосы макролокализованной деформации при нагружении с постоянной скоростью роста напряжения $\dot{\sigma}_0 = \text{const}$ существенно отличаются от полос ПЛШ типов А, В, С и представляют другой фундаментальный тип пластических неустойчивостей. До настоящего времени морфология, динамика, условия зарождения полос деформации, возникающих в условиях проявления эффекта Савара–Массона, не исследовались. В настоящей работе представлены основные результаты высокоскоростных *in situ* исследований кинетики и морфологии полос деформации Савара–Массона, которые систематизированы по мере роста деформации (напряже-

ния) в виде кинетической морфологической диаграммы.

МЕТОДИКА

Материалом исследования служил промышленный холоднокатаный сплав АМг6. Выбор материала и геометрии образцов определялся следующими обстоятельствами: 1) большинство исследований по кинетике полособразования выполнено на плоских образцах поликристаллических сплавов системы Al–Mg с содержанием магния 5–6%, деформируемых с постоянной скоростью в жесткой испытательной машине, т.е. в условиях проявления эффекта ПЛШ; 2) эти сплавы демонстрируют ярко выраженную прерывистую деформацию при комнатной температуре; 3) классификация полос деформации ПЛШ была впервые получена на основе видеofilmирования поверхности деформируемого сплава Al–5% Mg [6]; 4) алюминий-магниевый сплав АМг6 широко используют при производстве летательных аппаратов и автомобилей, а полосы деформации вызывают технологический брак и преждевременное разрушение сплава.

Образцы промышленного сплава АМг6 (Mg – 5.92, Mn – 0.61, Fe – 0.27, Si – 0.14 мас. %) в виде двухсторонних лопаток с размерами рабочей части $6 \times 3 \times 1.2$ мм вырезали из холоднокатаного листа и деформировали одноосным растяжением при комнатной температуре после часового отжига при 723 К и закалки. Деформирование проводили с постоянной скоростью возрастания напряжения ($\dot{\sigma}_0 = 0.2$ МПа/с), т.е. в условиях проявления эффекта Савара–Массона в мягкой деформационной машине, описанной в [13]. Для *in situ* исследования динамики полос деформации использовалась скоростная цифровая видеокамера VS-FAST/G6 НПК Видеоскан. Для регистрации полос деформации поле зрения видеокамеры выбиралось 10×10 мм, что при скорости съемки 500 кадров/с и формате изображения 1204×1280 пикселей соответствует разрешению около 8 мкм/пиксель, т.е. размер пикселя приблизительно равен среднему размеру зерна $\bar{d} \approx 10$ мкм. Обработка видеofilmа состояла в вычитании с помощью компьютерной программы последовательных кадров видеofilmа. При таком методе обработки изображений выделяются контуры распространяющихся полос деформации.

Используемый метод регистрации и исследования деформационных полос является продолжением теневого метода Чайхэба и др. (Chihab K. et al. [6]), который модифицирован в двух основных аспектах: существенное увеличение быстродействия (скоростная видеосъемка со скоростью до 500 кадров/с); оригинальная компьютерная программа обработки видеоматериала, позволя-

ющая регистрировать и изучать полосы деформации не только на начальной стадии развития деформационной неустойчивости, как в [6], но и при больших степенях деформации, когда поверхность металла теряет оптическую гладкость. Последнее дает возможность выявить экспериментально с достаточным быстродействием и пространственным разрешением роль распространяющихся полос деформации в формировании шейки, а также в мезо- и макрокопических механизмах вязкого разрушения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Феноменологическая классификация полос деформации Савара–Массона. Первый скачок деформации сопровождается, как известно, зарождением и распространением полосы Людерса независимо от режима испытания, жесткого или мягкого [14]. В условиях жесткого режима деформирования с постоянной скоростью $\dot{\epsilon}_0 = \text{const}$ фронт полосы Людерса составляет обычно угол 48° – 50° к оси растяжения [15]. При мягком режиме нагружения с постоянным темпом возрастания напряжения $\dot{\sigma}_0 = \text{const}$ скоростная видеосъемка позволяет выявить множественные процессы ветвления узких полос локализованной деформации в структуре фронта Людерса. Из данных скоростной видеосъемки и компьютерной обработки изображений следует, что динамика полосы Людерса состоит из двух стадий роста: докритической и закритической [16]. На докритической стадии на полированной поверхности металла наблюдаются медленно растущие со скоростью ~ 10 – 100 мкм/с (рис. 1а) полосы почти треугольной формы в направлении, перпендикулярном оси растяжения. На закритической стадии по одной из границ этих полос стартует очень узкая, шириной порядка размера зерна (~ 10 – 30 мкм) полоса локализованной деформации, которая со скоростью ~ 0.3 – 1 м/с пересекает сечение образца (рис. 1б, кадры 1–3) и является триггером развития первой ступени амплитудой около 0.5% на диаграмме растяжения.

Дальнейшая эволюция полосы Людерса происходит на фронте первой ступени длительно со скоростью обычно 0.3–0.5 с и характеризуется множественными процессами ветвления. В результате формируется дендритоподобная структура полосы Людерса, огибающая которой распространяется вдоль оси образца со скоростью около ~ 1 см/с. Отметим, что закритическая стадия развития полосы Людерса сопровождается генерированием характерного сигнала акустической эмиссии, форма которого отражает основные детали этого процесса [16].

После распространения полосы Людерса поверхность сплава теряет зеркальный блеск и ста-

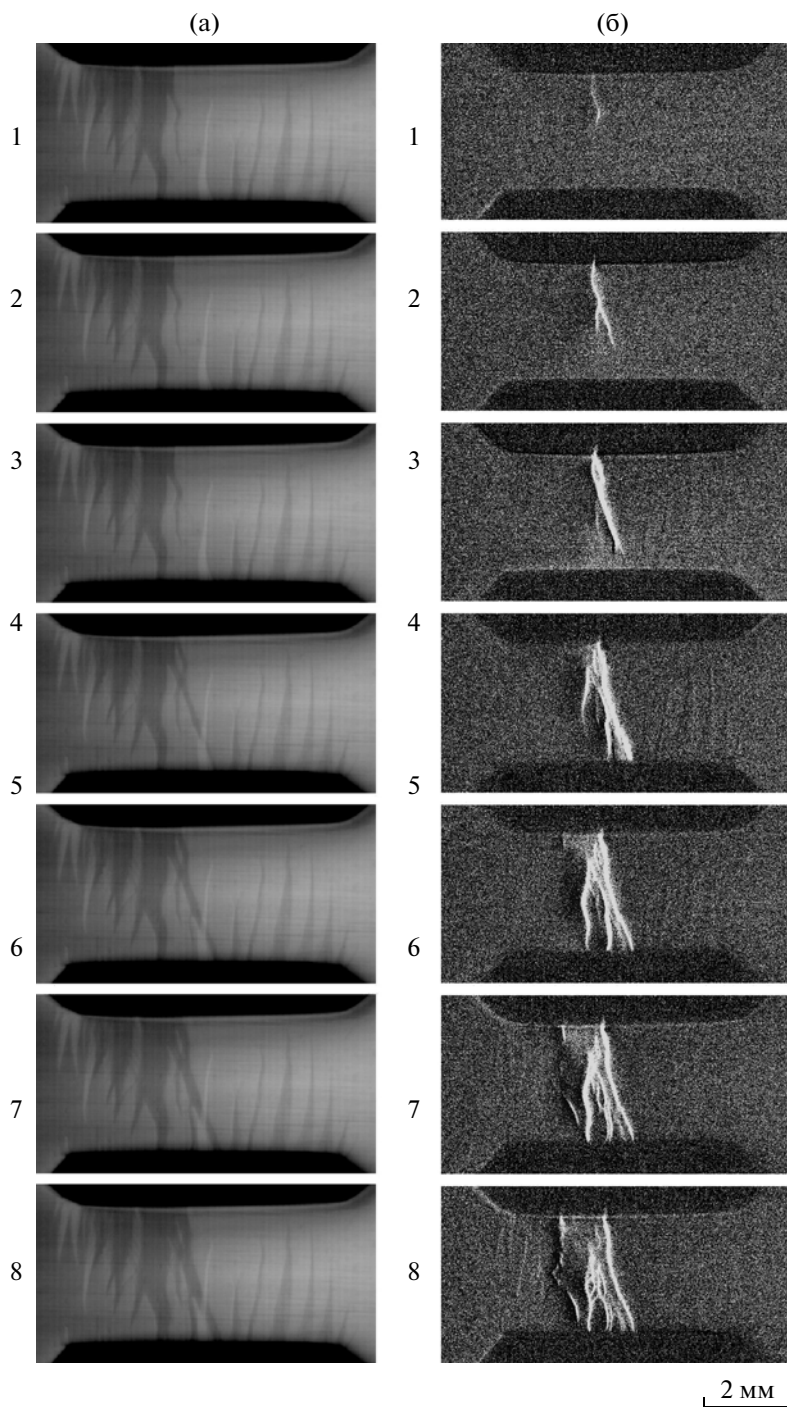


Рис. 1. Разветвленные структуры полосы Людерса на первом скачке деформации отожженного сплава АМг6 (а) и результаты программного вычитания цифровых изображений (б). Скорость видеосъемки 500 кадров/с. Цифры – номера кадров.

новится матовой. Микроскопические исследования показывают, что на этой стадии в зернах образуются линии скольжения. Полосы Людерса отличаются от полос макролокализованной деформации, образующихся при более высоких деформациях, и для феноменологической класси-

фикации будем называть их полосами I типа (рис. 2а).

С ростом приложенного напряжения и соответственно амплитуды скачков деформации до 1–1.5% на поверхности образуются короткоживущие возмущения рельефа в виде искривленных

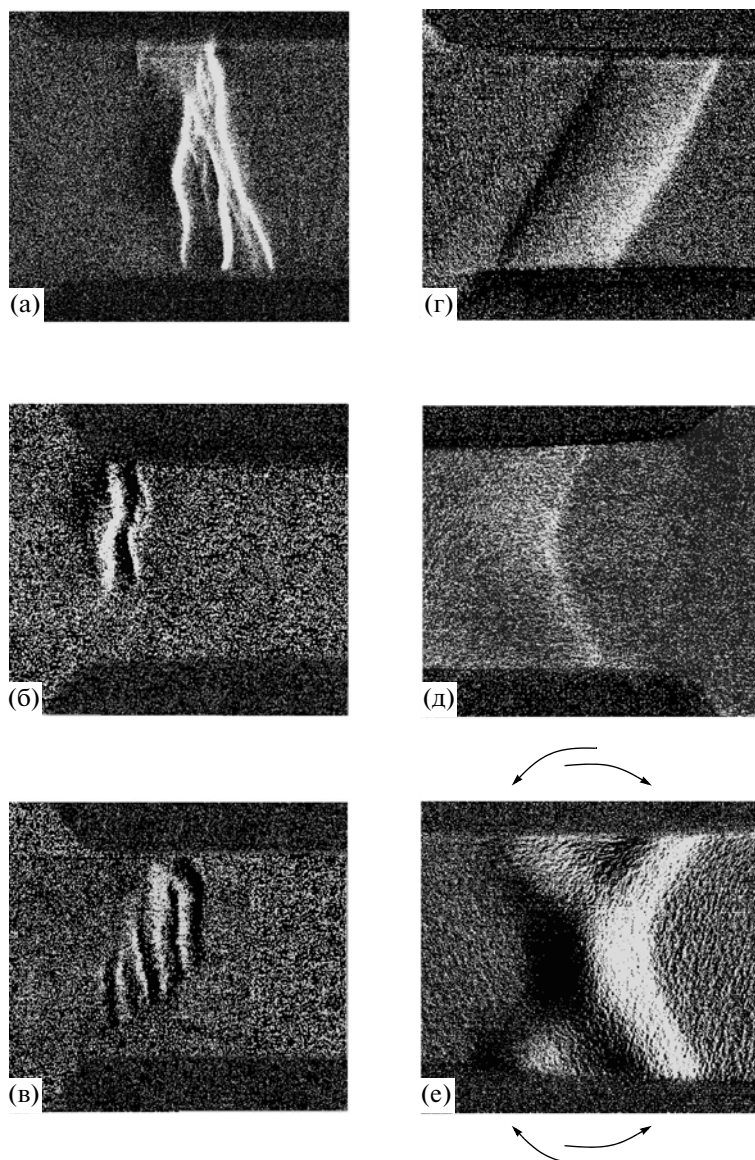


Рис. 2. Морфологические типы полос деформации Савара–Массона: а – полоса I типа (полоса Людерса); полосы II (б); III (в); IV (г); V (д); е – осциллирующая полоса в ходе образования шейки – полоса VI типа.

складок и веток, которые также распространяются преимущественно в направлении, перпендикулярном оси растяжения (полосы II типа) (рис. 2б). В отличие от полос I типа, которые могут быть как динамичными, так и статичными, полосы II типа зарождаются, непрерывно находятся в движении и исчезают. Полосы II типа образуют короткоживущие субструктуры, разветвленные или состоящие из почти параллельных полос-складок (рис. 2в). С ростом напряжения разветвленные субструктуры исчезают, уступая субструктуре параллельных складок II типа. Такая субструктура – полоса III типа – типична для сравнительно небольших деформационных скачков амплитудой $\sim 1\text{--}2\%$. Огибающая этой субструктуры составляет угол ($55^\circ\text{--}60^\circ$) с осью рас-

тяжения. При увеличении напряжения растет концентрация мезоскладок (полос II типа) в этой структуре (полосе III типа) и возникает полоса в виде параллелограмма с тем же углом $55^\circ\text{--}60^\circ$ к оси растяжения – полоса IV типа (рис. 2г). Видимо, полосы IV типа являются “завершенными” полосами III типа, они не проявляют внутренней субструктуры на оптическом уровне.

Полосы IV типа характерны для скачков амплитудой более $2\text{--}3\%$. Они зарождаются преимущественно на концентраторах напряжения на ребре кристалла и определяются скоростью вершины v_t ($\approx 0.3\text{--}10$ м/с) и скоростью бокового роста v_s ($\approx 1\text{--}10^2$ мм/с). Они также могут зародиться на границах полос IV типа. Вне зависимости от меха-

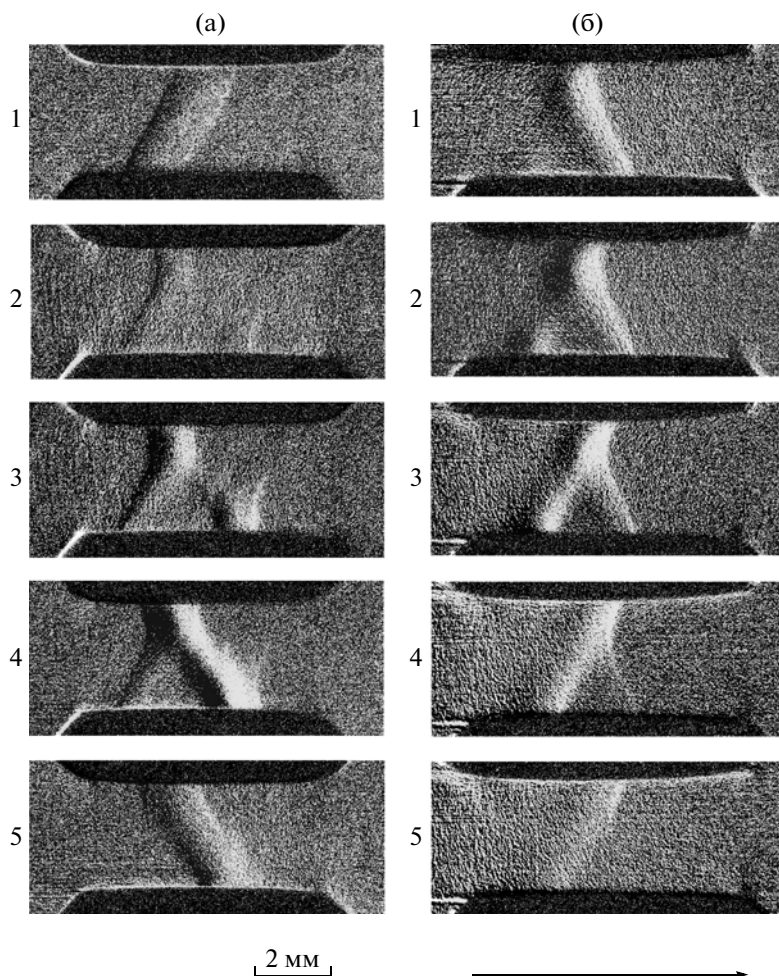


Рис. 3. Примеры кинетики смены угла полосы относительно оси растяжения: а – *N*-образный; б – Λ -образный. Стрелкой отмечена ось растяжения.

низма зарождения после достижения противоположной границы кристалла полосы IV типа далее расширяются со скоростью v_s . В течение ~ 0.1 с скорость расширения падает более чем на порядок. Каждая граница расширяющейся полосы затем порождает вторичные полосы IV типа, которые, расширяясь, порождают полосы третьего поколения и т.д. Таким образом, полосы IV типа размножаются по каскадному механизму. Более подробно этот процесс описан в [17].

На фронте крупных скачков деформации амплитудой 6–10% и выше типичны процессы ступенчатого распространения полос IV типа с изменением угла границы полосы к оси растяжения в интервале от $\sim(55-60)^\circ$ до $\sim(120-125)^\circ$. Движущей силой смены знака угла полосы является релаксация изгибающего момента, создаваемого зарождением и распространением полос деформации IV типа. Подсчеты количества сопряженных полос на фронте всех исследованных

скачков показывает их приблизительное равенство. Варианты смены угла могут быть различными.

На рис. 3а демонстрируется ситуация, когда незавершенная полоса IV типа запускает своим упругим полем источник вторичной (сопряженной) полосы на противоположной боковой поверхности образца. В некоторой фазе взаимодействия полос их структура имеет *N*-образную форму (кадр 3). В результате такого взаимодействия происходит смена угла полосы относительно оси растяжения (кадры 1 и 5). На рис. 3б представлен случай, когда источник вторичной полосы находится в области выхода первичной полосы на боковую грань образца. В результате структура сопряженных полос приобретает форму буквы Λ (кадр 2).

Для последнего скачка деформации, который предшествует развитию магистральной трещины, характерно образование полосы деформации с границей в виде ломаной линии с углами около 55° и 125° соответственно (рис. 2д). Полосы с та-

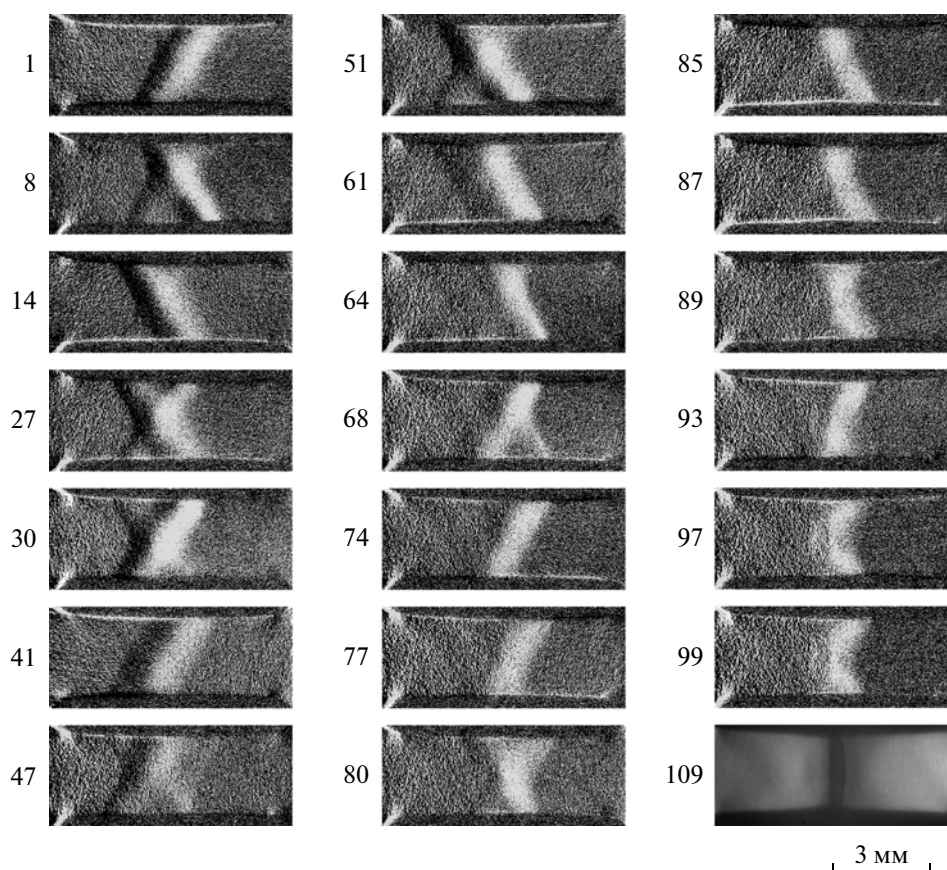


Рис. 4. Осцилляции угла полосы деформации и образование шейки перед разрывом сплава АМг6. Скорость видеосъемки 500 кадров/с.

кой формой границы – полосы V типа – возникают, как правило, на одном и том же участке поверхности образца, в котором затем развивается шейка и происходит разрыв образца. Они являются предвестниками разрушения и их изучение особенно важно для понимания механизма вязкого разрушения и следовательно прочности материалов, демонстрирующих скачкообразную деформацию. Наконец, перед разрывом образца в течение 100–200 мс образуется шейка за счет формирования осциллирующей полосы с неподвижным центром тяжести, угол границы которой совершает колебания в секторе $\sim(55\text{--}125)^\circ$ с периодом 10–20 мс – полоса VI типа (рис. 2е).

Более детально динамика формирования шейки на фронтальной поверхности плоского образца (на грани 3×1.2 мм) представлена на рис. 4. Как видно, на этой стадии поступательное перемещение границ полосы в виде наклонной расширяющейся шейки (полосы типа IV) сменяется на осциллирующее движение макролокализованной полосы постоянной ширины, равной приблизительно толщине образца, относительно сечения, через которое пройдет магистральная трещина. Осцилляции угла полосы происходят за

счет повторяющегося процесса смены угла полосы. По мере приближения к разрыву образца угол полосы возрастает и за ~ 10 мс до старта магистральной трещины полоса ориентируется почти перпендикулярно оси растяжения (рис. 4, кадры 93–99).

Таким образом, приведенная классификация полос деформации Савара–Массона по их морфологическим и кинетическим характеристикам существенно отличается от классификации полос Портевена–Ле Шателье (полосы A, B и C) и представляет другие типы неустойчивостей пластического течения, которые проявляются в условиях деформирования с постоянной скоростью возрастания нагрузки в мягкой испытательной машине. Следует отметить, что представленные типы деформационных полос Савара–Массона характерны для промышленных алюминий–магниевого сплавов АМг3, АМг5, АМг6 с содержанием Mg от 3 до 6% соответственно. Вследствие более высокого содержания Mg в сплаве АМг6 и, следовательно, более широкого диапазона приложенного напряжения полосы деформации в этом сплаве выявляются более отчетливо по сравнению с другими сплавами системы Al–Mg.

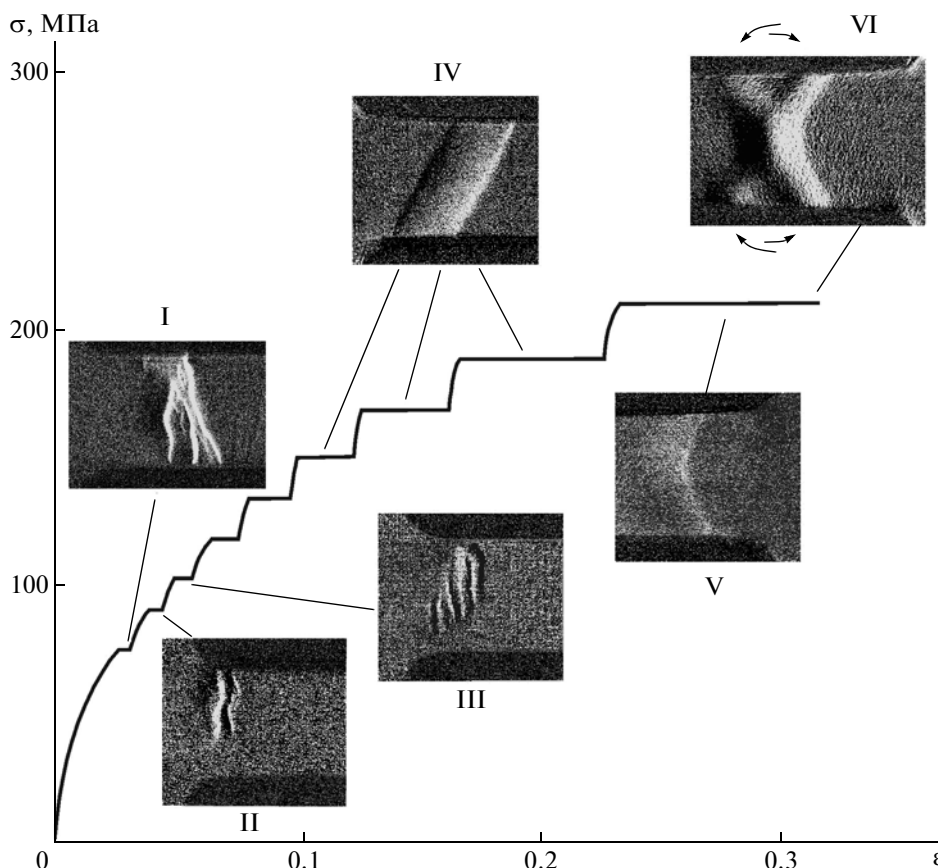


Рис. 5. Морфологическая диаграмма полос деформации Савара–Массона в сплаве Al–Mg. Римскими цифрами отмечены типы деформационных полос.

Морфологическая диаграмма. На рис. 5 представлена кинетическая морфологическая диаграмма полос деформации, возникающих с ростом деформирующего напряжения и соответственно степени деформации при нагружении с постоянной скоростью роста напряжения $\dot{\sigma}_0 = \text{const}$, т.е. в условиях проявления эффекта Савара–Массона. Наиболее важными и физически различными типами являются: а) полосы I типа – полосы Людерса, сопровождающие первые скачки деформации и связанные, как известно, с лавинообразным размножением дислокаций; б) полосы IV типа – расширяющиеся шейки с плоскими границами, составляющими углы $(55\text{--}60)^\circ$ или $(120\text{--}125)^\circ$ с осью растяжения, доля их участия в прерывистой деформации Савара–Массона по сравнению с полосами других типов максимальна: за счет полос IV типа в основном осуществляется ступенчатая деформация сплава; важной особенностью таких полос является способность к размножению по каскадному механизму [17], чем и определяется их доминирующая роль в эволюции неустойчивой деформации; в) полосы V и VI типа, участвующие в образовании шейки на стадии предразрушения образца.

Большинство выявленных типов полос представляют быстропротекающие пространственно-временные неустойчивости пластической деформации. Для их регистрации и *in situ* исследования необходимы высокоскоростные измерения со скоростью не менее 300 кадров/с. Более ранние исследования динамики деформационных полос со скоростью съемки 25 кадров/с позволяют выявить только полосы IV типа – расширяющиеся шейки [10, 13], так как угол полосы обычно сохраняется в течение времени $\sim 100\text{--}300$ мс, что значительно превышает характерные времена в эволюции полос других типов, $\sim 3\text{--}10$ мс (ветвление, смена угла, осцилляция угла полосы и т.д.).

Таким образом, на основе анализа данных скоростной видеосъемки распространяющихся неустойчивостей пластической деформации в условиях проявления эффекта Савара–Массона впервые получена классификация полос деформации, включающая шесть различных типов полос, и построена их морфологическая диаграмма. В отличие от автолокализованных полос деформации Портевена-Ле Шателье выявленные полосы деформации Савара–Массона расширяются в ходе

эволюции и представляют другие типы неустойчивостей пластического течения металла.

Работа выполнена в рамках реализации Федеральной целевой программы “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009–2013 гг. (контракт № П2321).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Portevin A., Le Chatelier F.* // *Trans. Am. Soc. Steels Treating.* 1924. V. 5. P. 457.
2. *Белл Дж.Ф.* Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. Ч. 2. М.: Наука, 1984. 432 с.
3. *Cottrell A.H.* // *Phil. Mag.* 1953. V. 44. № 335. P. 829.
4. *Estrin Y., Kubin L.P.* // *Continuum models for materials with microstructure/* Ed. Muhlhaus H.-B. New-York: Wiley and Sons, 1995. P. 395.
5. *Rizzi E., Hahner P.* // *Int. J. Plast.* 2004. V. 20. P. 121.
6. *Chihab K., Estrin Y., Kubin L.P., Vergnol J.* // *Scr. Metall.* 1987. V. 21. P. 203.
7. *Savart F.* // *Annales de Chimie et de Physique (second series)* 1837. V. 65. P. 337.
8. *Классен-Неклюдова М.В.* // *Журн. рус. физ.-хим. о-ва. Ч. физ.* 1928. Т. 60. № 5. С. 373.
9. *McReynolds A.W.* // *Metall Trans.* 1949. № 1. P. 32.
10. *Шибков А.А., Кольцов Р.Ю., Желтов М.А. и др.* // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2006. Т. 70. № 9. С. 1372.
11. *Neuhäuser H., Klose F.B., Hagemann F. et al.* // *J. Alloys Compounds.* 2004. V. 378. № 1–2. P. 13.
12. *Chmelik F., Klose F.B., Dierke H. et al.* // *Mat. Sci. Eng. A.* 2007. V. 462. P. 53.
13. *Шибков А.А., Лебедкин М.А., Желтов М.А. и др.* // *Заводская лаборатория.* 2005. № 7. Т. 71. С. 20.
14. *Klose F.B., Hagemann F., Hähner P., Neuhauser H.* // *Mat. Sci. Eng. A.* 2004. V. 387–389. P. 93.
15. *Zhang I., Jiang Y.* // *Int. J. Plast.* 2005. V. 21. P. 651.
16. *Шибков А. А., Золотов А. Е.* // *Кристаллография.* 2011. Т. 56. № 1. С. 147.
17. *Шибков А.А., Золотов А.Е.* // *Письма в ЖЭТФ.* 2009. Т. 90. № 5. С. 412.