

УДК 539.374

АКУСТИЧЕСКИЙ И ОПТИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ПОЛОСЫ ЛЮДЕРСА В АЛЮМИНИЙ-МАГНИЕВОМ СПЛАВЕ АМг6

© 2011 г. А. А. Шибков, А. Е. Золотов

Тамбовский государственный университет

E-mail: shibkov@tsu.tmb.ru

Поступила в редакцию 17.12.2009 г.

Ранние стадии развития полосы Людерса в рекристаллизованном сплаве АМг6 исследовали методом акустической эмиссии и синхронно с помощью скоростной видеосъемки со скоростью 500 кадров/с. Установлено, что первый импульс акустической эмиссии сигнализирует о зарождении первой полосы локализованной деформации, с которой начинается формирование сложной структуры фронта Людерса, и в этом аспекте является акустическим предвестником потери деформационной устойчивости сплава.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, источниками сигналов акустической эмиссии (АЭ) в кристаллах, деформируемых скольжением, являются нестационарные дислокационные процессы и образование трещин. Необходимым условием дислокационной АЭ является кооперативный характер движения дислокаций, а уровень активности АЭ может рассматриваться как количественная мера для характеристики коллективных аспектов дислокационной динамики [1]. Наиболее важным итогом исследования АЭ было обнаружение корреляции между интенсивностью спектра АЭ и кривой нагружения с максимумом интенсивности (одним или более) в районе предела текучести, которая демонстрирует временную неоднородность пластического течения практически у всех исследованных кристаллов [2–5].

Сочетание измерений АЭ со структурными исследованиями позволило установить соответствие между характером спектра АЭ и активностью различных систем скольжения, последовательно включающихся в процессе нагружения [5]. Было установлено, что первый максимум интенсивности АЭ связан с неравномерным развитием полос скольжения. Акустические исследования позволили выявить неравномерное распределение активных источников дислокаций по объему образца и выделить роль поверхностного слоя на начальной стадии деформирования [6]. Была установлена связь акустической активности с миграцией границ зерен при отжиге предварительно деформированного поликристалла алюминия [7], с деформационным двойникованием в аустенитной стали [8] и др.

Экспериментальные исследования акустической эмиссии стимулировали разработку теоретических моделей нестационарных дислокацион-

ных процессов на мезоскопическом структурном уровне [4, 9–15]. В последнее время в акустических исследованиях неустойчивой деформации наметились два сравнительно новых направления: изучение по сигналу АЭ статистики дислокационных лавин в твердых телах в основном на мезоскопическом структурном уровне [16–19] и исследование методом АЭ прерывистой деформации металлов [20–30].

При деформировании в жесткой машине в условиях эффекта Портевена–Ле Шателье (ПЛШ) в сплавах Al–Mg обнаружено, что каждый тип неустойчивости (A, B и C) сопровождается характерным сигналом АЭ, причем отдельному скачку разгрузки системы “машина-образец” соответствует всплеск сигнала АЭ, который по визуальным наблюдениям связан с динамикой полос деформации [27]. В [28] с помощью метода АЭ зафиксировано зарождение полосы деформации по повышению энергии сигнала и смещению спектра АЭ в сторону низких частот. В [29] выполнены комбинированные эксперименты, сочетающие АЭ и лазерную экстенсометрию для исследования полосы Людерса и полос ПЛШ в сплаве Al-1.5% Mg, деформируемом с постоянной скоростью $\dot{\epsilon}_0 = \text{const}$, а в [30] эти эксперименты были продолжены на сплаве Al-3.5% Mg, деформируемом с постоянной скоростью $\dot{\epsilon}_0 = \text{const}$ и с постоянной скоростью нагружения $\dot{\sigma}_0 = \text{const}$. В обеих работах отмечена большая скорость счета малоамплитудных сигналов АЭ при распространении полосы Людерса в отожженных сплавах Al–Mg, в то же время эволюция последующих полос деформации сопровождается более редкими и высокоамплитудными сигналами. На основании сравнения сигналов АЭ, сопровождающих явление Людерса и эффект ПЛШ, авторы [29] заключили, что

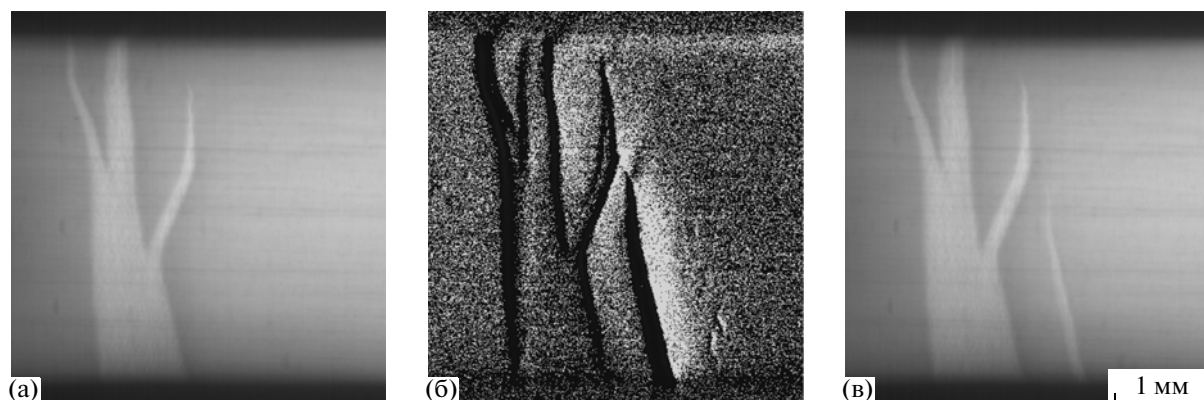


Рис. 1. Обработка изображений распространяющегося фронта Людерса в отожженном сплаве АМгб: а и в – последовательные цифровые кадры видеофильма, б – результат программного вычитания изображений (а) из (в).

полоса Людерса менее локализована в пространстве и времени, чем полосы ПЛШ.

Следует отметить, что лазерная экстенсометрия регистрирует смещение наклеенных (или нанесенных лаком) полосок шириной 1–2 мм в центральной области рабочей части образца, и поэтому имеет ряд очевидных недостатков. Во-первых, отсутствует возможность получения информации со всей поверхности образца, что важно для исследования пространственной корреляции деформационных полос, во-вторых, этот метод “не видит” самих полос и не позволяет исследовать их форму, характерные углы наклона и т.д., т.е. по существу является косвенным методом. Отличительной особенностью настоящей работы является использование синхронно с измерением акустических сигналов методики прямого наблюдения деформационных полос с помощью скоростной видеосъемки всей рабочей поверхности плоского образца.

Цель работы состояла в исследовании *in situ* различных стадий эволюции полосы Людерса в промышленном алюминий-магниевом сплаве АМгб методами акустической эмиссии, видеосъемки со скоростью 500 кадров/с синхронно с регистрацией скачков деформации.

МЕТОДИКА

Поликристаллические образцы сплава АМгб (Al-5.92 мас. % Mg-0.61 мас. % Mn) размером $6 \times 3 \times 1.2$ мм вырезали из листового проката и деформировали одноосным растяжением при температуре 20°C в условиях проявления эффекта Савара–Массона [31–35], т.е. с постоянной скоростью роста напряжения ($\dot{\sigma}_0 = 0.2$ МПа/с). Предварительно образцы подвергались часовому отжигу при температуре 450°C и закалке для получения рекристаллизованной зеренной структуры со средним размером зерна 10 мкм [36]. Ступенчатые кривые деформации $\varepsilon(t)$ (рис. 1 в [35]) регистрировали с помощью контактного цифро-

вого индикатора смещения 1D-C125 фирмы Mitutoyo с точностью 1 мкм. Для *in situ* исследования динамики полос макролокализованной деформации на оптически полированной поверхности образца использовали скоростную цифровую видеокамеру VS-FAST/G6 научно-производственной компании “Видеоскан”.

Для регистрации полос деформации на всей рабочей поверхности образца поле зрения видеокамеры выбиралось 10×10 мм, что при скорости съемки 500 кадров/с и формате изображения 1204×1280 пикселей соответствовало пространственному разрешению 8 мкм/пиксель, т.е. при выбранных условиях видеосъемки размер пикселя был приблизительно равен среднему размеру зерна (~ 10 мкм). Обработка изображений состояла в вычитании с помощью компьютерной программы последовательных во времени изображений, например изображения n -го кадра из изображения $(n + 1)$ -го кадра (рис. 1). При такой методике обработки изображений выделяются контуры только движущихся объектов – распространяющихся полос деформации [33–35]. Видеосъемку вели со стороны грани 3×6 мм.

Акустический датчик, выполненный на основе титаната бария, укреплялся через слой масла на нижней лопатке образца, связанной с базой (станиной испытательной машины). Сигнал датчика АЭ усиливался широкополосным высокоомным предусилителем (полоса пропускания $1\text{--}10^6$ Гц), оцифровывался с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и подавался на компьютер. Для синхронизации сигналов АЭ с данными видеосъемки использовали следующую схему. Изображение экрана осциллографа с помощью собирающей линзы проецировалось на объектив видеокамеры через небольшое отверстие в стальном экране (необходимом для защиты измерительной ячейки от помех) (рис. 2). Такое устройство позволяло наблюдать в поле зрения видеокамеры поверхность деформи-

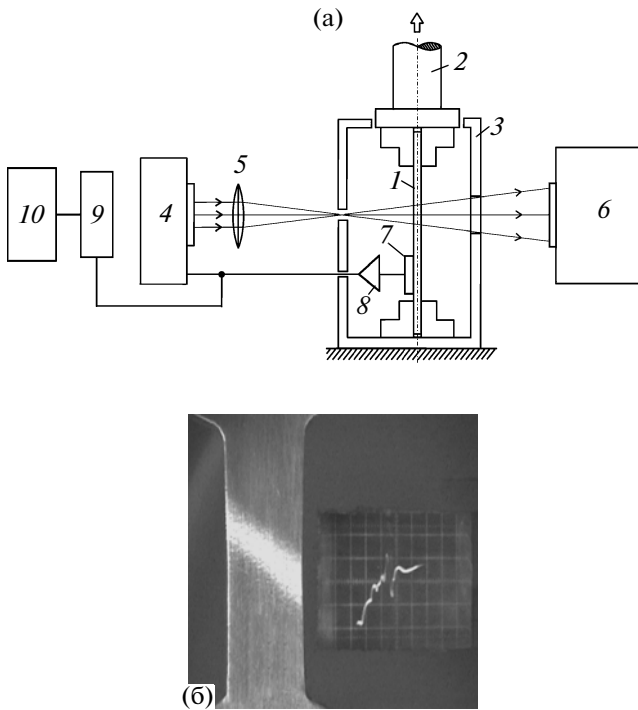


Рис. 2. Схема синхронизации видеофильма с сигналом АЭ (а): 1 – плоский металлический образец, 2 – шток деформационной машины, 3 – экран электрометрической ячейки, выполненный из железа армо толщиной 10 мм, 4 – осциллограф (источник света – луч на экране осциллографа), 5 – собирающая линза, 6 – цифровая видеокамера, 7 – пьезодатчик, 8 – предусилитель акустического сигнала, 9 – АЦП, 10 – компьютер. Видеоизображение поверхности деформируемого образца АМгб в момент зарождения деформационной полосы и соответствующий сигнал АЭ (б).

руемого образца и одновременно перемещение луча осциллографа для контроля синхронизации видеофильма с акустическими сигналами, записанными с помощью компьютера.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Докритический и закритический рост полосы Людерса. Первым проявлением неоднородной деформации в сплаве АМгб с рекристаллизованной зеренной структурой является распространение полосы Людерса. Эволюция полосы Людерса состоит из двух физически различных стадий: докритической стадии, на которой сравнительно медленно, со средними скоростями фронта $\sim 10\text{--}100$ мкм/с, от источников на ребре кристалла растут незавершенные полосы (не пересекающие сечение) в форме, близкой к треугольной (рис. 3а, 3б) и закритической, активной фазе роста, которая стартует от внезапного распространения по границе одной из полос узкой (шириной около 40 мкм) деформационной полосы (рис. 3в) со скоростью вершины $\sim 0.3\text{--}1$ м/с, после чего начинается распространение вдоль образца ветвяще-

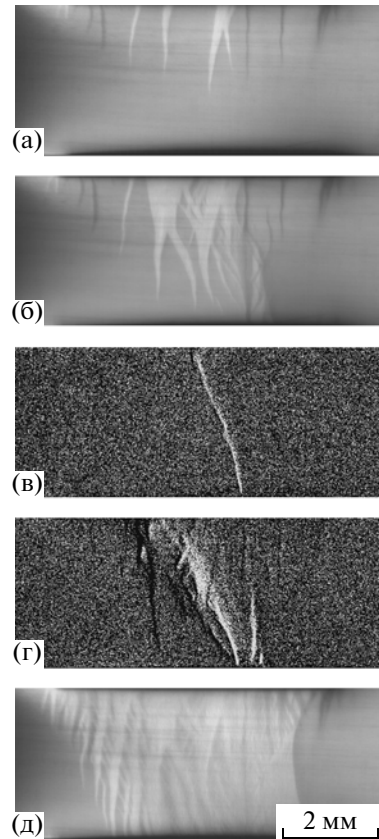


Рис. 3. Стадии эволюции полосы Людерса в сплаве АМгб со структурой собирательной рекристаллизации: а, б – докритическая монотонная стадия роста, в – быстрое распространение через все сечение узкой “гетерогенной” полосы деформации (критическое событие); г – закритический рост ветвящегося фронта Людерса, д – завершающаяся стадия полосы Людерса; в и г – результаты компьютерного вычитания соседних кадров цифрового видеофильма.

гося фронта Людерса (рис. 3г). Если на фронте первого скачка полоса Людерса не заполнила всей рабочей поверхности образца, то процесс ее распространения будет продолжаться на втором и третьем, не более, скачках. После того, как полоса Людерса пройдет через всю поверхность образца, деформация на скачках будет осуществляться полосами другой природы – полосами Савара–Массона [32].

Основное различие между стадиями эволюции полосы Людерса состоит в том, что на докритической стадии полоса Людерса медленно растет за счет увеличения приложенного напряжения, а на закритической стадии – за счет спонтанной (пороговой) релаксации внутренних напряжений (аналогично росту закритической трещины). Последние возникают на границе “материнской” полосы из-за несоответствия деформации чисто упругой и упруго-пластической. Стадия докритического роста полосы Людерса происходит монотонно на мезо- и макроуровне. Она не сопровождается

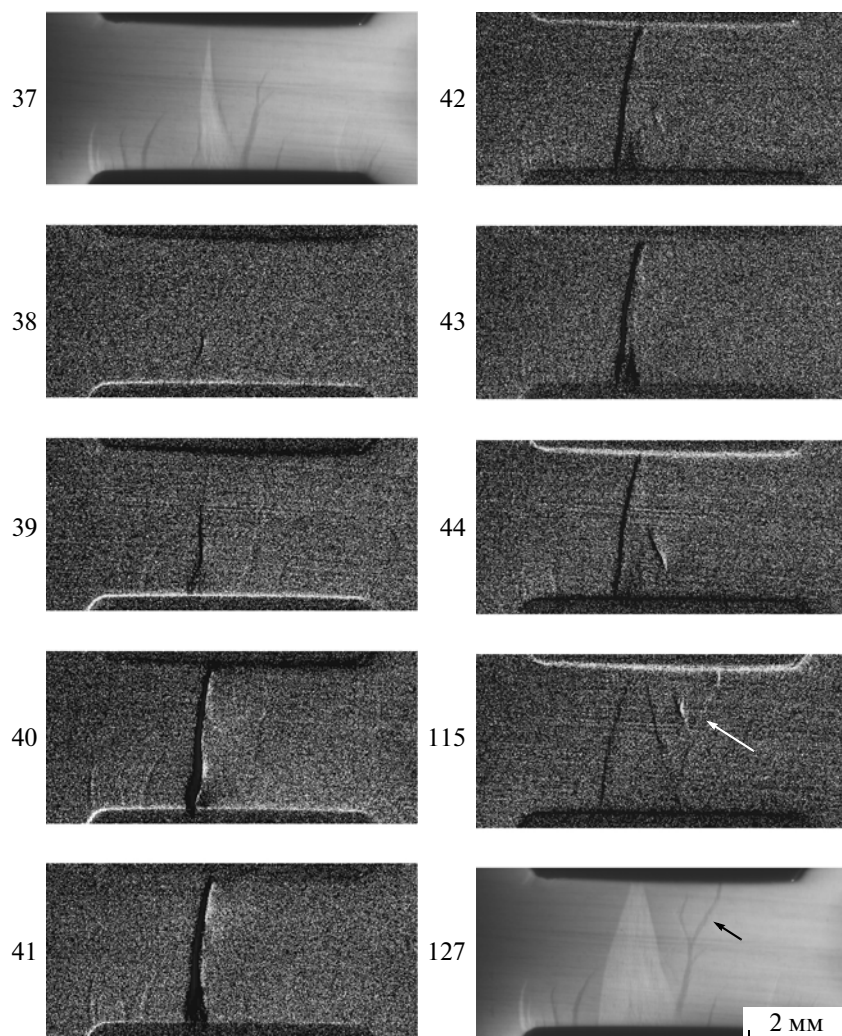


Рис. 4. Закритическая стадия распространения полосы Людерса на фронте первого скачка деформации. Стрелками отмечена “правая ветка”, эволюция которой вызывает рост сигнала АЭ (рис. 5). Цифрами даны номера кадров видеофильма.

макроскопическими скачками деформации. Стадия закритического роста сопровождается резким скачком деформации с амплитудой $\sim 0.3\text{--}3\%$. “Критическим” событием в эволюции полосы Людерса является спонтанное и быстрое распространение сквозной деформационной полосы, сигнализирующее о начале развития первого деформационного скачка. Эти наблюдения в целом согласуются с выводами в [37].

Таким образом, в сплаве АМгб с рекристаллизованной структурой триггером первого деформационного скачка является распространение “гетерогенной” полосы деформации, которая зарождается на границе уже существующей в материале (материнской) полосы. Гетерогенная полоса некоторое время (до $\sim 10\text{--}30$ мс) распространяется по этой границе, а затем после отрыва от границы распространяется через все сечение образца. Полоса-триггер сначала наследует форму материнской границы, а после отрыва ее форма,

видимо, отражает мозаику внутренних напряжений в структуре фронта полосы Людерса на докритической стадии.

Особенности сигнала АЭ, вызванного зарождением и распространением полосы Людерса. Медленная стадия докритического роста полосы Людерса не сопровождается акустическими сигналами и скачками деформации (по крайней мере их величина не превышает чувствительность соответствующих каналов измерения: 50 мкВ для канала АЭ и ~ 1 мкм для датчика смещения). В то же время началу закритической стадии роста соответствует всплеск сигнала АЭ, причем момент генерации акустического сигнала и длительность его переднего фронта в точности соответствуют моменту зарождения и времени распространения через все сечение кристалла узкой гетерогенной полосы деформации, зародившейся на границе предшествующей полосы (образованной на докритической стадии).

На рис. 4 представлен фрагмент видеofilьма, демонстрирующий закритическую стадию распространения полосы Людерса на фронте первого скачка деформации, а на рис. 5 показана форма скачка деформации (кривая 1) и акустический сигнал (кривая 2). Как видно из рис. 5, в структуре акустического сигнала наблюдаются две ступени с амплитудой около 400 и 150 мВ и длительностью фронта 11 и 21 мс соответственно. Между этими ступенями наблюдается осциллирующая на частоте около 62 Гц составляющая сигнала АЭ, которая по данным калибровки совпадает с собственной частотой системы машина—образец на соответствующем участке кривой нагружения. Сопоставление данных записи сигнала АЭ с данными видеосъемки показывает, что первый скачок акустического сигнала вызван зарождением и распространением с начальной скоростью 0.5 м/с узкой гетерогенной полосы по левой границе материнской полосы, выросшей на докритической стадии эволюции полосы Людерса (кадры 38—44). Второй скачок акустического сигнала вызван распространением небольшой гетерогенной полосы по правой границе материнской полосы, показанной стрелкой на рис. 4 (кадры 115, 127).

Потерю устойчивости деформационного поведения сплавов, проявляющих прерывистую деформацию, обычно описывают в терминах первой критической деформации ϵ_c [33]. Данные видеосъемки показывают, что первой критической деформации соответствует зарождение и распространение первой гетерогенной полосы деформации (рис. 4, кадры 38—44). Этот нестационарный процесс продолжительностью около 12 мс (по данным видеосъемки) “толкает” добротную систему машина—образец на собственной частоте (период собственных колебаний системы машина—образец на данном участке кривой равен 16 мс). Это приводит к раскачке системы на ее собственной частоте с затуханием после окончания скачка деформации, причем огибающая сигнала АЭ на рис. 5 отражает временную зависимость скорости деформации образца на фронте скачка, т.е. $\partial(\Delta\epsilon)/\partial t$.

Представленные на рис. 4 деформационные процессы вызывают появление первого небольшого скачка с амплитудой около 10 мкм (0.16%). Деформационная картина на поверхности образца после первого скачка показана на кадре 127. Она точно (в пределах оптического разрешения) совпадает с формой полосы Людерса перед вторым скачком. Площадь, ограниченная фронтами полосы Людерса, составляет около 10% рабочей поверхности образца. На втором скачке она вырастает до ~40%, а после третьего скачка покрывает почти всю рабочую поверхность образца (рис. 3д).

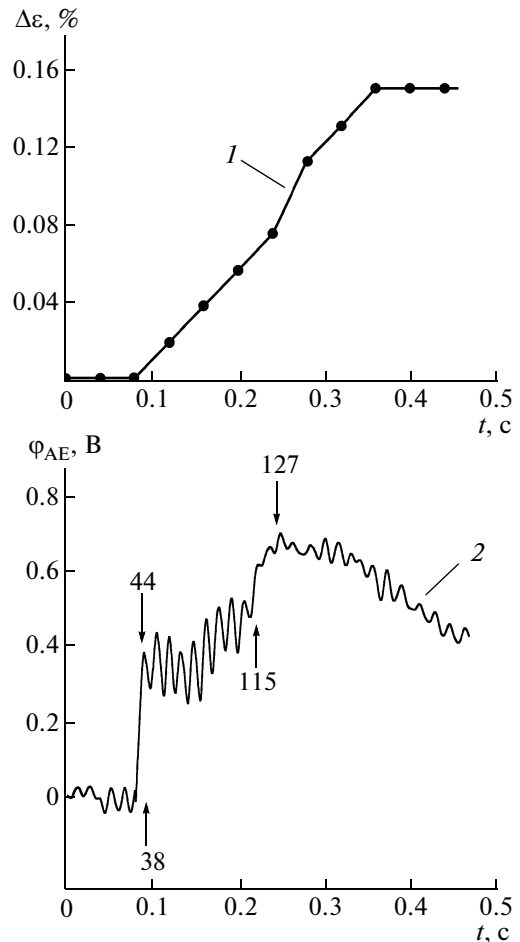


Рис. 5. Первый скачок деформации $\Delta\epsilon$ (1) и акустический сигнал ϕ_{AE} (2), связанный с динамикой полосы Людерса, представленной на рис. 4. Цифрами отмечены кадры видеofilьма на рис. 4.

Таким образом, первый импульс АЭ длительностью ~10 мс сигнализирует о старте закритического роста полосы Людерса и является акустическим предвестником потери устойчивости пластически деформируемого сплава — первого скачка деформации, и может быть использован для точного определения первой критической деформации.

Начало второго деформационного скачка сопровождается всплеском акустического сигнала самой высокой амплитуды: более 1В (рис. 6), по сравнению с сигналами АЭ на фронте последующих более крупных деформационных ступеней на кривой нагружения, за исключением сигнала АЭ, вызванного разрывом образца. Этому скачку сигнала АЭ соответствует весьма сложный и скоррелированный во времени и пространстве процесс развития локализованной деформации. В первые 4 мс от источника на ребре образца распространяется узкая полоса деформации со скоростью вершины около 0.5 м/с, до контактного взаимодействия с устьем материнской ветки, отмеченной стрелкой на рис. 7 (кадры 51, 52). Затем

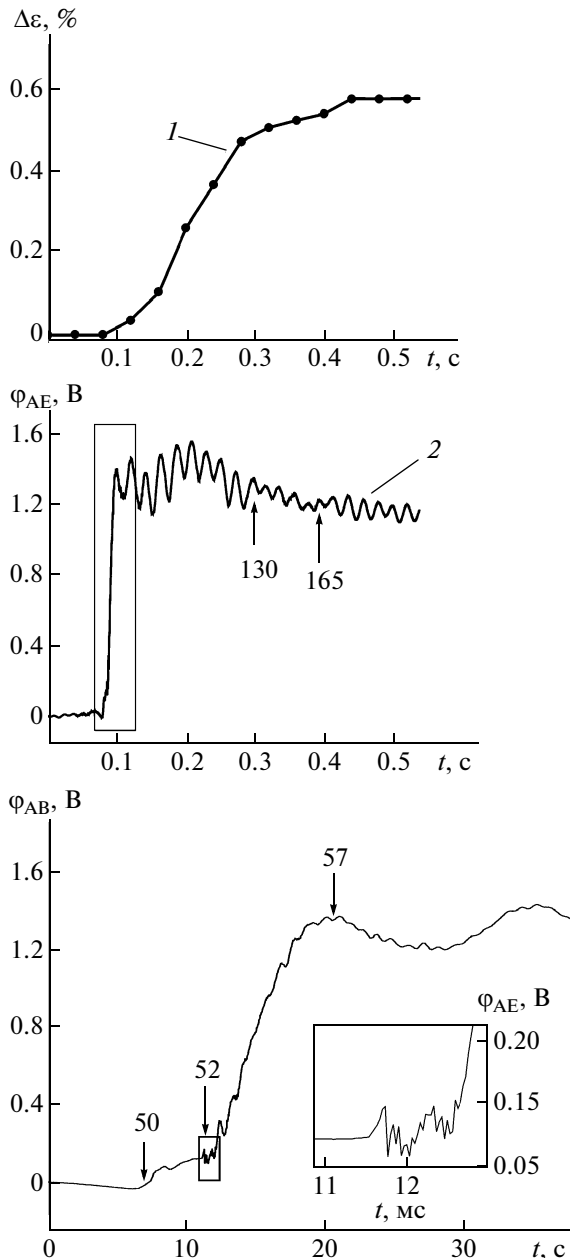


Рис. 6. Второй скачок деформации (1) и акустический сигнал (2), связанный с динамикой полосы Людерса, представленной на рис. 7. Цифрами отмечены кадры видеofilьма на рис. 7.

за время меньше 2 мс по левой границе материнской полосы все сечение образца “пробивает” узкая полоса (кадр 52). Оценка снизу скорости ее вершины дает не менее 1.5 м/с. После этого начинается перемещение левой границы как целое влево вдоль оси образца со скоростью около 3 см/с и одновременно происходят пространственно сложные деформационные процессы внутри полосы Людерса, включающие активизацию структуры полос скольжения (мезополос).

Начальная стадия зарождения структуры мезополос внутри полосы Людерса отмечена на запи-

си сигнала АЭ пачкой из десятка более высокочастотных мелких сигналов с характерными частотами в интервале $\sim 1\text{--}10$ кГц (вставка на рис. 6). Отметим, что и в пространственной структуре наблюдается около десятка мезополос (рис. 7, кадры 54–56). После кадров 56 и 57, соответствующих максимальному значению сигнала АЭ, скорость перемещения полос резко падает и активность полосы Людерса затухает.

Как видно, наиболее быстрые события на фронте полосы Людерса, связанные с зарождением и распространением со скоростью ~ 1 м/с первых полос локализованной деформации через сечение образца, сопровождаются соответствующими особенностями (скачками) в структуре акустического сигнала. Передний фронт сигнала АЭ длительностью 16 мс в точности соответствует представленному на рис. 7 фрагменту видеofilьма на временном отрезке между кадрами 50 и 57, который занимает 16 мс. Как видно из рис. 6 и 7, начальная, наиболее активная стадия эволюции полосы Людерса вызывает раскачку добротной системы машина–образец, что затрудняет исследование методом АЭ последующих стадий распространения полосы Людерса, обеспечивающих основной вклад в деформационный скачок. Поэтому передний фронт сигнала АЭ (вставка на рис. 6) по времени появления соответствует “подножию” второго деформационного скачка (кривые 1 и 2 на рис. 6) и может рассматриваться как его акустический предвестник.

На фронте третьего скачка заканчивается эволюция полосы Людерса. Скачок начинается по сценарию, похожему на первые два скачка. Снова после прострела через сечение узкой деформационной полосы наблюдаются всплески высокочастотного шума малоамплитудных импульсов, затем начинается интенсивная деформация внутри полосы и одновременно ее расширение, что сопровождается ростом сигнала АЭ. Особенностью завершающей стадии эволюции полосы Людерса является формирование в ее приграничной области шириной около ~ 1 мм активной субструктуры, состоящей из более тонких почти параллельных деформационных полос в форме узких и продолговатых мезоскладок на поверхности металла, причем огибающая этой субструктуры составляет угол около 60° к оси растяжения (рис. 3д). Эта субструктура является прототипом полосы Савара–Массона расширяющейся шейки – типичной полосы деформации на фронте последующих более крупных деформационных скачков при растяжении сплава Al–Mg в мягкой деформационной машине с постоянной скоростью роста на напряжения $\dot{\sigma}_0 = \text{const}$ [32–35].

Как отмечалось в работах [38–39], независимо от жесткости испытательной машины первый деформационный скачок, соответствующий первой критической деформации рекристаллизованного

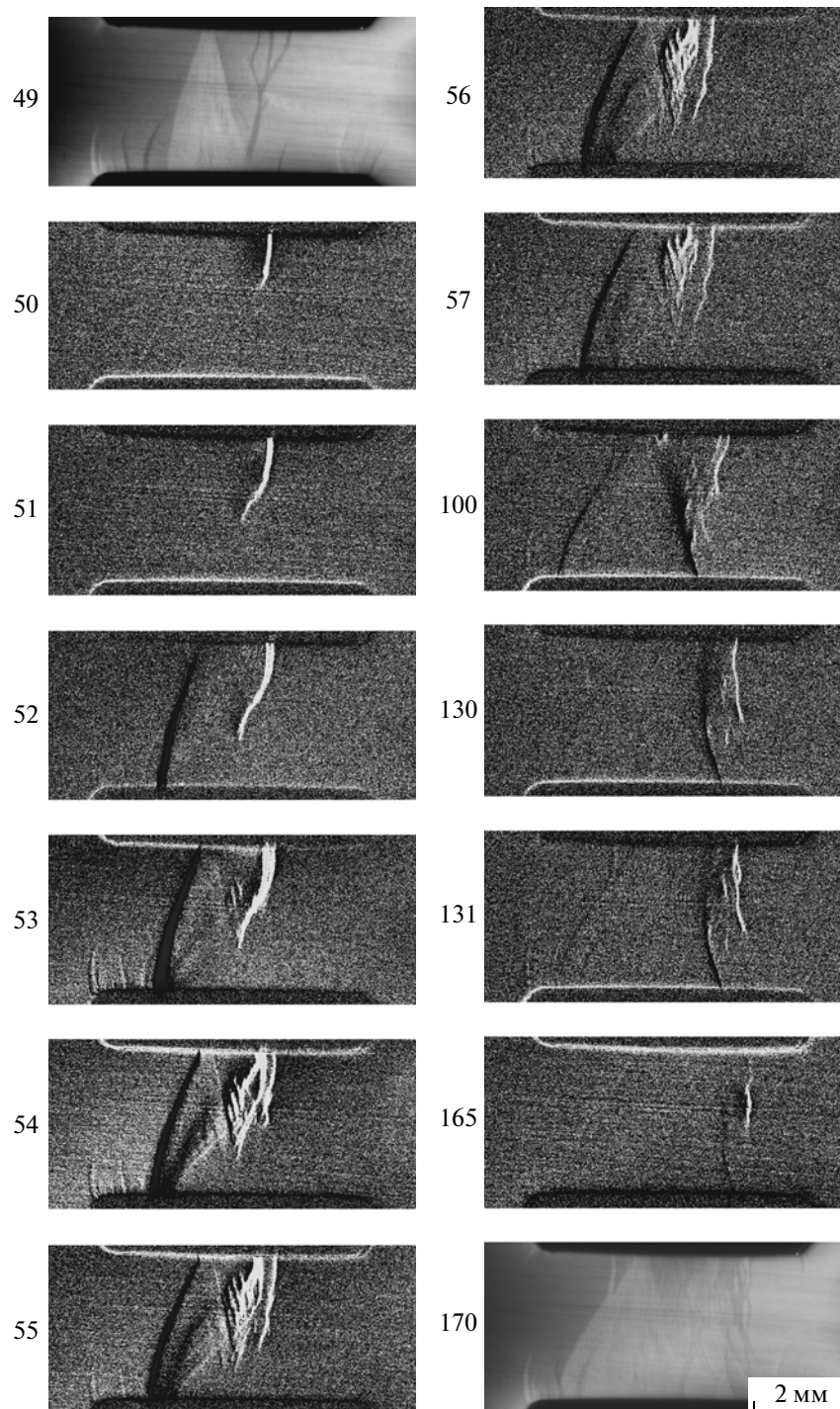


Рис. 7. Распространения полосы Людерса на фронте второго скачка в сплаве АМг6. Стрелкой отмечена позиция ветвления в структуре материнской полосы. Цифрами даны номера кадров видеофильма.

сплава Al–Mg, обусловлен распространением полосы Людерса, связанной с лавинообразным размножением дислокаций, а последующие скачки — полосами Портевена–Ле Шателье (жесткий режим деформирования $\dot{\epsilon}_0 = \text{const}$) или полосами Савара–Массона (мягкий режим $\dot{\sigma}_0 = \text{const}$ [32]). Из результатов настоящей работы и работы [33]

следует, что полоса Людерса имеет сложную пространственно-временную структуру, а начальная наиболее быстрая стадия ее эволюции продолжительностью порядка 10 мс сопровождается всплеском акустического сигнала амплитудой $\sim 0.3\text{--}1$ В. Как показывает детальное сопоставление данных оптических и акустических измере-

ний, основные особенности развития локализованной деформации на этой стадии, выявленные с помощью видеосъемки поверхности, отражены в структуре акустического сигнала, т.е. чувствительности оптического и акустического каналов регистрации к потере деформационной устойчивости сплава, приблизительно одинаковы.

Таким образом, на основе исследования взаимосвязи сигналов акустической эмиссии с особенностями кинетики деформационных полос, контролируемой с помощью скоростной видеосъемки со скоростью 500 кадров/с, установлено, что первый импульс АЭ длительностью ~10 мс сигнализирует о зарождении первой полосы локализованной деформации в структуре фронта Людерса у подножия первого деформационного скачка и в этом аспекте является акустическим предвестником потери устойчивого деформационного поведения сплава, что может быть использовано для прецизионного измерения первой критической деформации. Механизмом генерирования акустического сигнала, по-видимому, является лавинообразное распространение фронта размножения дислокаций в поликристаллическом сплаве.

Работа выполнена в рамках реализации аналитической ведомственной целевой программы "Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2010 гг.)", номер проекта 2.1.1/2747.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *James D.R., Carpenter S.H.* // J. Appl. Phys. 1971. V. 42. № 12. P. 4685.
2. *Грешников В.А., Дробот Ю.Б.* Акустическая эмиссия. М.: Изд-во стандартов, 1976. 276 с.
3. *Гусев С.В.* Акустическая эмиссия при деформировании монокристаллов тугоплавких металлов. М.: Наука, 1982. 167 с.
4. *Бойко В.С., Нацик В.Д.* // Элементарные дислокационные механизмы пластической эмиссии. Элементарные процессы пластической деформации кристаллов. Киев: Наук. думка, 1978. С. 159.
5. *Бибик З.И.* // Физика металлов и металловедение. 1987. Т. 63. № 4. С. 811.
6. *Криштал М.А., Мерсон Д.Л., Алехин В.П.* // Физика металлов и металловедение. 1987. Т. 63. № 5. С. 1011.
7. *Плотников В.А.* // Физика металлов и металловедение. 2002. Т. 94. № 5. С. 83.
8. *Уваров А.И., Волков В.В., Иевлев И.Ю. и др.* // Физика металлов и металловедение. 1981. № 3. С. 158.
9. *Бойко В.С., Гарбер Р.И., Кривенко Л.Ф.* // ФТТ. 1974. Т. 16. № 5. С. 1451.
10. *Бойко В.С., Гарбер Р.И., Кившик В.Ф.* // ФТТ. 1975. Т. 17. № 5. С. 1541.
11. *Нацик В.Д.* // Письма в ЖЭТФ. 1968. Т. 8. № 3. С. 198.
12. *Нацик В.Д., Чишко К.А.* // ФТТ. 1972. Т. 14. № 11. С. 3126.
13. *Нацик В.Д., Чишко К.А.* // ФТТ. 1975. Т. 17. № 1. С. 342.
14. *Нацик В.Д., Чишко К.А.* // Акуст. журн. 1982. Т. 26. № 3. С. 421.
15. *Бойко В.С., Кившик В.Ф., Кривенко Л.Ф.* // ЖЭТФ. 1982. Т. 82. № 2. С. 504.
16. *Weiss J., Grasso J.-R.* // J. Phys. Chem. B. 1997. V. 101. № 32. P. 6113.
17. *Weiss J., Lahaie F., Grasso J.-R.* // J. Geophys. Res. 2000. V. 105. P. 433.
18. *Miguel M.C., Vespignani A., Zapperi S. et al.* // Cond. Mat. 2001. V. 1. № 5. P. 1.
19. *Miguel M.C., Vespignani A., Zapperi S. et al.* // Nature. 2001. V. 410. № 4. P. 667.
20. *Борщевская Д.Г., Бугус Г.А., Эвина Т.Я., Тремба Т.С.* // Физика металлов и металловедение. 1989. Т. 68. № 1. С. 192.
21. *Zeides F., Roman I.* // Scr. Met. 1990. V. 24. № 10. P. 1919.
22. *Caceres C.H., Rodriguez A.H.* // Acta Met. 1987. V. 35. № 12. P. 2851.
23. *Chmelik F., Balik J., Lukac P., Pink E.* // Kovove Mater. 1998. V. 36. № 1. P. 10.
24. *Chmelik F., Balik J., Lukac P. et al.* // Mater Sci Forum. 1996. V. 217. P. 1019.
25. *Chmelik F., Trojanova Z., Prevorsky Z. et al.* // Acta Univ. Carol. Math. Phys. 1991. V. 32. № 1. P. 61.
26. *Криштал М.М., Мерсон Д.Л.* // Физика металлов и металловедение. 1991. № 10. С. 187.
27. *Криштал М.М., Мерсон Д.Л.* // Физика металлов и металловедение. 1996. Т. 81. № 1. С. 156.
28. *Криштал М.М., Хрусталева А.К., Разуваев А.А., Демин И.С.* // Деформация и разрушение материалов. 2008. № 1. С. 28
29. *Chmelik F., Ziegenbein A., Neuhauser H., Lukac P.* // Mater Sci. Eng. A. 2002. V. 324. P. 200.
30. *Chmelik F., Klose F.B., Dierke H. et al.* // Mater Sci. Eng. A. 2007. V. 462. P. 53.
31. *Шибков А.А., Лебедкин М.А., Желтов М.А. и др.* // Завод. лаб. 2005 № 7. Т. 71. С. 20.
32. *Шибков А.А., Кольцов Р.Ю., Желтов М.А. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2006. Т. 70. № 9. С. 1372.
33. *Шибков А.А., Золотов А.Е., Михлик Д.В. и др.* // Деформация и разрушение материалов. 2009. № 8. С. 23.
34. *Шибков А.А., Золотов А.Е., Михлик Д.В. и др.* // Деформация и разрушение материалов. 2009. № 9. С. 22.
35. *Шибков А.А., Золотов А.Е.* // Письма в ЖЭТФ. 2009. Т. 90. № 5. С. 412.
36. *Шибков А.А., Мазилкин А.А., Протасова С.Г. и др.* // Деформация и разрушение материалов. 2008. № 5. С. 24.
37. *Криштал М.М., Хрусталева А.К., Волков А.В., Бородин С.А.* // Докл. РАН. 2009. Т. 426. № 1. С. 36.
38. *Neuhäuser H., Klose F.B., Hagemann F. et al.* // J. Alloys Comp. 2004. V. 378. № 1–2. P. 13.
39. *Klose F.B., Hagemann F., Hähner P., Neuhäuser H.* // Mater Sci. Eng. A. 2004. V. 387–389. P. 93.