

## ВЫСОКОСКОРОСТНЫЕ *IN SITU*-ИССЛЕДОВАНИЯ КОРРЕЛЯЦИЙ МЕЖДУ ФОРМИРОВАНИЕМ ПОЛОС ДЕФОРМАЦИИ И АКУСТИЧЕСКИМ ОТКЛИКОМ В АЛЮМИНИЙ-МАГНИЕВОМ СПЛАВЕ

© 2020 г. А. А. Шибков<sup>1,\*</sup>, М. Ф. Гасанов<sup>1</sup>, А. Е. Золотов<sup>1</sup>, А. А. Денисов<sup>1</sup>,  
С. С. Кочегаров<sup>1</sup>, Р. Ю. Кольцов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, Тамбов, Россия

\*E-mail: shibkov@tsu.tmb.ru

Поступила в редакцию 23.09.2019 г.

После доработки 08.10.2019 г.

Принята к публикации 09.10.2019 г.

Динамику деформационных полос в алюминий-магниевом сплаве исследовали синхронно двумя *in situ*-методами: методом акустической эмиссии (АЭ) и высокоскоростной видеосъемкой со скоростью 20000 кадр/с поверхности образца, деформируемого с заданной скоростью роста напряжения  $\dot{\sigma}_0$ . Установлено, что полоса зарождается в случайной позиции на боковой поверхности плоского образца и в форме иглообразного зародыша растет под углом около  $60^\circ$  к оси растяжения со скоростью движения вершины до  $\sim 10$  м/с. Зарождение, рост и выход на противоположную боковую поверхность зародыша полосы сопровождаются широкополосным сигналом АЭ в полосе частот  $\sim 10^2$ – $10^6$  Гц. Низкочастотная составляющая сигнала АЭ в полосе  $\sim 0.1$ – $1$  кГц связана с макроскопическим поведением полосы, а высокочастотная – в полосе  $\sim 0.1$ – $1$  МГц несет информацию о мезоскопических событиях, связанных со скачками скорости вершины зародыша полосы и его выходом на внешнюю поверхность образца. Обсуждаются механизмы генерирования сигналов АЭ.

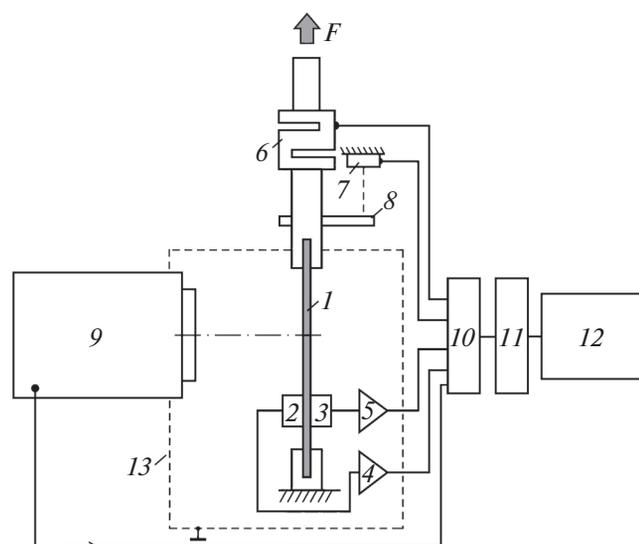
DOI: 10.31857/S0023476120040207

### ВВЕДЕНИЕ

В последнее время возрос интерес к изучению нелинейных эффектов в макрокинетике пластически деформируемого кристалла, обусловленных пространственно-временной самоорганизацией больших дислокационных ансамблей. Наиболее ярким нелинейным эффектом в физике прочности и пластичности является прерывистая деформация металлов и сплавов, которая проявляется в двух различных ситуациях: при нагружении в мягкой деформационной машине с заданной скоростью роста приложенного напряжения  $\dot{\sigma}_0 = \text{const}$  регистрируется ступенчатая кривая деформации  $\epsilon(t)$  с амплитудой скачков до  $\sim 10\%$  (эффект Савара–Массона [1]), ее частным случаем, соответствующим условию  $\dot{\sigma}_0 = 0$ , т.е.  $\sigma_0 = \text{const}$ , является прерывистая ползучесть [2]; при деформировании с постоянной скоростью  $\dot{\epsilon}_0 = \text{const}$  в жесткой испытательной машине регистрируется зубчатая кривая изменения напряжения  $\sigma(t)$  с повторяющимися скачками разгрузки (*stress drops*) системы машина–образец (эффект Портевена–Ле Шателье (ПЛШ)) [3]. Первая ситуация соответствует прямой задаче динамики,

когда заданы силы, действующие на систему, а откликом является неустойчивая деформация, а вторая – обратной задаче динамики, когда задан закон изменения деформации, а исследуется силовой отклик механической системы машина–образец. В обеих ситуациях прерывистая деформация сопровождается пространственной локализацией пластической деформации в статических или распространяющихся полосах [4–6].

Большинство исследований прерывистой деформации и полосообразования проводилось в условиях эффекта ПЛШ [7, 8]. В то же время использование «мягкого» режима нагружения ( $\dot{\sigma}_0 = \text{const}$ ) позволяет в принципе получать более непосредственную информацию о развитии неустойчивой пластической деформации, чем при испытании в жесткой испытательной машине, так как именно деформация  $\epsilon(t)$  является измеряемой функцией отклика на развитие неустойчивого пластического течения. С позиции нелинейной динамики важно изучить, каким образом под действием заданного закона изменения внешней нагрузки, т.е. в динамически определенной системе, с течением времени спонтанно зарождаются и распространяются пространственно-времен-



**Рис. 1.** Схема экспериментального устройства: 1 – образец, 2 и 3 – датчики АЭ D1 и D2 соответственно, 4 и 5 – предусилители сигналов от датчиков D1 и D2 соответственно, 6 – датчик усилия, 7 – лазерный экстенсометр, 8 – зеркало, 9 – скоростная видеокамера, 10 – коммутатор, 11 – аналого-цифровой преобразователь, 12 – компьютер, 13 – экран.

ные структуры локализованной деформации в виде деформационных полос.

В настоящей работе экспериментально исследованы ранние стадии развития деформационных полос и ступеней на кривых нагружения алюминий-магниевого сплава в условиях проявления эффекта Савара–Массона, т.е. при  $\dot{\sigma}_0 = \text{const}$ . Для этой цели одновременно использованы наиболее быстродействующие методы регистрации деформационных полос: высокоскоростная видеосъемка поверхности деформируемого образца и метод акустической эмиссии (АЭ). Цель работы – исследование нелинейной динамики деформационных полос на основе установления корреляций между данными высокоскоростной видеосъемки и акустическим откликом на прерывистую деформацию.

## МЕТОДИКА

Материалом исследования выбран алюминий-магний-железо-марганец-кремний-сера-фосфорный сплав АМг6 (Al – 6.15 мас. % Mg – 0.65 мас. % Mn – 0.25 мас. % Si – 0.21 мас. % Fe), проявляющий прерывистую деформацию и полосообразование при комнатной температуре. Этот сплав широко используется в авиационной технике, автомобильной промышленности и химическом машиностроении. Образцы в виде двухсторонних лопаток с размерами рабочей части  $6 \times 3 \times 0.2$  мм вырезали машинным способом из холоднокатаного листа вдоль направления прокатки с последующим отжигом при  $450^\circ\text{C}$  в тече-

ние 1 ч и закалкой на воздухе. После термообработки средний размер зерна составлял около 10 мкм. Растяжение образцов со скоростью роста нагрузки  $\dot{\sigma}_0 = 0.6$  МПа/с проводили при комнатной температуре в мягкой деформационной машине, описанной в [9].

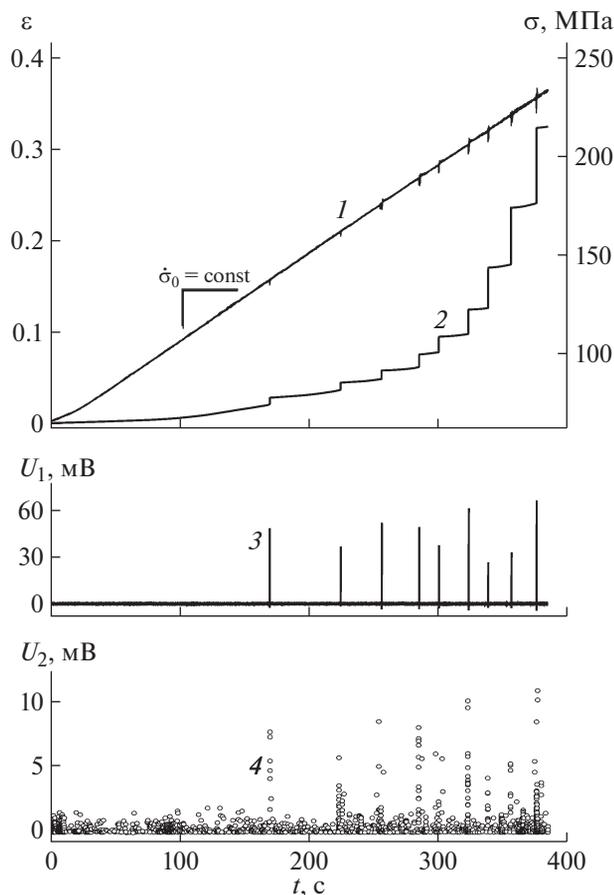
Кинетику развития деформационной ступени исследовали с помощью бесконтактного (лазерного) триангуляционного экстенсометра (Riftec) с точностью 1.5 мкм в полосе частот 0–2 кГц. Силовой отклик на развитие пластических неустойчивостей измеряли с помощью датчика усилия Zemic H3-C3-100 kg-3B. Синхронно с измерениями деформации и усилия вели видеосъемку поверхности деформируемого образца со скоростью 20000 кадр/с скоростной цифровой видеокамерой FASTCAM Mini UX50/100 (Photron). Данные видеосъемки обрабатывали с помощью компьютерной программы вычитания последовательных цифровых изображений [10].

Исследования АЭ в ходе прерывистой деформации ПЛШ обычно проводили в частотном диапазоне  $10^3$ – $10^6$  Гц [11–18]. Для изучения информационного содержания сигналов АЭ в области низких и высоких частот в настоящей работе использовали два датчика АЭ: низкочастотный (D1) пьезоэлектрический датчик VS30-V (Vallen-Systeme) с почти плоской амплитудно-частотной характеристикой в диапазоне частот 25–80 кГц и высокочастотный (D2) акустический датчик Zetlab BC 601 в полосе частот 100–800 кГц. В серии экспериментов оба датчика использовали одновременно, закрепляя их на нижней неподвижной лопатке образца. Сигналы АЭ усиливались на 40 дБ предусилителем АЕР5 (Vallen-Systeme). Запись сигналов АЭ выполняли непрерывно без порога с амплитудным разрешением 16 бит и частотой записи до 2 МГц. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

*Деформационные ступени на кривой нагружения при  $\dot{\sigma}_0 = \text{const}$  и сигналы АЭ.* Типичная кривая нагружения содержит около десятка деформационных ступеней амплитудой несколько процентов от  $\sim 1$  до  $\sim 10\%$  (рис. 2, кривая 1), разделенных плато, где деформация происходит монотонно и однородно без скачков и деформационных полос. Последние зарождаются и распространяются только на фронтах деформационных ступеней.

Каждая деформационная ступень сопровождается всплеском АЭ как в низкочастотной области  $U_1(t)$ , регистрируемой низкочастотным датчиком D1, так и в высокочастотной области  $U_2(t)$ , регистрируемой датчиком D2 (рис. 2, кривые 3 и 4 соответственно). Спектры мощности этих сигналов содержат характерные пики в частотных

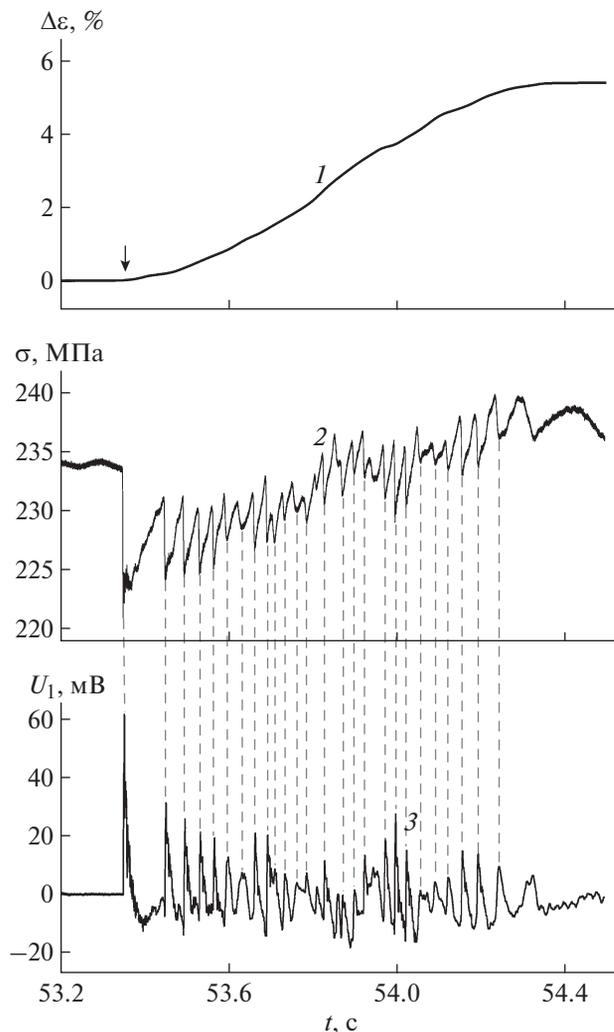


**Рис. 2.** Фрагменты (без образования шейки и разрыва образца) ступенчатой кривой деформации  $\epsilon$  (1), роста напряжения  $\sigma$  (2) со скоростью  $\dot{\sigma}_0 = 0.6$  МПа/с, сигналов низкочастотной  $U_1$  (3) и амплитуды высокочастотной  $U_2$  (4) акустической эмиссии.

диапазонах  $\sim 30\text{--}400$  Гц (для  $U_1$ ) и  $\sim 0.1\text{--}1.2$  МГц (для  $U_2$ ).

Форма деформационной ступени, т.е. временная зависимость приращения деформации  $\Delta\epsilon(t)$  на фронте ступени близка к сигмоидальной логистической кривой с характерным временем нарастания (длительностью фронта) около 600 мс (рис. 3, кривая 1). Силовой отклик (рис. 3, кривая 2) содержит более десятка скачков напряжения с амплитудой  $\sim 3\text{--}10$  МПа и длительностью переднего фронта  $\sim 1\text{--}3$  мс. Такой прерывистый силовой отклик, аналогичный эффекту ПЛШ, связан с инерционностью механической системы машина–образец [6].

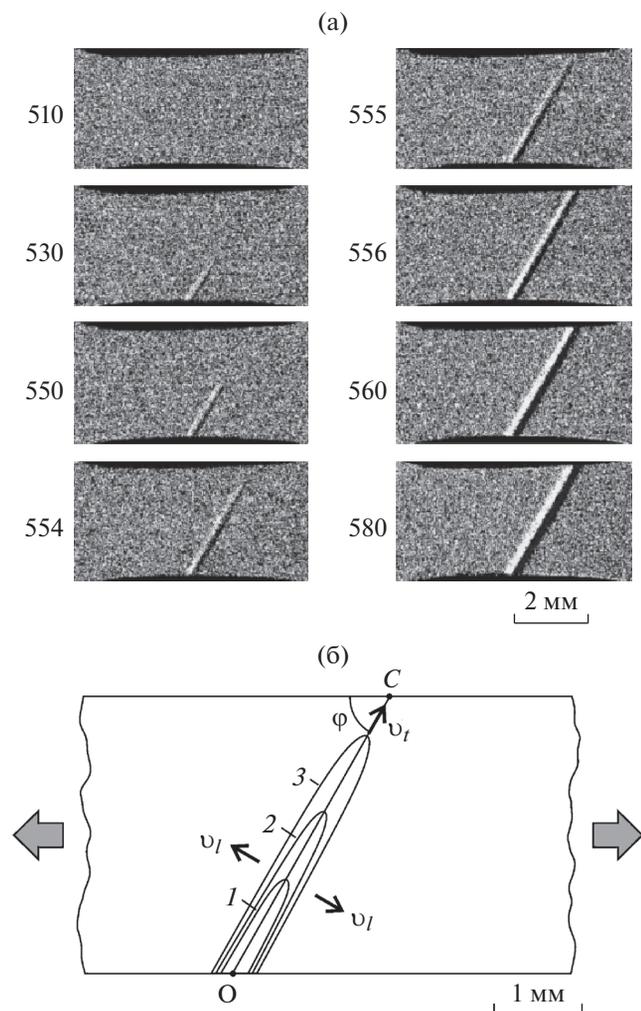
Следует отметить, что, как было установлено в [6], каждый скачок напряжения связан с появлением, как правило, одной деформационной полосы, которая имеет форму расширяющейся шейки. С помощью видеосъемки со скоростью 500 кадр/с установлено, что эволюция каждой полосы характеризуется двумя последовательными



**Рис. 3.** Синхронная запись датчиков деформации (1), усилия (2) и низкочастотной акустической эмиссии (3) в ходе развития скачка деформации – ступени с амплитудой 6% на кривой нагружения сплава АМгб. Стрелкой отмечен момент появления первичной полосы деформации.

стадиями, быстрой и медленной. Быстрая стадия длительностью  $\sim 1\text{--}3$  мс сопровождается резкой разгрузкой механической системы с амплитудой до  $\sim 10$  МПа, в то время как медленная стадия расширения длительностью  $\sim 10\text{--}100$  мс сопровождается непрерывным восстановлением напряжения почти до исходного значения.

Как видно из рис. 3, каждый скачок напряжения сопровождается всплеском низкочастотного сигнала АЭ. Первое акустическое колебание в структуре всплеска АЭ происходит одновременно с резкой разгрузкой механической системы, а следовательно, с начальной быстрой стадией эволюции деформационной полосы, которая включает в себя процессы зарождения и быстрого расширения новой полосы продолжительностью



**Рис. 4.** Фрагмент видеозаписи со скоростью 20 000 кадр/с роста полосы деформации (а). Последовательные контуры иглообразного зародыша полосы в разные моменты времени от момента зарождения: 1 – 2.6, 2 – 3.6, 3 – 3.8 мс (кадры 530, 550, 554 соответственно) (б).

~1–3 мс. Последующие затухающие колебания в структуре всплеска АЭ происходят одновременно с непрерывным восстановлением напряжения, которое связано с медленной стадией (без каких-либо нерегулярностей) расширения деформационной полосы [6]. Поэтому затухающие колебания после первого колебания с максимальной амплитудой в структуре всплеска АЭ (рис. 3, кривая 3) не связаны с какими-либо релаксационными процессами в деформируемом материале, а связаны с возбуждением собственных колебаний механической системы машина–образец. Таким образом, только первое акустическое колебание в структуре всплеска АЭ несет информацию о динамике деформационной полосы, а именно, о зарождении и начальной быстрой стадии эволюции полосы.

Ниже представлены основные экспериментальные результаты исследования взаимосвязи динамики индивидуальных деформационных полос с особенностями дискретной АЭ в низко- и высокочастотном диапазонах.

*Особенности кинетики и морфологии индивидуальной полосы деформации.* В [5, 6, 19] показано, что основным механизмом развития деформационного скачка в условиях эффекта Савара–Массона и прерывистой ползучести является размножение полос деформации, когда каждая новая полоса, за исключением первичной полосы деформации, возникает на границе предыдущей полосы. Первичная полоса, зародившаяся спонтанно в случайной позиции на поверхности рабочей части образца, является триггером развития деформационной ступени.

Рассмотрим более подробно раннюю стадию зарождения и эволюции первичной полосы деформации в течение ~1 мс, чтобы понять тонкие особенности корреляции между зарождением пластической локализации, характеристиками сигнала АЭ и силовым откликом  $\sigma(t)$ . На рис. 4 представлен фрагмент видеозаписи со скоростью 20 000 кадр/с процесса формирования первичной полосы деформации, которая является триггером развития деформационной ступени с амплитудой 4%. Как видно из данного фрагмента видеосъемки, полоса зарождается в случайной позиции на боковой поверхности образца, обычно в середине его рабочей части. Затем “зародыш” полосы (*embryo band* [20]), т.е. незавершенная полоса, растет поперек фронтальной поверхности ( $6 \times 3$  мм) под углом  $\varphi \approx 58^\circ\text{--}62^\circ$  (рис. 4,  $\varphi \approx 58^\circ$ ) к оси растяжения.

Продолжительность поперечного роста зародыша обычно составляет несколько миллисекунд при приложенном напряжении 250–300 МПа. Этот вывод качественно согласуется с ростом зародышей полос ПЛШ в сплавах системы Al–Mg, деформированных в жесткой испытательной машине с постоянной скоростью растяжения  $\dot{\epsilon}_0 = \text{const}$  [20–24]. Вместе с тем более высокое пространственно-временное разрешение видеосъемки, используемой в настоящей работе (20 мкм/пиксель и 50 мкс), позволило выявить некоторые важные особенности в кинетике и геометрии полос деформации на ранних стадиях их формирования. Анализ данных видеосъемки нескольких десятков деформационных полос позволили сделать следующие выводы.

1. Зародыш полосы имеет иглообразную форму с приблизительно параболическим контуром вершины полосы (рис. 4а). Кинетика роста зародыша характеризуется скоростью движения вершины  $v_t$  и скоростью бокового роста  $v_l$ , которая по крайней мере на порядок меньше, чем  $v_t$ . Вектор скорости вершины составляет угол  $\varphi \approx 60^\circ \pm 2^\circ$  с осью растяжения, что близко к направле-

нию максимальных касательных напряжений (для изотропного пластически деформируемого плоского образца  $\varphi = 55^\circ 44'$  [25]). На рис. 4б показан пример обработки изображений во фрагменте видеосъемки, показанном на рис. 4а, в виде последовательных контуров растущего зародыша полосы. Вершина полосы достигает противоположного края образца в точке *C* в момент времени  $t_{cr}$ . Этот момент будем называть “критическим” в том смысле, что это момент достижения максимальной скорости вершины  $v_{max} = v_t(t_{cr})$ ; после момента времени  $t_{cr}$  зародыш полосы (незавершенная полоса) становится полностью завершенной полосой; этот момент является триггерной точкой для силового отклика  $\Delta\sigma(t)$  и низкочастотного акустического отклика  $U_1(t)$ . Очевидно, в этот момент длина  $L_b$  и ширина  $w_b$  зародыша достигают своих максимальных значений:  $L_b(t_{cr}) \approx 2d_s/\sqrt{3} \approx 3.5$  мм и  $w_b(t_{cr}) \approx 2w_s \approx 0.4$  мм, где  $d_s$  (3 мм) и  $w_s$  (0.2 мм) – ширина и толщина образца соответственно.

2. Рост зародыша полосы является существенно нестационарным и нелинейным, так как при почти неизменной внешней нагрузке (за время его роста напряжение падает не более чем на 0.3% от действующего напряжения) скорость вершины растет, особенно резко в непосредственной близости от противоположного края образца, т.е. вблизи точки *C* на рис. 4б. Если в первой трети длины зародыша полосы средняя скорость его вершины не превышает 0.5 м/с, то в критический момент времени  $t_{cr}$ , когда зародыш пересекает полное поперечное сечение образца, скорость вершины достигает порядка 10 м/с, а боковая скорость не более 10 см/с. В примере, показанном на рис. 4,  $v_t(t_{cr}) \approx 12$  м/с,  $v_l(t_{cr}) \approx 6$  см/с. Как видно из рис. 4, в последние 0.4–0.5 мс роста зародыша наблюдаются резкие скачки скорости вершины амплитудой  $\Delta v_t \approx 1–3$  м/с. После момента  $t_{cr}$  динамика завершенной полосы определяется только скоростью бокового роста  $v_l$ . В последующие моменты времени скорость бокового роста и, следовательно, скорость расширения полосы падают до нуля и на границах полосы зарождаются вторичные полосы в соответствии с каскадным механизмом размножения деформационных полос [6]. Отметим, что в экспериментах с низким временным разрешением ( $>10$  мс) быстротечная стадия роста зародыша полосы не детектируется, а измеряется только проекция боковой скорости завершенной полосы на ось растяжения, т.е.  $v_a = v_l \sin \varphi$ .

Сравним наблюдаемые особенности ранней стадии эволюции полос деформации с возможными механизмами формирования деформационных полос, известными из литературы. Авторы работы [4] предложили три гипотетических сце-

нария поперечного роста зародыша полосы на основе экспериментов, выполненных с низким временным разрешением, 25 кадр/с, когда зародыш полосы экспериментально не выявляется. Согласно первому сценарию ширина зародыша полосы в ходе роста не изменяется и конечная ширина полосы равна ее ширине в момент зарождения. Второй сценарий предполагает поперечный рост зародыша толщиной несколько межатомных расстояний. После “простреливания” такой тонкой полосы через все сечение образца начинается расширение полосы в направлении оси растяжения, которое продолжается до тех пор, пока оно не будет подавлено вследствие релаксации напряжения. Третий сценарий представляет “гибрид” этих двух типов, т.е. рассматривает зародыш в виде клина в ходе поперечного роста. Представленные здесь результаты показывают, что зародыш растет самоподобно с определенным соотношением между скоростью вершины и боковой скоростью роста, т.е. геометрия его роста соответствует скорее третьему сценарию, что качественно согласуется с результатами экспериментальных работ [20, 22, 24].

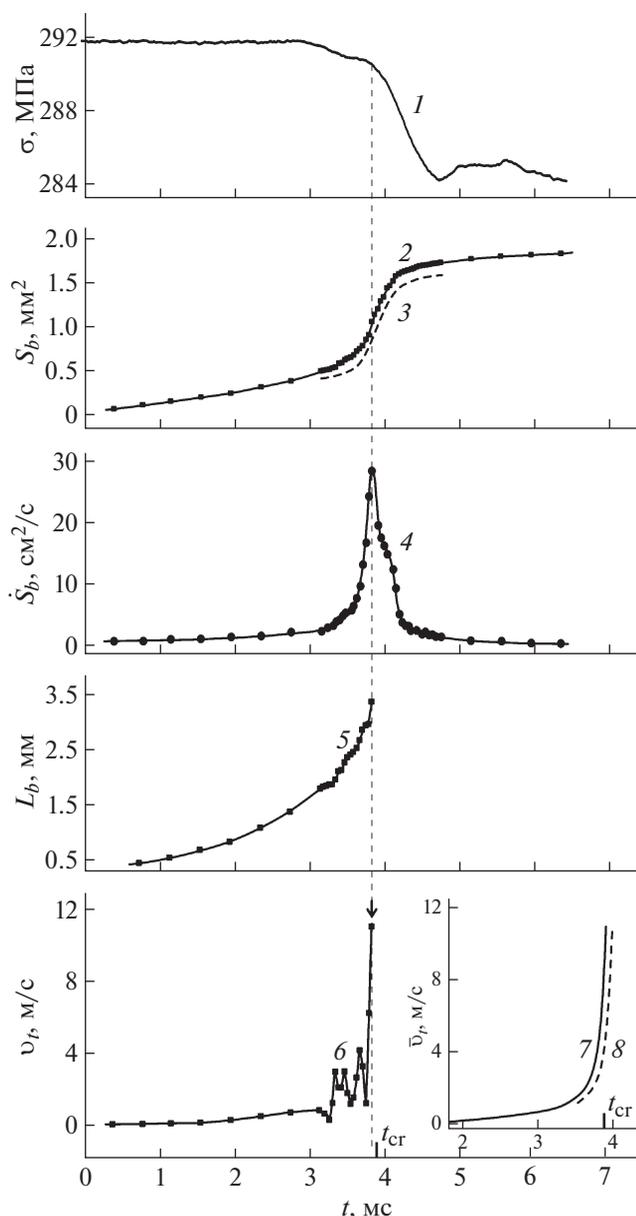
На рис. 5 представлены записи скачка разгрузки  $\sigma$  (кривая 1) и временные зависимости площади  $S$  полосы (кривая 2), т.е. площади, заключенной внутри контура полосы, и ее производной по времени  $\dot{S} = dS/dt$  (кривая 4), длины полосы  $L_b$  (кривая 5) и скорости вершины  $v_t$  (кривая 6). Как видно, в момент времени  $t_{cr}$  величины  $L_b$ ,  $\dot{S}$  и  $v_t$ , характеризующие кинетику зародыша полосы, достигают максимальных значений. В то же время силовой отклик  $\sigma(t)$  стартует непосредственно после момента  $t_{cr}$ . Это означает, что ускоренный и скачкообразный рост полосы зародыша происходит в условиях приближенного постоянства приложенного напряжения, что свидетельствует о нелинейной динамике первичной полосы в дополнение к спонтанности процесса зарождения полосы. Последующая релаксация напряжения подавляет скорость расширения завершенной полосы (рис. 5, кривые 1–3).

Наблюдаемый нестационарный рост зародыша полосы представляет особый интерес и требует глубокого изучения. Здесь важно привести два эмпирических соотношения, которые могут быть полезны для моделирования растущей полосы деформации.

Кривая роста площади полосы  $S(t)$  хорошо аппроксимируется логистической функцией Колмогорова–Вейбула [26] (кривые 2 и 3 на рис. 5):

$$S(t) = S_0 \{1 - \exp[-(t/\tau_1)^{d_f}]\}, \quad (1)$$

где  $S_0$  – максимальное значение площади полосы после окончания скачка напряжения,  $\tau_1$  – постоянная времени роста площади полосы,  $d_f$  – раз-



**Рис. 5.** Кинематические характеристики деформационной полосы, записанные синхронно со скачком разгрузки: 1 – скачок разгрузки  $\sigma(t)$ , 2 – площадь полосы  $S$ , 3 – функция Колмогорова–Вейбула (1), 4 – скорость роста площади полосы  $\dot{S}$ , 5 – длина  $L_b$  зародыша полосы, 6 – скорость вершины полосы  $v_t$ . На вставке: 7 – осредненная (без скачков) скорость вершины  $\bar{v}_t$ , 8 – экспоненциальная функция (2). Стрелкой отмечен момент  $t_{cr}$  выхода зародыша полосы на противоположную боковую поверхность образца.

мерность задачи. Функция (1) моделирует массовый рост популяции с учетом размножения и иммобилизации. Корреляционный анализ, выполненный с помощью пакета программ MathCad, показал, что максимальный коэффициент корреляции  $k = 0.9998$  соответствует постоянной времени роста площади полосы  $\tau_1 = 0.47$  мс и раз-

мерности  $d_f = 2.5$ . Высокий коэффициент корреляции экспериментальной зависимости  $S(t)$  и функции (1) и дробная размерность косвенно свидетельствуют о внутренней (фрактальной) структуре полосы, а именно, что она состоит из большого количества элементов (например, микроскопических дислокационных скоплений), которые распространяются с размножением и иммобилизацией. Последнее вызывает падение скорости расширения и может быть связано с релаксацией напряжения.

Второе соотношение

$$\bar{v}_t \sim \exp(t/\tau_2), \quad (2)$$

где  $\tau_2$  – постоянная времени ускоренного роста вершины полосы, хорошо аппроксимирует осредненную кривую  $\bar{v}_t(t)$  (вставка на рис. 5, кривые 7 и 8) с коэффициентом корреляции 0.9981 при  $\tau_2 = 0.13$  мс и косвенно свидетельствует о том, что рост зародыша полосы – процесс, охваченный положительной обратной связью. Последняя может быть обусловлена ростом концентрации напряжения в голове зародыша по мере его приближения к противоположному краю образца (к точке С на рис. 4а). Рост напряжения увеличивает скорость дислокации в голове зародыша полосы. Соответствующее увеличение длины зародыша уменьшает “живое” сечение (между вершиной и точкой С), что вызывает дальнейшее увеличение концентрации напряжения в дополнение к растущим напряжениям несоответствия между пластически деформируемыми и недеформируемыми областями материала, которые зависят не только от лапласиана деформационного поля [27], но и от градиента скорости пластического течения в вершине полосы. Учитывая пороговый характер дислокационной динамики (критическое напряжение отрыва дислокаций от стопоров, критические напряжения размножения дислокаций и т.д.), непрерывный рост концентрации напряжений в голове зародыша полосы будет вовлекать в процесс роста новые дислокации, что является дополнительным фактором положительной обратной связи.

*Динамика индивидуальной полосы деформации и сигналы АЭ.* Нестационарный поперечный рост зародыша полосы и выход его на противоположную боковую поверхность образца сопровождаются сигналами АЭ в широкой полосе частот. Сигналы низкочастотного D1 и высокочастотного D2 акустических датчиков синхронно с силовым откликом и данными обработки видеосъемки роста зародыша представлены на рис. 6. Важной характеристикой силового отклика, отражающего неустойчивость пластической деформации, является абсолютное значение его производной по времени:  $\psi(t) = |d\sigma(t)/dt|$ . Этот временной ряд был использован для характеристики прерыви-

стой деформации ПЛШ в сплавах системы Al–Mg [28–32]. Из рис. 6 видно, что функция  $\psi(t)$ , соответствующая отдельному скачку напряжения, имеет вид гауссианы (кривая 2), максимум которой примерно совпадает с максимумом низкочастотного сигнала АЭ (кривая 3).

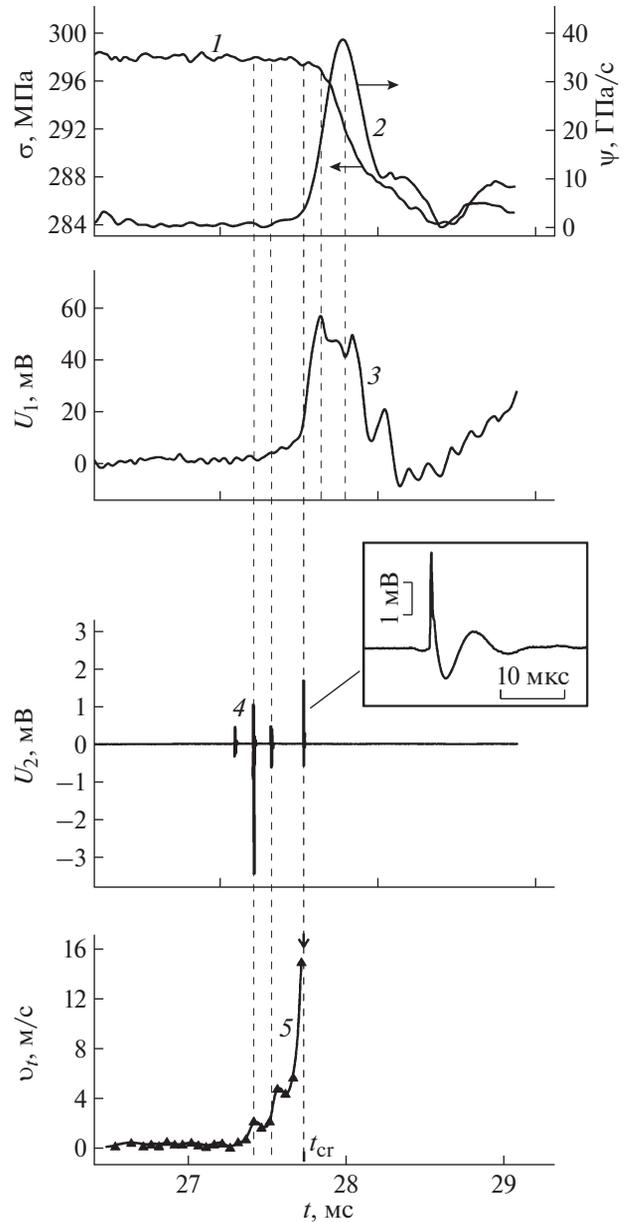
Резкие изменения функции  $\psi(t)$  и низкочастотного сигнала АЭ  $U_1(t)$  происходят только после момента времени  $t_{cr}$ , т.е. после выхода зародыша полосы на противоположную поверхность образца. Оба сигнала  $\psi(t)$  и  $U_1(t)$  достигают своих пиковых значений примерно через 0.2–0.4 мс после момента времени  $t_{cr}$ .

Важно подчеркнуть, что существует четкая корреляция сигнала АЭ  $U_1(t)$  и функции  $\psi(t)$  по крайней мере до конца скачка разгрузки  $\sigma(t)$  (рис. 6, кривые 1–3). На этом временном интервале коэффициент корреляции между формой сигнала АЭ и функцией  $\psi(t)$  относительно высок  $k = 0.9851$ . После окончания скачка разгрузки возбуждаются собственные колебания механической системы машина–образец и корреляция между этими сигналами падает.

Таким образом, резкое увеличение скорости падения напряжения и рост низкочастотного сигнала АЭ наблюдаются только после образования завершённой полосы деформации в результате движения большого количества дислокаций через полное поперечное сечение и их коллективного выхода на внешнюю поверхность образца.

Сигнал  $U_2(t)$  высокочастотного акустического датчика D2 хорошо коррелирует со скачками скорости вершины полосы-зародыша  $v_t$  (рис. 6, кривые 4 и 5). Отдельные сигналы  $U_2(t)$  имеют длительность  $\sim 3\text{--}10$  мкс с длительностью переднего фронта около 1 мкс, а в спектре мощности наблюдаются в основном пики на частотах от 0.1 и 1.2 МГц. Дискретные микросекундные сигналы АЭ возникают приблизительно одновременно со скачками скорости вершины полосы, обработанными с временным разрешением 50 мкс. Эти сигналы наблюдаются, как правило, в последние 0.4 мс роста зародыша, когда его длина  $L_b$  превышает приблизительно половину ширины образца.

Дискретные акустические сигналы  $U_2(t)$ , связанные с микросекундными скачками скорости  $v_t$  полосы-зародыша, естественно отнести не к одновременному скачку скорости всех дислокаций в полосе деформации (такая высокая степень синхронизации поведения дислокаций маловероятна), а скорее к осцилляциям скорости только небольшой части макроскопического дислокационного ансамбля полосы, а именно, его вершины. Поэтому дискретные высокочастотные сигналы АЭ отражают не макро-, а мезоскопический уровень пластической неустойчивости, связанный с ди-



**Рис. 6.** Синхронизация акустических сигналов с силовым откликом и кинетической кривой роста полосы-зародыша: 1 – силовый отклик  $\sigma(t)$ , 2 – скорость роста силового отклика  $\psi = |\dot{\sigma}(t)|$ , 3 – низкочастотный сигнал АЭ  $U_1(t)$ , 4 – высокочастотный сигнал АЭ  $U_2(t)$ , 5 – кривая роста  $v_t(t)$  зародыша полосы. На вставке – типичная осциллограмма высокочастотного сигнала АЭ.

намикой структурных составляющих растущей деформационной полосы.

Таким образом, зарождение, рост и выход на противоположную поверхность зародыша полосы сопровождаются весьма широкополосным акустическим сигналом в полосе частот от  $\sim 100$  Гц до не менее чем  $\sim 1$  МГц (около четырех порядков). Из представленных результатов следует, что

низкочастотная составляющая сигнала АЭ в полосе  $\sim 10^2$ – $10^3$  Гц отвечает за макроскопическое поведение полосы как целое, включая стадии роста зародыша полосы и расширения завершённой полосы (более длительная и медленная стадии расширения полосы, не представленные в работе, продолжительностью более  $\sim 100$  мс включают в себя более низкие частоты вплоть до  $\sim 10$  Гц). В то же время высокочастотная составляющая акустического сигнала (регистрируемая датчиком D2) с характерными частотами  $\sim 0.1$ – $1$  МГц несет информацию о мезоскопических событиях в структуре полосы, связанных со скачками скорости головной части макроскопического дислокационного ансамбля полосы деформации.

Таким образом, основной вклад во всплеск АЭ дает образование завершённой полосы, что сопровождается появлением дислокаций на внешней поверхности образца. Эти экспериментальные данные согласуются с механизмом генерации АЭ дислокациями, выходящими на поверхности образца [33, 34]. Кроме того, можно предположить, что, когда зародыш достигает внешней поверхности образца, перенапряжения вблизи его вершины могут релаксировать по крайней мере четырьмя возможными каналами: разрушение оксидного слоя, который является более прочным и хрупким, чем алюминиевая матрица; образование свежей ступенчатой поверхности, связанное с кооперативным появлением большого количества дислокаций на внешней поверхности образца (в этом случае некоторая часть энергии деформации в полосе преобразуется в поверхностную энергию во время формирования новой внешней поверхности); зарождение нового зародыша полосы, ориентированного в противоположном направлении; генерация упругих колебаний, т.е. всплеск АЭ. Таким образом, пик АЭ совпадает с появлением полосы на поверхности образца, т.е. с моментом образования завершённой полосы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью высокоскоростных измерений исследована корреляция между динамикой полос деформации, скачками напряжения и сигналами АЭ в условиях прерывистой деформации в поликристаллическом алюминий-магниевого сплаве АМгб при комнатной температуре.

Обнаружено, что неустойчивость пластической деформации начинается с зарождения и последующего расширения первичной полосы деформации, которая является триггером развития макроскопической ступени деформации на кристаллической поверхности с амплитудой в несколько процентов и длительностью фронта 0.5–0.7 с. Формирование первичной и последующих полос деформации сопровождается скачками напряжения и

дискретными сигналами АЭ в полосе частот  $\sim 10^2$ – $10^6$  Гц.

Самым быстрым этапом в эволюции полосы деформации являются зарождение и рост иглообразного зародыша, который спонтанно возникает в случайной позиции на боковой поверхности образца и растёт под углом около  $60^\circ$  относительно оси растяжения. Скорость вершины зародыша полосы постепенно увеличивается и достигает максимального значения  $\sim 10$  м/с в момент времени, когда эта полоса пересекает все поперечное сечение образца. Далее динамика завершённой полосы определяется только скоростью расширения, которая обычно не превышает  $\sim 10$  см/с.

Установлено, что скачок напряжения и всплеск АЭ начинаются сразу после формирования завершённой полосы, а первый пик во всплеске АЭ со временем нарастания  $\sim 1$  мс хорошо коррелирует с пиком скорости падения напряжения. Установленная корреляция представляет собой прямое экспериментальное обоснование многочисленных статистических исследований АЭ, сопровождающей механические испытания кристаллов (например, [13–17]).

Зарождение, рост и выход на противоположную поверхность зародыша полосы сопровождаются широкополосным акустическим сигналом в полосе частот от  $\sim 10^2$ – $10^6$  Гц. Низкочастотная составляющая сигнала АЭ в полосе  $\sim 10^2$ – $10^3$  Гц отвечает за макроскопическое поведение полосы как целого, включая стадии роста зародыша полосы и расширения завершённой полосы. В то же время высокочастотная составляющая АЭ в полосе  $\sim 0.1$ – $1$  МГц несет информацию о мезоскопических событиях в структуре полосы, связанных со скачками скорости головной части макроскопического дислокационного ансамбля полосы деформации.

Наиболее вероятными механизмами генерации сигналов АЭ являются скачки скорости зародыша полосы, а также образование завершённой полосы за счёт зарождения и быстрого перемещения большого числа дислокаций через полное поперечное сечение и их выхода на внешнюю поверхность образца.

Отметим, что с точки зрения нелинейной динамики самопроизвольное образование полосы деформации, которая вызывает нестационарные одномерные отклики в виде сигналов АЭ и скачков напряжения под действием заданной внешней нагрузки, представляет яркий пример нелинейного явления в физическом материаловедении со многими аналогиями в физических, химических и биологических системах различной природы, когда неустойчивости в виде пространственно-временных структур спонтанно возникают и распространяются в динамически определённой системе [35]. С практической точки зре-

ния наблюдаемые корреляции между сигналами АЭ и процессами формирования полос могут служить научной основой для разработки методов ранней диагностики локализаций деформации в сплавах, которые демонстрируют прерывистую деформацию. Последующие исследования корреляций между динамикой полос деформации и акустическим и силовым откликами позволят идентифицировать события нестабильной пластической деформации по характеристикам сигналов АЭ и выявлять связи между этими событиями, используя только измерения АЭ, что является привлекательным для практического применения.

Высокоскоростные оптические исследования динамики деформационных полос выполнены при частичной поддержке Российского научного фонда (грант № 18-19-00304), акустические исследования с помощью комплекса Vallen-Systeme — при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) (грант № 19-38-90145 Аспиранты), анализ полученных экспериментальных данных при поддержке РФФИ (грант № 19-08-00395).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Savart F.* // Ann. Chim. Phys. 1837. V. 65. P. 337.
2. *Andrade E.N. da C.* // Proc. Roy. Soc. 1910. V. 84. P. 1.
3. *Portevin A., Le Chatelier F.* // Seances Acad. Sci. 1923. V. 176. P. 507.
4. *Chihab K., Estrin Y., Kubin L.P., Vergnol J.* // Scripta Metall. 1987. V. 21. P. 203.
5. *Шибков А.А., Золотов А.Е., Желтов М.А.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2012. Т. 76. № 1. С. 97.
6. *Shibkov A.A., Gasanov M.F., Zheltov M.A. et al.* // Int. J. Plast. 2016. V. 86. P. 37.
7. *Rizzi E., Hahner P.* // Int. J. Plast. 2004. V. 20. P. 121.
8. *Yilmaz A.J.* // Sci. Technol. Adv. Mater. 2011. V. 12. P. 1.
9. *Шибков А.А., Желтов М.А., Лебедкин М.А. и др.* // Заводская лаборатория. 2005. № 7. Т. 71. С. 20.
10. *Шибков А.А., Золотов А.Е.* // Письма в ЖЭТФ. 2009. Т. 90. № 5. С. 412.
11. *Криштал М.М., Мерсон Д.Л.* // Физика металлов и металловедение. 1996. Т. 81. № 1. С. 155.
12. *Криштал М.М., Хрусталева А.К., Разуваев А.А., Демин И.С.* // Деформация и разрушение материалов. 2008. № 1. С. 28.
13. *Lebyodkin M.A., Lebedkina T.A., Chmelik F. et al.* // Phys. Rev. B. 2009. V. 79. P. 174114.
14. *Shashkov I.V., Lebyodkin M.A., Lebedkina T.A.* // Acta Mater. 2012. V. 60. P. 6842.
15. *Vinogradov A., Orlov D., Danyuk A., Estrin Y.* // Acta Mater. 2013. V. 61. P. 2044.
16. *Lebyodkin M.A., Shashkov I.V., Lebedkina T.A., Gornakov V.S.* // Phys. Rev. E. 2017. V. 95. P. 032910.
17. *Lebedkina T.A., Zhemchuzhnikova D.A., Lebyodkin M.A.* // Phys. Rev. E. 2018. V. 97. P. 013001.
18. *Louche H., Bouabdallah K., Vacher P. et al.* // Experimental Mechanics. 2008. V. 48. P. 741.
19. *Шибков А.А., Золотов А.Е., Желтов М.А. и др.* // Журн. техн. физики. 2014. Т. 84. № 4. С. 40.
20. *Tong W., Tao H., Zhang N. Et al.* // Scripta. Mater. 2005. V. 53. P. 87.
21. *Xiang G.F., Zhang Q.C., Liu H.W. et al.* // Scripta. Mater. 2007. V. 56. P. 721.
22. *Горбатенко В.В., Данилов В.И., Зуев Л.Б.* // Журн. техн. физики. 2017. Т. 87. С. 372.
23. *Криштал М.М.* // Митом. 2003. № 4. С. 26.
24. *Криштал М.М., Хрусталева А.К., Волков А.В., Бородин С.А.* // Докл. РАН. 2009. Т. 426. № 1. С. 36.
25. *Hill R.* The mathematical theory of plasticity. Clarendon: Oxford, 1998. 335 p.
26. *Колмогоров А.Н.* // Изв. АН СССР. Сер. мат. 1937. № 3. С. 355.
27. *Zbib H.M., Aifantis E.C.* // Scripta Metall. 1988. V. 22. P. 1331.
28. *Bharathi M.S., Lebyodkin M., Ananthakrishna G. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2001. V. 87. P. 165508.
29. *Bharathi M.S., Lebyodkin M., Ananthakrishna G. et al.* // Acta Mater. 2002. V. 50. P. 2813.
30. *Lebyodkin M.A., Estrin Y.* // Acta Mater. 2005. V. 53. P. 3403.
31. *Lebyodkin M.A., Lebedkina T.A.* // Phys. Rev. E. 2006. V. 73. P. 036114.
32. *Lebyodkin M.A., Lebedkina T.A.* // Phys. Rev. E. 2008. V. 77. P. 026111.
33. *Нацук В.Д.* // Письма в ЖЭТФ. 1968. Т. 8. С. 324.
34. *Нацук В.Д., Чушко К.А.* // Акуст. журн. 1982. № 28. № 3. С. 381.
35. *Kessler D.A., Koplik J.A.* // Adv. Phys. 1988. V. 37. P. 255.