

01,07

## Нелинейная динамика индивидуальных полос деформации Портевена–Ле Шателье

© А.А. Шибков, А.Е. Золотов, М.Ф. Гасанов, А.А. Денисов, Р.Ю. Кольцов, С.С. Кочегаров

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

E-mail: shibkovaleks@mail.ru

Поступила в Редакцию 8 июля 2022 г.

В окончательной редакции 8 июля 2022 г.

Принята к публикации 9 июля 2022 г.

На основе высокоскоростных исследований динамики зародышевых полос деформации Портевена–Ле Шателье с временным разрешением до  $20 \mu\text{s}$  и пространственным до  $10 \mu\text{m}/\text{px}$  предложена их классификация, которая насчитывает четыре типа полос в зависимости от характера взаимодействия с другими полосами и поверхностью образца (на примере поликристаллического алюминий-магниевого сплава). Установлено, что все типы зародышевых полос демонстрируют нелинейную динамику с резким ускорением вершины полосы и скорости роста ее объема на завершающей стадии перед выходом на поверхность образца. Предложена феноменологическая модель нелинейного роста зародышевой полосы, которая качественно объясняет экспоненциальную стадию саморазгона, наблюдаемую экспериментально. Обсуждается резкое поглощение акустического шума на стадии ускоренного роста полосы.

**Ключевые слова:** нелинейная динамика, эффект Портевена–Ле Шателье, полосы деформации, акустическая эмиссия, подвижность дислокаций, алюминий-магниевый сплав.

DOI: 10.21883/FTT.2022.11.53311.429

### 1. Введение

Прерывистая деформация металлов и сплавов — эффект Портевена–Ле Шателье (ПЛШ) — яркое нелинейное явление в физическом материаловедении, состоящее в спонтанной (самоорганизующейся) автолокализации пластической деформации в динамически определенных ситуациях, когда заданы скорость деформирования  $\dot{\epsilon}_0$  или скорость нагружения  $\dot{\sigma}_0$  соответственно [1–7]. Интерес к прерывистой деформации и полосообразованию связан не только с изучением нелинейных эффектов в макрокинетики пластически деформируемого материала, обусловленных пространственно-временной самоорганизацией больших дислокационных ансамблей, но и с практическим применением металлических сплавов, демонстрирующих эффект ПЛШ (сплавы на основе алюминия, меди, титана, циркония, среднелегированные стали и пр., особенно высокотехнологичные алюминиевые сплавы, используемые в авиакосмической и транспортной отраслях). Полосы макролокализованной деформации негативно влияют на качество поверхности промышленных изделий, вызывают локальную коррозию и непосредственно участвуют в механизме зарождения и развития магистральной трещины [8–10].

Обычно различают три основных типа полос ПЛШ (типы А, В, С), каждый из которых соответствует вполне определенной форме и последовательности скачков напряжения на кривых деформирования [4]. Полосы типа С возникают в случайных позициях на поверхности образца и не распространяются. Они сопровождаются редкими скачками разгрузки большой амплитуды.

Полосы типа В распространяются в скачкообразной манере с приблизительно равными интервалами. Полосы типа А распространяются непрерывно подобно уединенной волне (солитоноподобное поведение) с произвольно локализованными скачками напряжения на кривой растяжения. Переходы между различными типами полос  $C \rightarrow B \rightarrow A$  и соответствующими типами скачков напряжения происходят с ростом скорости деформирования (в интервале  $\sim 10^{-6} - 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  для сплавов Al–Mg при комнатной температуре [11–15]).

Предложенная в [4] феноменологическая классификация полос ПЛШ по характеру распространения основана на экспериментальной методике регистрации полос с довольно низким временным и пространственным разрешением — видеосъемка TV-камерой со скоростью 25 fps (frames per second) и разрешением  $100 \mu\text{m}/\text{px}$ . Видеосъемка со скоростью 500 fps и разрешением  $8 \mu\text{m}/\text{px}$  показала, что „прыгающая“ полоса типа В представляет собой пространственно-временную структуру из нескольких деформационных полос, каждая из которых, за исключением первичной (материнской), зарождается на границе предыдущей полосы и расширяется таким образом, что ее „центр тяжести“ остается неподвижным. В результате эстафетной передачи деформации от одной полосы к другой, когда новая полоса зарождается на границе предыдущей, макролокализованная деформация распространяется вдоль направления растяжения образца [6,16].

Дальнейшее увеличение скорости видеосъемки поверхности деформируемого образца до 5000 fps позволило выявить стадию роста зародышевой полосы

в направлении максимальных касательных напряжений, составляющих угол  $58\text{--}63^\circ$  к оси растяжения [17–19], а видеосъемка со скоростью 25 000 fps выявляет эллиптическую форму контура зародышевой полосы и скачки скорости ее вершины и момент выхода на противоположную боковую поверхность образца, т.е. момент формирования завершенной полосы деформации [20,21]. Характерные времена в эволюции зародышевой полосы  $\sim 0.1\text{--}1\text{ ms}$  меньше длительности фронта последующего скачка разгрузки ( $\sim 1\text{--}3\text{ ms}$ ) и соответственно значительно меньше времени между скачками. Поэтому процессы, отвечающие за появление и рост зародышевой полосы, представляют самостоятельный объект исследования, непосредственно не связанный с динамическим поведением типа А, В, С, которые характеризуются различной степенью восстановления напряжения после очередного скачка разгрузки в зависимости от температурно-скоростных условий деформирования.

Как видно, увеличение временного разрешения на 3 порядка (от 25 до 25000 fps) и пространственного в несколько раз (от  $\sim 100$  до  $8\text{ }\mu\text{m/px}$ ) позволило выявить существенные особенности геометрии и динамики индивидуальных деформационных полос на самой ранней стадии их эволюции, продолжительностью до  $\sim 1\text{ ms}$ , которые не зависят от типа динамического поведения А, В, С и типа испытательной машины (жесткая или мягкая), и поэтому носят универсальный характер, связанный с природой возникновения пластической неустойчивости, приводящей к явлению прерывистой деформации ПЛШ.

Таким образом, в последнее десятилетие появились работы, которые рассматривают первую миллисекунду эволюции деформационной полосы как самостоятельный объект изучения. Экспериментальное исследование *in situ* „миллисекундной динамики“ формирования индивидуальных полос требует использования методов с достаточно высоким временным и пространственным разрешением — видеосъемку поверхности деформируемого образца со скоростью не менее  $\sim 5000\text{ fps}$  с соответствующей компьютерной программой обработки изображений синхронно с другими быстродействующими методами, например, методом акустической эмиссии (АЭ) и т.д. Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию *in situ* эволюции зародышевых полос (embryo bands) видеосъемкой поверхности деформируемого образца со скоростью до 50000 fps и методом АЭ. В качестве материала исследования был выбран поликристаллический алюминий-магний сплав АМг6, демонстрирующий явно выраженную прерывистую деформацию и полосообразование при комнатной температуре.

## 2. Методика

Образцы промышленного алюминий-магниевого сплава (AA5059) АМг6 (Al — 6.15% Mg — 0.65%

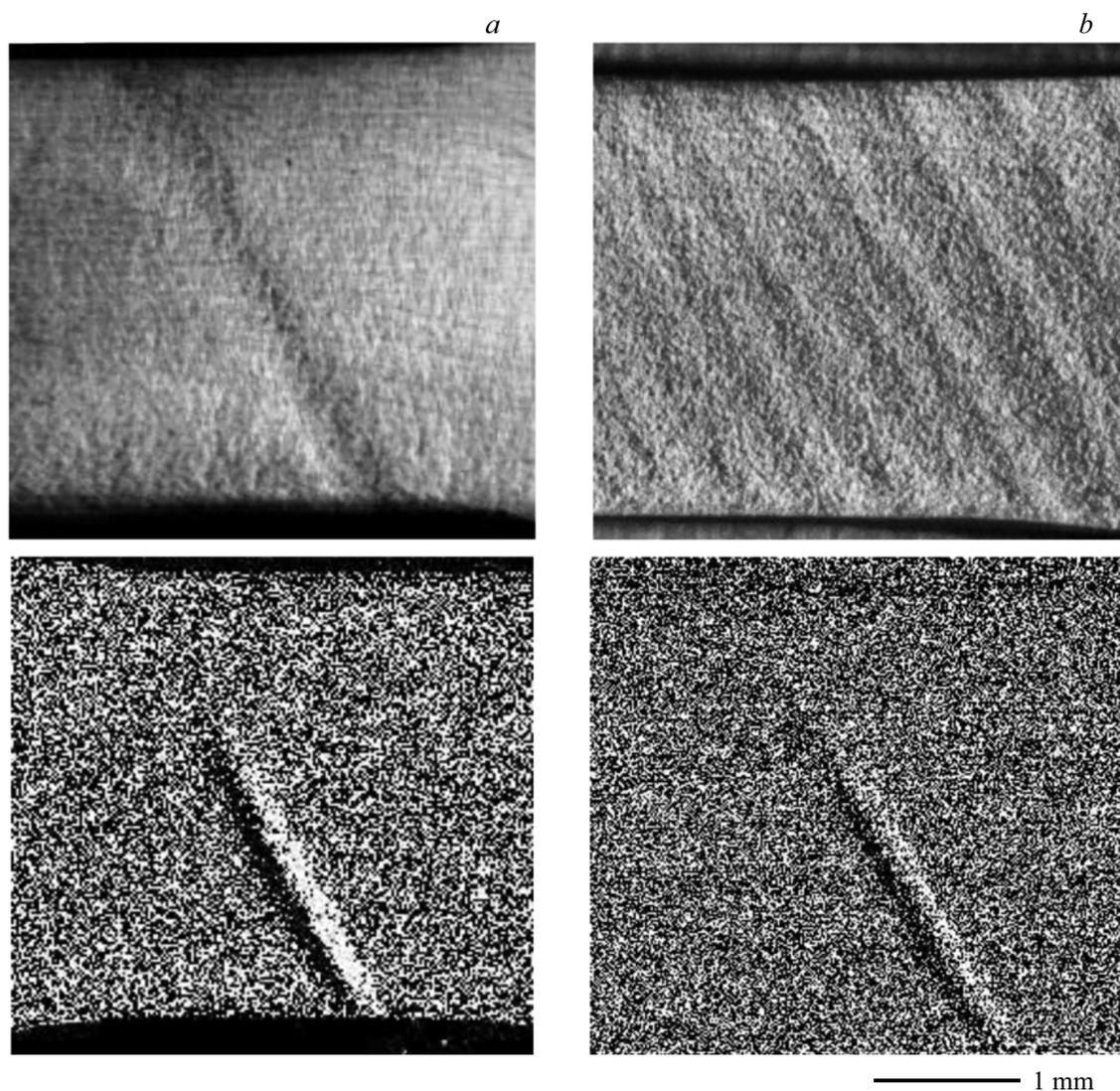
Mn — 0.25% Si — 0.21% Fe (wt.%) в виде двусторонних лопаток с размерами рабочей части  $6 \times 3 \times 0.5\text{ mm}$  вырезали машинным способом из холоднокатаного листа вдоль направления прокатки с последующим отжигом при  $450^\circ\text{C}$  в течение 1 часа и закалкой в воду. После термообработки средний размер зерна составил  $10\text{--}12\text{ }\mu\text{m}$ . Растяжение образцов проводили в „жестком“ и „мягком“ режимах. Первый — в испытательной машине Instron (3344) со скоростями в диапазоне  $3 \cdot 10^{-6}\text{--}3 \cdot 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ , второй — в условиях прерывистой ползучести при напряжениях 200–330 МПа, значительно превышающих условный предел текучести в сплаве АМг6,  $\sigma_{0.2} \approx 160\text{ МПа}$ .

Синхронно с измерениями деформации и усилия велась видеосъемка поверхности деформируемого образца высокоскоростной цифровой видеокамерой FASTCAM Mini UX50/100 (Photron). Скорость съемки варьировали в диапазоне  $(2.5\text{--}5.0) \cdot 10^4\text{ fps}$  для мониторинга ранних стадий формирования деформационных полос. Поверхность образца освещалась под углом около  $30\text{--}40^\circ$  источником белого освещения. Используемый оптический метод аналогичен теневому методу [4], модифицированному в двух аспектах: увеличение более чем на три порядка скорости видеосъемки и использование компьютерной обработки цифровых изображений путем программного вычитания последовательных изображений. Такой метод обработки изображений [22] позволяет выделять контуры объектов (полос или трещин), движущихся со скоростями выше пороговой. Сигналы акустической эмиссии измеряли с помощью датчика АЭ Zetlab BC-601 с почти плоской амплитудно-частотной характеристикой в диапазоне частот  $\sim 100\text{--}800\text{ kHz}$  с плавным убыванием в области более низких частот,  $< 100\text{ kHz}$ . Сигналы АЭ усиливались на 40 dB предусилителем АЕР5 (Vallen-Systeme) и записывались непрерывно, без порога с амплитудным разрешением 16 бит и частотой записи 5 МГц.

## 3. Экспериментальные результаты

### 3.1. Типы зародышевых полос

Анализ данных видеосъемки начального процесса формирования более ста индивидуальных деформационных полос длительностью порядка миллисекунды в условиях прерывистой ползучести и эффекта ПЛШ позволил классифицировать зародышевые полосы, по крайней мере, на четыре основных типа по морфологии и динамике. К первому типу относятся первичные (материнские) полосы, которые зарождаются и растут в материале, в котором отсутствуют другие полосы деформации (рис. 1, а). Ко второму типу относятся вторичные полосы, которые зарождаются на границе предшествующей полосы (в том числе первичной), т.е. макроскопически „гетерогенно“, и растут вдоль этой границы (рис. 1, б). Сопряженная зародышевая полоса, которая растет в направлении, составляющем угол около



**Рис. 1.** Типы зародышевых полос деформации: *a* — первичная полоса; *b* — полоса, растущая вдоль предыдущей статической полосы; *c* — сопряженная полоса, растущая поперек под углом около  $60^\circ$  к статическим полосам; *d* — дугообразная полоса, растущая в области лопаток. Верхние снимки являются исходными, нижние — результаты компьютерной обработки изображения растущей зародышевой полосы.

$60^\circ$  к предшествующим статическим полосам, относится к третьему типу зародышевых полос (рис. 1, *c*). Наконец, четвертый тип включает дугообразные полосы, растущие в области лопаток (рис. 1, *d*).

Полоса деформации, как известно, представляет собой механический заряд, т.е. содержит избыток дислокаций одного механического знака [5]. Для компенсации соответствующего изгибающего момента в материале возникают полосы с избытком противоположного механического заряда. К ним относятся сопряженные полосы. Зародышевые сопряженные полосы, относящиеся к третьему типу, неизбежно возникают в ходе деформирования образца. Они характеризуются неустойчивой кинетикой роста с вариациями скорости вершины в областях пересечения со статическими полосами, создающими в материале макроскопически неоднород-

ную структуру сил закрепления дислокаций, в которой распространяется зародышевая полоса. Следует отметить, что взаимодействие сопряженных полос важно при образовании шейки и разрушении образца [8,9]. Можно предположить, что при пересечении сопряженных полос образуются многочисленные микротрещины по механизму Коттрелла [23], которые при больших напряжениях сливаются в магистральную трещину.

Дугообразные зародышевые полосы, относящиеся к четвертому типу полос, растут в области лопаток, где напряженное состояние сильно отличается от такового в рабочей части образца, а уровень напряжений понижен из-за увеличения поперечного сечения. Из перечисленных выше типов зародышевых полос скорость роста их вершины самая низкая, не превышающая нескольких

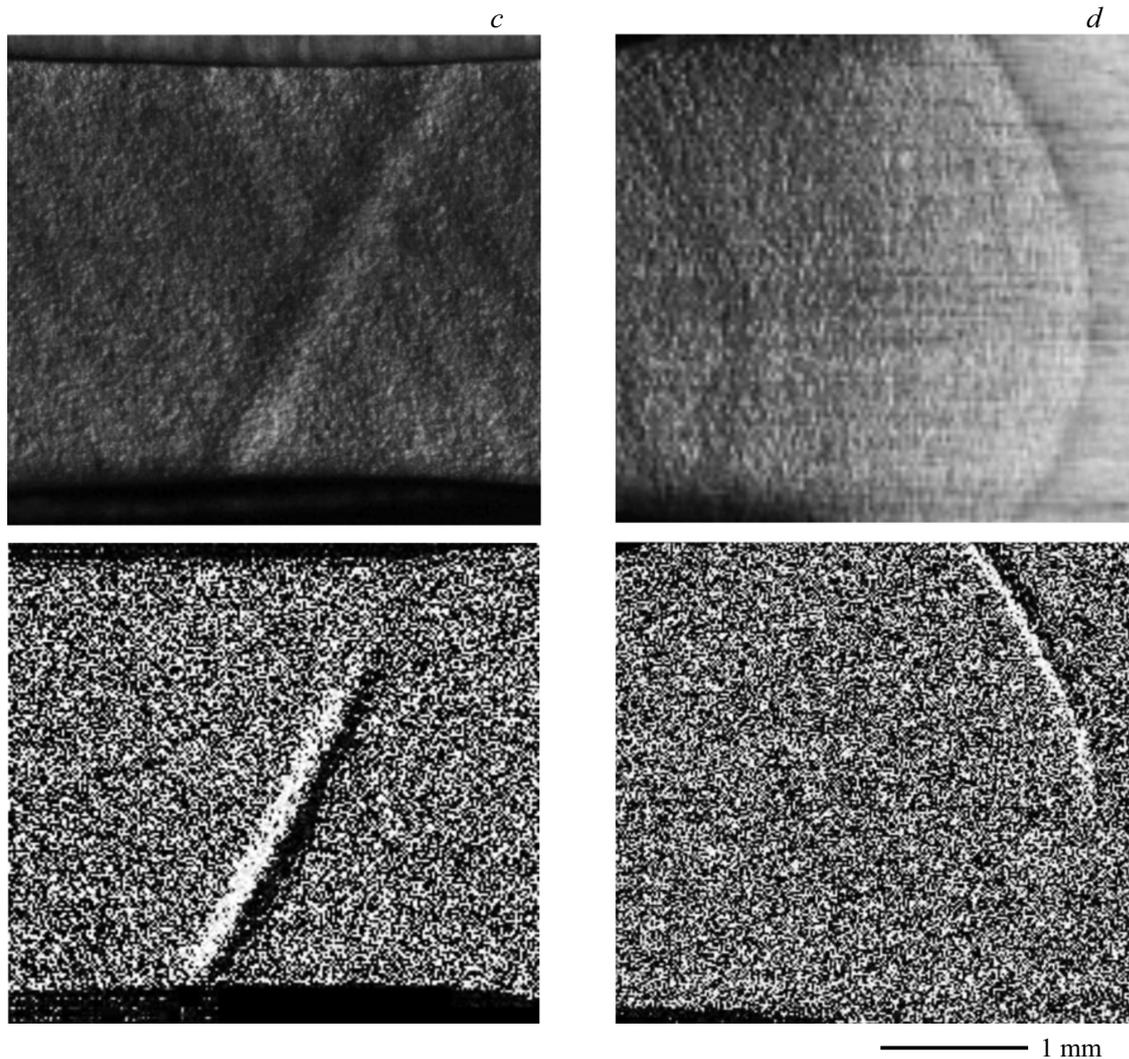


Рис. 1 (продолжение).

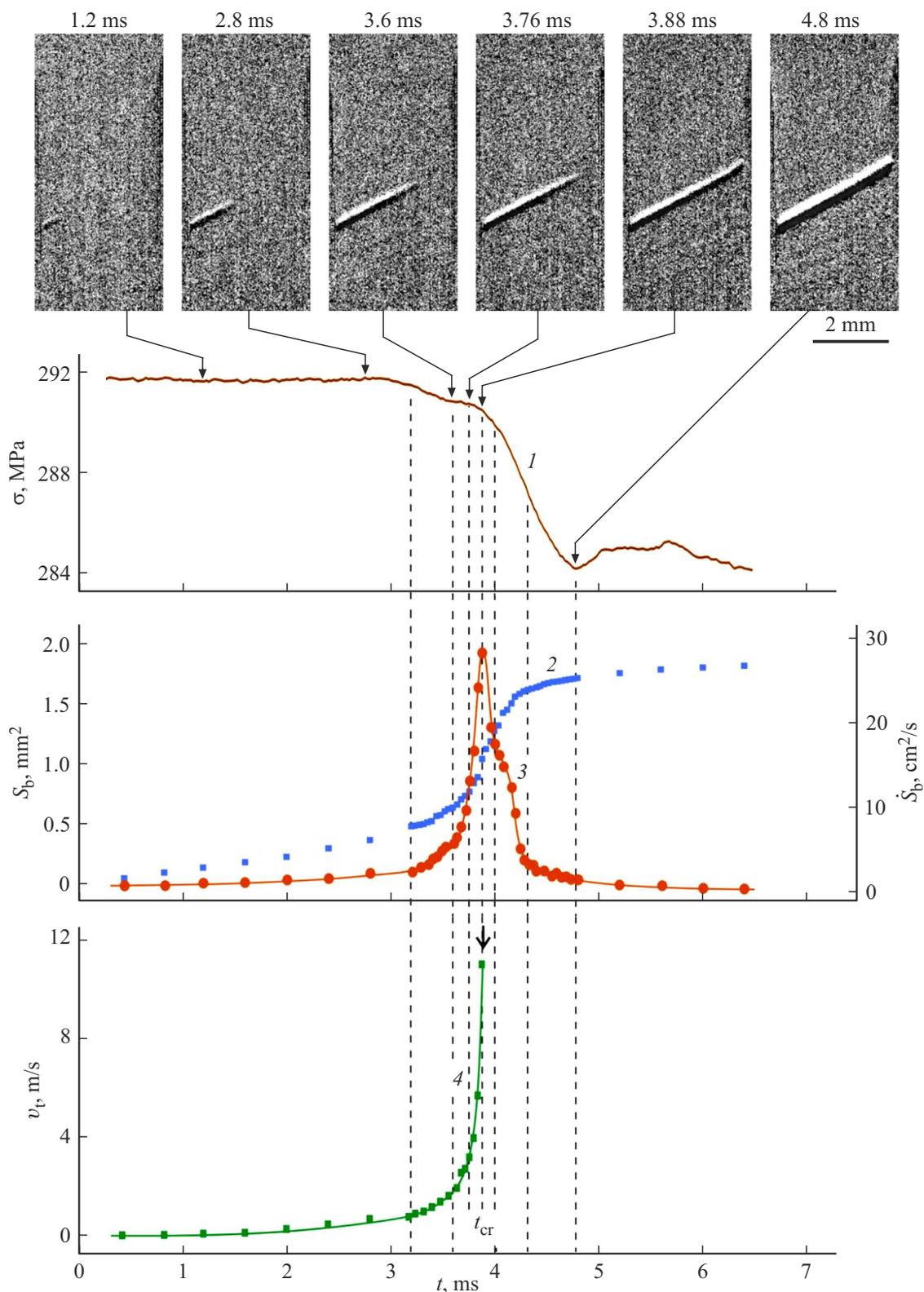
метров в секунду, а продолжительность роста соответственно наибольшая, до нескольких миллисекунд.

Для сравнения с литературными данными отметим, что зародышевые полосы, как самые ранние стадии формирования полос ПЛШ, наблюдались в сплавах системы Al–Mg с использованием видеосъемки со скоростью более 500 fps [17–21,24–27]. В ранней работе [4] на основе данных видеосъемки полос со скоростью 25 fps было предложено три гипотетических сценария поперечного роста зародышевой полосы в плоском образце: а) полоса зарождается на боковой поверхности и ее ширина сохраняется в ходе роста до выхода на противоположную боковую поверхность; б) полоса шириной несколько межатомных расстояний „простреливает“ поперечное сечение, а затем расширяется в направлении растягивающих напряжений; в) зародышевая полоса в виде клина пересекает поперечное сечение в направлении максимальных касательных напряжений. Сценарий, не предполагающий зарождение полосы, предло-

жен недавно в работе [25]. Накопленные к настоящему времени экспериментальные данные по динамике полос свидетельствуют скорее в пользу третьего сценария: в плоском образце зародышевая полоса имеет форму, близкую к полуэллипсу, а ее рост характеризуется скоростью вершины  $v_t$  и скоростью бокового роста  $v_s$  (см. [21]).

### 3.2. Нелинейная динамика зародышевых полос

Все типы зародышевых полос, как установлено, демонстрируют нелинейную динамику с завершающей стадией ускоренного роста вершины полосы с максимальным значением скорости вершины в момент достижения противоположной боковой поверхности плоского образца. Для моделирования нелинейного поведения полосы важно рассмотреть зарождение и рост первичной полосы (полосы первого типа), как пример спонтанного формирования индивидуальной полосы в отсутствие



**Рис. 2.** Динамика первичной зародышевой полосы (полосы первого типа): кривая 1 — силовой отклик  $\sigma(t)$ ; 2 — площадь полосы  $S_b(t)$ ; 3 — скорость роста площади полосы  $\dot{S}_b(t)$ ; 4 — скорость вершины полосы  $v_t(t)$ . Вверху — фрагмент видеосъемки роста полосы через поперечное сечение образца. Скорость съемки 25000 fps. Стрелками отмечена последовательность выделенных кадров съемки.

других полос при постоянном уровне приложенного напряжения.

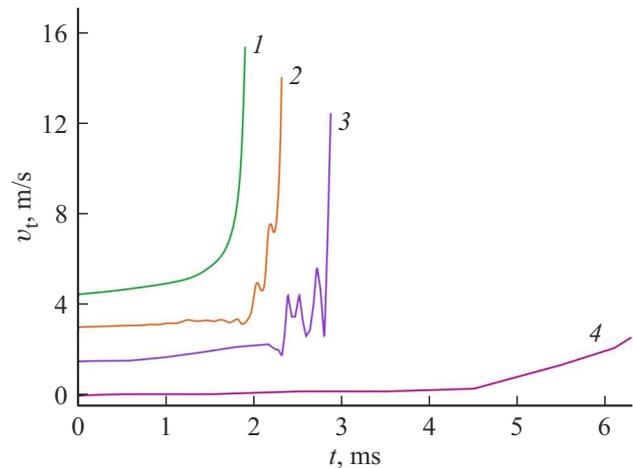
На рис. 2 представлены записи силового отклика  $\Delta\sigma$  (кривая 1), временные зависимости площади  $S_b$  полосы (т.е. площади, заключенной внутри контура полосы), ее производной по времени  $\dot{S}_b$  (кривые 2 и 3 соответственно) и скорости вершины полосы  $v_t$  (кривая 4), а сверху — кадры видеосъемки со скоростью 25000 fps роста зародышевой полосы. Полоса зарождается на боковой поверхности плоского образца (при  $t = 0$ ). Как видно, незавершенная полоса иглообразной формы пересекает сечение плоского образца под углом около  $60^\circ$  относительно оси растяжения за время  $t_{cr}$  ( $\sim 4$  ms) от момента зарождения полосы. В момент времени  $t_{cr}$  незавершенная (зародышевая) полоса достигает противоположной боковой поверхности образца и становится „завершенной“ полосой, которая затем расширяется с падающей скоростью в течении нескольких миллисекунд. Угол  $\varphi$  между полосой и осью растяжения близок к направлению максимальных касательных напряжений (для изотропного пластически деформируемого материала угол  $\varphi$  соответствует условию  $\text{tg}(\varphi) = \sqrt{2}$ , т.е.  $\varphi = 54^\circ 44'$  [28]).

В момент  $t_{cr}$  выхода зародышевой полосы на противоположную поверхность скорость вершины полосы  $v_t$  и скорость роста площади полосы  $\dot{S}_b$  достигают максимальных значений, а скачок разгрузки начинается при  $t \geq t_{cr}$ . Это означает, что ускоренный и скачкообразный рост зародышевой полосы 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. 2, кривые 1–3).

Согласно данным видеосъемки, скорость вершины зародышевой полосы сначала растет почти по линейному закону  $v_t \propto t^n$ , где  $n \approx 1.0–1.2$ , а на завершающей стадии (около  $\sim 1$  ms) резко ускоряется. В момент времени  $t_{cr}$ , когда зародыш пересекает поперечное сечение образца, скорость вершины достигает порядка и больше 10 m/s, а боковая скорость не более 10 cm/s. В примере, показанном на рис. 2,  $v_t(t_{cr}) \approx 12$  m/s,  $v_s(t_{cr}) \approx 6$  cm/s. На завершающей ускоренной стадии роста временная зависимость скорости вершины полосы аппроксимируется экспоненциальной функцией

$$v_t(t) \propto \exp(t/\tau) \quad (1)$$

с коэффициентом корреляции 0.9981 при постоянной времени  $\tau = 0.13$  ms, что свидетельствует о наличии положительной обратной связи в процессе роста. Последняя может быть обусловлена ростом концентрации напряжения вблизи вершины полосы по мере ее приближения к противоположному краю образца. Рост

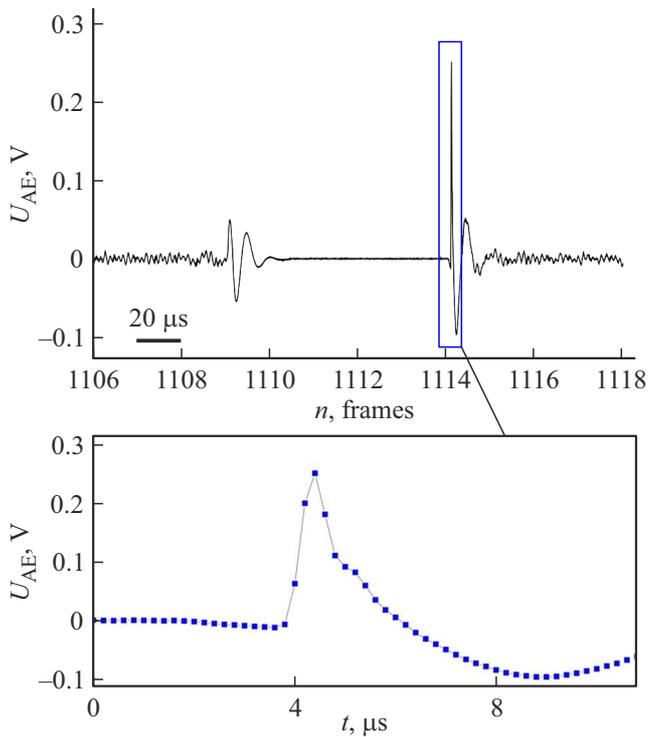


**Рис. 3.** Завершающие фрагменты кинетических кривых  $v_t(t)$  роста зародышевых полос первого (кривая 1), второго (2), третьего (3) и четвертого (4) типа. Кривые смещены по оси ординат на 1.5 м/с.

напряжения увеличивает скорость дислокации в головной части полосы. Соответствующее увеличение длины полосы уменьшает „живое“ сечение, что вызывает дальнейшее увеличение концентрации напряжения в дополнение к растущим напряжениям несоответствия между пластически деформируемым и недеформируемым областям материала, которые зависят не только от лапласиана деформационного поля [29], 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 вершине полосы будет вовлекать в процесс роста новые дислокации, что является дополнительным фактором положительной обратной связи.

Динамика других типов зародышевых полос, несмотря на более сложный характер, также включает завершающую стадию ускоренного роста перед выходом полосы на противоположную боковую поверхность (рис. 3). Для исследования этой стадии в специальной серии экспериментов скорость съемки увеличили до 50000 fps. Синхронно с видеосъемкой измеряли сигнал АЭ с фильтрацией низких частот на уровне 100 kHz и частотой записи 5 MHz.

Сигнал АЭ, связанный с динамикой первичной полосы, при напряжении  $\sigma_0 = 310$  МПа состоит всего из двух дискретных сигналов АЭ со временем переднего фронта не более  $\sim 1 \mu\text{s}$  (рис. 4). Первый из них совпадает с небольшим скачком скорости вершины (кадр 1109) амплитудой  $\sim 3$  м/с и сигнализирует о начале завершающей ускоренной стадии роста зародышевой полосы деформации, а второй совпадает с точностью не более  $20 \mu\text{s}$  с моментом ударного взаимодействия вершины полосы с боковой поверхностью образца (рис. 5). Дли-



**Рис. 4.** Форма акустического сигнала  $U_{AE}(t)$ , соответствующая ускоренной стадии роста зародыша первичной полосы при напряжении 310 МПа. На выноске — импульс АЭ с длительностью фронта  $0.6 \mu s$ , вызванный выходом полосы на противоположную боковую поверхность образца.

тельность переднего фронта второго импульса не более  $0.6 \mu s$ , а амплитуда почти в 5 раз больше первого импульса. По данным видеосъемки, вершина полосы достигает боковой поверхности в момент времени, соответствующий кадру 1115, что дает максимальную скорость вершины  $33 \text{ m/s}$ . Судя по акустическому сигналу, второй, высокоамплитудный импульс АЭ, предположительно связанный с ударом вершины полосы о боковую поверхность, возбуждается в момент времени между кадрами 1114 и 1115. Если учесть это обстоятельство, то оценка максимальной скорости вершины возрастает вдвое, не менее чем до  $60 \text{ m/s}$ .

Примечательно, что в промежутке длительностью  $220 \mu s$  между двумя микросекундными импульсами уровень акустического шума падает более, чем на порядок (см. рис. 4). После окончания второго, высокоамплитудного импульса АЭ шум восстанавливается до исходного. Такое „внутреннее“ поглощение собственного акустического шума, точнее, непрерывной составляющей акустической эмиссии, может быть связано с генерацией большого количества подвижных дислокаций на ускоренной стадии роста незавершенной полосы деформации.

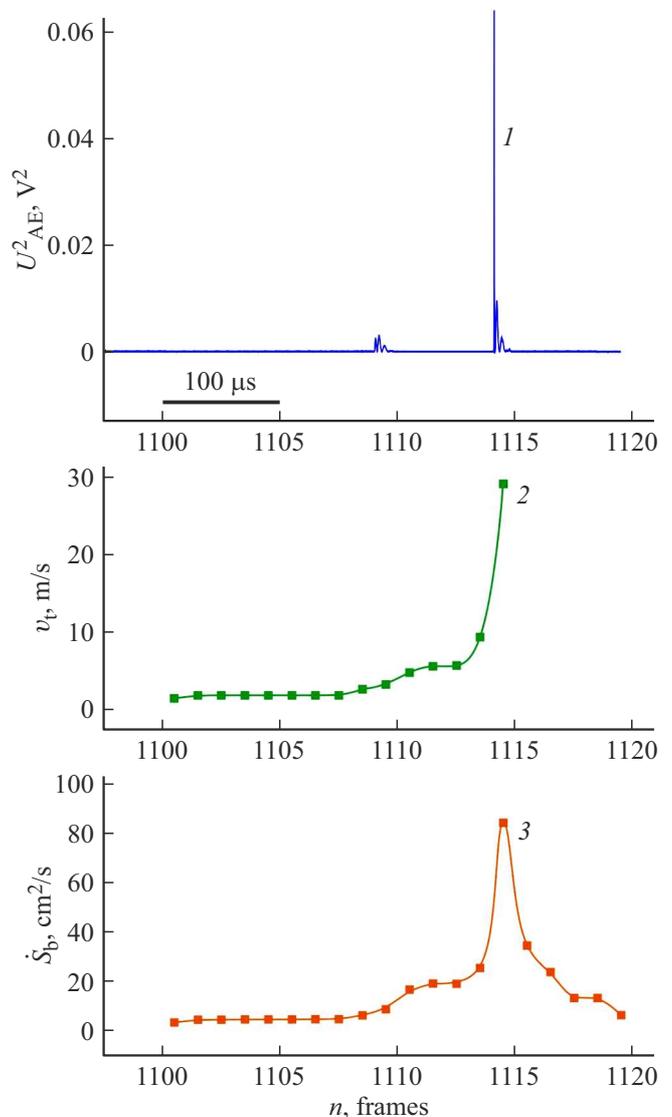
Для исследования подвижности дислокаций в полосе важно знать зависимость скорости дислокаций в полосе от приложенного напряжения — ключевой динамической характеристики дислокаций [30]. На рис. 6 показана

зависимость максимальной скорости вершины зародышевой полосы  $v_i^{\text{max}}$  от приложенного напряжения  $\sigma$ . Если принять скорость вершины как нижнюю оценку скорости дислокаций в вершине незавершенной полосы, то абсолютные значения  $v_i^{\text{max}}$  и линейный характер ее зависимости от напряжения свидетельствуют о вязком движении дислокаций головной группы.

В приближении вязкого движения дислокаций

$$v_d = \frac{\sigma b_d}{B}, \quad (2)$$

где  $B$  — коэффициент динамического торможения дислокаций,  $b_d$  — величина вектора Бюргера дислокации,  $v_d$  — скорость дислокаций [31]. Полагая  $v_d \approx v_i$ , получим оценку сверху коэффициента ди-



**Рис. 5.** Корреляция высокочастотного акустического сигнала в единицах  $U_{AE}^2$  (кривая 1) со скоростью вершины  $v_i$  (2) и скоростью роста площади полосы  $\dot{S}_b(t)$  (3). Скорость съемки  $50000 \text{ fps}$ . Временной интервал между кадрами  $20 \mu s$ .

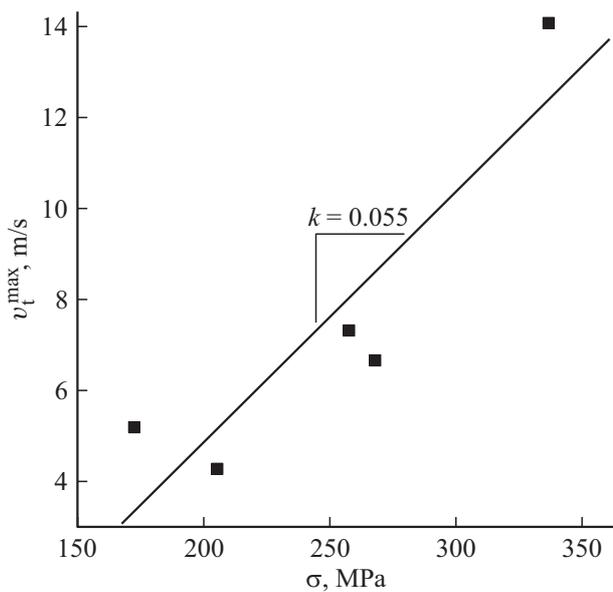


Рис. 6. Зависимость от приложенного напряжения максимальной скорости вершины полосы  $v_t^{\max}(\sigma)$ .  $k = 5.5 \cdot 10^{-2}$  м/МПа·с.

намического торможения дислокаций  $B = b_d/k$ , где  $k = \Delta v_t^{\max}/\Delta\sigma = 5.5 \cdot 10^{-8}$  м/Па·с — коэффициент наклона зависимости  $v_t^{\max}(\sigma)$  на рис. 6. Подставляя  $b_d = 2.85 \cdot 10^{-10}$  м, получим  $B \approx 5.4 \cdot 10^{-3}$  Па·с, что существенно превышает значение  $B$  для индивидуальных дислокаций в металлах [30,31] и может качественно объяснить сильное поглощение непрерывной составляющей сигнала АЭ на стадии ускоренного роста зародышевой полосы. В следующем разделе будет дана оценка коэффициента динамического торможения дислокаций в рамках модели нелинейного роста зародышевой полосы.

### 3.3. Модель нелинейного роста зародышевой полосы ПЛШ

Рассмотрим нелинейные аспекты динамики индивидуальной полосы деформации в тонкой пластине, растягиваемой напряжением  $\sigma_0 = \text{const}$ . Будем использовать аналогию с трещиной, учитывая, что в геометрическом и кинетическом аспектах рост зародышевой полосы проявляет поведение, аналогичное растущей трещине: эллиптичность формы, наличие ускоренной стадии роста, аналогичной стадии закритического роста трещины [32]. В результате пересечения трещиной сечения образца напряжение релаксирует на величину растягивающего напряжения  $\sigma_0$ , а при пересечении поперечного сечения зародышевой полосой растягивающее напряжение релаксирует на величину скачка напряжения  $\Delta\sigma$  на деформационной кривой. Будем моделировать зародышевую полосу как эллиптическую трещину, пересекающую поперечное сечение плоского образца, к которому приложено растягивающее напряжение  $\Delta\sigma$ . Тогда известная формула для напряжения в вершине эллиптической трещины  $\sigma_{cr} = \sigma_0(1 + 2a_{cr}/b_{cr})$  [33] (где  $a_{cr}$  и  $b_{cr}$  — большая

и малая полуоси трещины) должна быть записана для зародышевой полосы как

$$\sigma_t = \Delta\sigma(1 + 2a/b), \quad (3)$$

где  $\sigma_t$  — напряжение в вершине зародышевой полосы,  $a$  и  $b$  — соответствующие величины для зародышевой полосы, т.е.  $a$  — длина полосы,  $2b$  — ширина у источника полосы на боковой поверхности образца.

Как следует из результатов высокоскоростных исследований динамики зародышевых полос в сплаве АМг6, максимальная скорость вершины  $v_t \approx 10\text{--}60$  м/с, т.е. находится в области вязкого движения дислокации, а скорость бокового роста  $v_s \approx 10\text{--}30$  см/с находится в области преимущественно термоактивационного движения дислокации, когда  $v_s \propto \sigma_0^m$ , где  $m$  — константа. Вместе с тем, на начальной стадии роста полосы скорости дислокации в вершине и тем более на боковых границах полосы еще не велики ( $\ll 1$  м/с), все дислокации полосы совершают термоактивационное движение в поле случайных стопоров — примесных атомов. Тогда  $v_t/v_s \propto (\sigma_t/\Delta\sigma)^m \approx (2a/b)^m = \text{const}$ , и полоса движется с сохраняющейся эллиптической формой. Отметим, что в термоактивированном режиме движения дислокаций возможно явление динамического деформационного старения (ДДС), т.е. динамического взаимодействия дислокаций с диффундирующими атомами примеси, обычно используемого для объяснения автолокализации деформации в полосах ПЛШ [34].

Когда скорость вершины превысит значение  $\sim 1\text{--}10$  м/с, динамика зародышевой полосы переходит в „смешанный“ режим: дислокации в вершине полосы будут двигаться преимущественно в вязкой манере, а дислокации на боковых границах — в термоактивационной. В вязком режиме дислокации совершают надбарьерное движение, не подверженное ДДС. В результате дислокации в вершине полосы движутся значительно быстрее, чем вблизи боковой границы полосы. Поскольку  $v_s \ll v_t$ , будем в первом приближении считать, что на этой стадии роста ширина полосы остается постоянной —  $2b \approx \text{const}$ , и динамика полосы будет определяться в основном скоростью вершины. Объединяя уравнения (2) и (3) и учитывая, что  $v_d \approx v_t = \dot{a}$ ,  $b = \text{const}$ ,  $a \gg b$ , получим

$$\frac{da}{dt} = C_1 a, \quad (4)$$

где  $C_1 = 2\Delta b_d/Bb$ . Для временных зависимостей длины и скорости полосы получим, соответственно,

$$a(t) = a_0 \exp(t/\tau), \quad (5)$$

$$\dot{a}(t) = v_t(t) = v_{t0} \exp(t/\tau), \quad (6)$$

где  $a_0$  и  $v_{t0} = a_0/\tau$  — длина и скорость полосы в начале экспоненциального роста вершины полосы, а

$$\tau = C_1^{-1} = Bb/2\Delta\sigma b_d \quad (7)$$

— постоянная времени экспоненциального роста. Подставляя в (7) типичные значения экспериментальных

данных:  $\Delta\sigma = 10$  МПа,  $b = 0.2$  mm,  $\tau \approx 0.13$  ns,  $b_d = 2.85 \cdot 10^{-10}$  m, получим оценку коэффициента динамического торможения дислокаций в зародышевой полосе

$$B = 2\tau\Delta\sigma b_d/b \approx 3.7 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}, \quad (8)$$

которая на 1.5–2 порядка превышает типичные значения  $B$  для индивидуальных дислокаций в алюминии, измеренные различными методами [31] и лучше чем по порядку величины согласуется с оценкой  $B$  из экспериментальной зависимости максимальной скорости вершины полосы от приложенного напряжения (см. рис. 6).

Отметим, что на рассматриваемом участке ускоренного роста зародышевой полосы происходит сильное поглощение непрерывной составляющей АЭ. Резкий рост коэффициента динамического торможения дислокаций в полосе деформации может быть связан с интенсивным размножением дислокаций и тепловым эффектом, хорошо известным из тепловизионных исследований динамики деформационных полос [35,36]. Таким образом, модель объясняет экспоненциальный рост (см. (1) и (6)), наблюдаемый в последней трети роста зародышевой полосы. Эту стадию предваряет приблизительно линейный рост скорости вершины полосы, который можно объяснить, положив, что полоса растет с сохраняющимся радиусом вершины  $r_t = b^2/a = \text{const}$ . Тогда  $\Delta\sigma_t \approx 2\Delta\sigma\sqrt{a}/r_t$  и

$$\frac{da}{dt} = 2C_2\sqrt{a}, \quad (9)$$

где  $C_2 = \Delta\sigma b_d/B\sqrt{r_t}$ . Решение (9) дает параболический рост длины полосы  $a = C_2^2 t^2$  и соответственно линейный рост скорости вершины  $\dot{a} = v_t(t) = 2C_2 t$ .

**Стадия выхода на поверхность зародышевой полосы.** По мере приближения вершины полосы к противоположной боковой поверхности уменьшается „живое сечение“ образца, что должно привести к дополнительному росту напряжения в вершине полосы и ее саморазгону перед выходом на поверхность образца. Так как при этом „живое“ сечение стремится к нулю, можно ожидать сингулярного поведения скорости вершины в момент выхода полосы на внешнюю поверхность.

Перепишем формулу (3) с учетом зависимости приложенного напряжения от относительного расстояния между вершиной зародышевой полосы и противоположной поверхностью  $x = a/L_0$ , где  $L_0$  — ширина образца в направлении роста полосы  $L_0 = a_{\text{max}}$ .

$$\sigma_t = \frac{\Delta\sigma(1 + 2a/b)}{1 - x}. \quad (10)$$

Уравнение роста полосы с учетом условия  $a \gg b$  перепишем в виде

$$v_t = \frac{C_1 L_0 x}{1 - x}. \quad (11)$$

Предельная скорость дислокаций, согласно [37],  $v_{d\text{max}} \approx 0.5c_t$ , где  $c_t$  — скорость поперечных звуковых

волн. Учитывая, что для Al  $c_t = 3050$  m/s [39], получим, что дислокации в вершине полосы достигают максимальной скорости  $v_{d\text{max}} \approx 1.5$  km/s на расстоянии от противоположного края, равном  $L_0 - a_{\text{lim}} = L_0/(1 + c_t/2C_1 L_0) \approx 100 \mu\text{m}$ , которое они преодолевают за  $\Delta t \approx 80$  ns. Таким образом, сингулярность формулы (11) „устраняется“ релятивистским эффектом: скорость полосы достигает максимального значения на расстоянии

$$a_{\text{lim}} = \frac{L_0 c_t}{c_t + 2C_1 L_0} \approx 97.4\% L_0, \quad (12)$$

а остальную дистанцию  $\Delta a = L_0 - a_{\text{lim}} \approx 2.6\% L_0$  вершина полосы движется с предельной скоростью  $v_{t\text{max}} \approx 0.5c_t$  в течение около  $0.1 \mu\text{s}$  перед выходом на поверхность образца.

Помимо релятивистского эффекта, существуют другие факторы, влияющие на скорость дислокаций в вершине полосы, связанные с конкуренцией силы изображения, притягивающие дислокации к поверхности, и силы отталкивания от поверхности, покрытой более прочным слоем оксида  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (корунда), модуль сдвига которого почти на порядок превышает модуль сдвига алюминия ( $G_{\text{Al}_2\text{O}_3} \gg G_{\text{Al}}$ ) [38]. Положение равновесия между этими силами находится на расстоянии порядка толщины оксидной пленки  $\delta \approx 10$  nm [37]. Наличие оксида, таким образом, препятствует выходу дислокаций на поверхность. Несмотря на то, что корунд имеет более высокий модуль сдвига, он имеет более низкую прочность на изгиб (около 220 МПа), поэтому оксидная пленка легко разрушается в области ступени, связанной с выходом дислокационного скопления. После разрушения хрупкого оксида дислокации дополнительно ускоряются силами изображения.

Следует отметить, что при „гетерогенном“ зарождении полосы на границе предшествующей полосы источник новой полосы находится в пределах ширины границы полосы, т.е. в пределах одного или нескольких зерен [39]. В ходе эволюции зародышевой полосы ее объем возрастает в  $V_b/V_g \approx 10^6$  раз, где  $V_b \approx L_b w_b \delta \approx 1 \text{ mm}^3$  — объем полосы ( $L_b = a(t_{\text{cr}}) \approx 4 \text{ mm}$  — конечная длина полосы,  $w_b = 2b(t_{\text{cr}}) \approx 0.5 \text{ mm}$  — ширина полосы и  $\delta = 0.5 \text{ mm}$  — толщина образца), а  $V_g \approx (\bar{d})^3 \approx 10^{-6} \text{ mm}^3$  — средний объем зерна, где  $\bar{d} \approx 10 \mu\text{m}$ . Поэтому лавинообразное размножение дислокаций является доминирующим (возможно, не единственным) механизмом эволюции зародышевой полосы. В результате срабатывания в „материнском“ зерне у поверхности образца дислокационного источника типа Франка–Рида (Ф–Р), типичного для гранцентрированных кубических (ГЦК) металлов, образуется плоское скопление дислокаций, которое блокируется границей зерна. Для объяснения положительной обратной связи необходимо учитывать, что в фазе торможения скопления у границы зерна создается импульс перенапряжения и локальный разогрев, стимулирующий срабатывание источников Ф–Р в нескольких

соседних зернах, что может привести к „цепному взрыву“ количества свежих дислокационных скоплений.

**Сравнение с сигналом АЭ.** Известно, что энергия, высвобождаемая в ходе события АЭ, примерно пропорциональна объему источника [40], в данном случае  $V_b$ . Следовательно, энергия акустического сигнала

$$E = \frac{1}{R} \int_0^{t_0} U_{\text{АЭ}}^2(t) dt = \alpha V_b, \quad (13)$$

генерируемого зародышевой полосой, должна по крайней мере на 6 порядков превышать энергию АЭ от источника Ф–Р в материнском зерне (здесь  $R$  — электрическое сопротивление измерительной цепи,  $t_0$  — время события АЭ,  $\alpha$  — константа). Поэтому момент зарождения полосы не детектируется методом АЭ: ожидаемый сигнал значительно меньше уровня акустического шума в данных условиях деформирования, который складывается из шума испытательной машины и непрерывной составляющей АЭ пластически деформируемого объема образца вне растущей зародышевой полосы. Большая часть акустической энергии высвобождается на завершающей ускоренной стадии роста зародышевой полосы, которая характеризуется максимальной скоростью роста объема полосы  $\dot{V}_b = \dot{S}_b \delta$ .

Дифференцируя по времени энергию акустического сигнала (13), получим

$$U_{\text{АЭ}}^2 \propto \dot{V}_b = \dot{S}_b \delta = \pi \dot{a} b \delta \propto v_t, \quad (14)$$

т.е. величина квадрата амплитуды сигнала АЭ  $A^2 = (U_{\text{АЭ}}^{\text{max}})^2$  пропорциональна скорости вершины полосы и согласно (11) стремится к максимальному значению (пику) по закону

$$A^2(x) \propto \frac{x}{1-x} \quad (15)$$

при  $x \rightarrow x_{\text{lim}} = a_{\text{lim}}/L_0$ .

Источником пикового значения сигнала АЭ является завершающая стадия роста зародышевой полосы — стадия выхода на противоположную поверхность образца — продолжительностью  $\Delta t \approx 2(L_0 - a_{\text{lim}})c_t \approx 10^{-7}$  s, когда дислокации в вершине полосы движутся с предельной скоростью  $\sim 0.5c_t$ . Регистрируемый пик сигнала АЭ в момент выхода на поверхность зародышевой полосы и его качественное объяснение в рамках данной модели подтверждает (в дополнение к работе [41]) механизм генерирования АЭ при выходе дислокаций на поверхность кристалла [42,43] применительно к полосам деформации ПЛШ.

Таким образом, предложенная феноменологическая модель нелинейного роста зародышевой полосы качественно объясняет основные экспериментальные результаты высокоскоростных исследований *in situ* динамики таких полос на примере алюминиево-магниевого сплава: экспоненциальный рост скорости вершины полосы

на завершающей стадии перед выходом на противоположную боковую поверхность плоского образца, максимальную амплитуду микросекундных импульсов АЭ в момент выхода полосы на поверхность и поглощение акустического шума на этой стадии, предположительно связанного с интенсивным размножением дислокаций в полосе.

## 4. Заключение

Экспериментально исследовалась миллисекундная динамика зародышевых полос Портевена–Ле Шателье методом высокоскоростной видеосъемки поверхности деформируемого образца алюминиево-магниевого сплава АМг6 и синхронно методом АЭ. Длительность роста зародышевых полос обычно не превышает нескольких миллисекунд, поэтому экспериментальное изучение этого процесса требует использование методов с быстройдействием, значительно превышающим  $\sim 1$  кГц. В настоящей работе использовали высокоскоростную видеосъемку поверхности со скоростью от 25000 до 50000 fps с пространственным разрешением до  $10 \mu\text{m}/\text{px}$  и измерение АЭ в полосе до  $\sim 1$  МГц.

Основные результаты состоят в следующем:

1. В плоских образцах зародышевые полосы различаются по геометрии и динамике на 4 основные типа: первичные, растущие поперек фронтальной поверхности в направлении максимальных касательных напряжений; вторичные, растущие по границе предыдущей полосы; вторичные сопряженные, пересекающие предшествующие полосы под углом около  $60^\circ$ , и дугообразные, растущие в области лопаток. Наиболее быстрая динамика характерна для первых двух типов, наиболее медленная — для последнего, при одинаковом уровне приложенной нагрузки. Все типы зародышевых полос демонстрируют нелинейную динамику с резким ускорением на завершающей стадии роста.

2. Динамика и геометрия первых двух типов идентична: более половины сечения первого плоского образца вершина зародышевой полосы растет почти с линейно возрастающей скоростью  $v_t$  в направлении максимальных касательных напряжений, затем стартует стадия нелинейного роста вершины, которая подчиняется экспоненциальному закону  $v_t \propto \exp(t/\tau)$ , где  $\tau \approx 0.1-0.2$  ms — постоянная времени ускоренного роста. Вершина полосы достигает максимальной скорости в момент выхода на противоположную боковую поверхность плоского образца. Значение максимальной скорости зачастую ограничено скоростью видеосъемки:  $\sim 3-5$  m/s при скорости съемки 500 fps,  $\sim 10-15$  m/s при 25000 fps и  $\sim 30-40$  m/s при 50000 fps.

3. Установлено, что источник деформационной полосы находится в пределах одного или нескольких соседних зерен, а в ходе роста зародышевой полосы ее объем возрастает более чем на шесть порядков, поэтому доминирующим механизмом роста является

лавинообразное размножение дислокаций. Показано, что дислокации в вершине зародышевой полосы на стадии ускоренного роста движутся в квазивязком режиме, а боковой рост происходит за счет термоактивационного движения дислокаций.

4. Скорость вершины полосы достигает максимального значения при выходе на противоположную поверхность образца. В этот момент сигнал акустической эмиссии достигает пикового значения. Короткие серии микросекундных импульсов АЭ в структуре акустической вспышки с точностью  $\sim 1 \mu\text{s}$  регистрируют стадию ускоренного роста зародышевых полос при высоких напряжениях, а импульс АЭ максимальной амплитуды сигнализирует об ударном взаимодействии зародышевой полосы с поверхностью образца. Вместе с тем, сигнал АЭ от зарождения полосы в материнском зерне (кластере зерен) значительно ниже уровня непрерывной составляющей АЭ, связанной со стохастической динамикой дислокационных скоплений в зернах пластически деформируемого образца. Обнаружено резкое поглощение (более чем на порядок) акустического шума на стадии ускоренного роста зародышевой полосы, что может быть связано с генерацией большого количества подвижных дислокаций.

5. Предложена модель нелинейного роста зародышевой полосы, которая объясняет экспоненциальную стадию саморазгона зародышевой полосы, наблюдаемую экспериментально, и предсказывает трудную для экспериментального изучения стадию выхода полосы на противоположную поверхность с предельной, релятивистской скоростью вершины, соизмеряемой со скоростью сдвиговых волн в металле. Сделана оценка коэффициента динамического торможения дислокаций в вершине полосы, которая на полтора-два порядка превышает соответствующее значение для индивидуальных дислокаций в алюминии, что предположительно связано с генерацией большого количества свежих дислокаций в структуре растущей зародышевой полосы на стадии ее ускоренного роста.

### Финансирование работы

Аналитическая часть работы выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект № 22-22-00692). Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (проект № 22-22-00692) на оборудовании Центра коллективного пользования ТГУ им. Г.Р. Державина.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] F. Savart. *Ann. Chim. Phys.* **65**, 337 (1837).
- [2] E.N. da Costa Andrade. *Proc. Royal Soc. A* **84**, 1 (1910).

- [3] A. Portevin, F. Le Chatelier, C.R. Acad. Sci. Paris **176**, 507 (1923).
- [4] K. Chihab, Y. Estrin, L.P. Kubin, J. Vergnol. *Scripta Met.* **21**, 2, 203 (1987).
- [5] А.А. Шибков, А.Е. Золотов. *Письма в ЖЭТФ* **90**, 5, 412 (2009).
- [6] А.А. Шибков, М.Ф. Гасанов, М.А. Желтов, А.Е. Золотов, В.И. Иволгин. *Int. J. Plast.* **86**, 37 (2016).
- [7] A.J. Yilmaz. *Sci. Technol. Adv. Mater.* **12**, 6, 063001 (2011).
- [8] Л.С. Деревягина, В.Е. Панин, А.И. Гордиенко. *Физ. мезомех.* **10**, 4, 59 (2007).
- [9] А.А. Шибков, А.Е. Золотов, М.А. Желтов, А.В. Шуклинов, А.А. Денисов. *ФТТ* **53**, 10, 1873 (2011).
- [10] А.А. Шибков, М.А. Желтов, А.Е. Золотов, А.А. Денисов. *ФТТ* **53**, 10, 1879 (2011).
- [11] A. Chatterjee, A. Sarkar, P. Barat, P. Mukherjee, N. Gayathri. *Mater. Sci. Eng. A* **508**, 1, 156 (2009).
- [12] F.B. Klose, A. Ziegenbein, F. Hagemann, H. Neuhäuser, P. Hähner, M. Abbadi, A. Zeghloul. *Mater. Sci. Eng. A* **369**, 1–2, 76 (2004).
- [13] R. Shabadi, S. Kumar, H.J. Roven, E.S. Dwarakadasa. *Mater. Sci. Eng. A* **382**, 1–2, 203 (2004).
- [14] H. Louche, P. Vacher, R. Arrieux. *Mater. Sci. Eng. A* **404**, 1–2, 188 (2005).
- [15] H. Ait-Amokhtar, C. Fressengeas, S. Boudrahem. *Mater. Sci. Eng. A* **488**, 1–2, 540 (2008).
- [16] А.А. Шибков, А.Е. Золотов, М.А. Желтов, А.А. Денисов, М.Ф. Гасанов. *ЖТФ* **84**, 4, 40 (2014).
- [17] W. Tong, H. Tao, N. Zhang, L.G. Hector Jr. *Scripta Mater.* **53**, 87 (2005).
- [18] G.F. Xiang, Q.C. Zhang, H.W. Liu, X.P. Wu, X.Y. Ju. *Scripta Mater.* **56**, 721 (2007).
- [19] М.М. Криштал, А.К. Хрусталева, А.В. Волков, С.А. Борodin. *Dokl. Phys.* **54**, 5, 225 (2009).
- [20] А.А. Шибков, М.А. Желтов, М.Ф. Гасанов, А.Е. Золотов. *ФТТ* **59**, 12, 2363 (2017).
- [21] А.А. Шибков, М.А. Желтов, М.Ф. Гасанов, А.Е. Золотов, А.А. Денисов, М.А. Лебыодкин. *Mater. Sci. Eng. A* **772**, 138777 (2020).
- [22] А.А. Шибков, А.Е. Золотов. *Кристаллография* **56**, 1, 147 (2011).
- [23] A.H. Cottrell. *Trans. Met. Soc. AIME* **38**, 2, 192 (1958).
- [24] J. Zdunek, T. Brynk, J. Mizera, Z. Pakiel, K.J. Kurzydowski. *Mater. Charact.* **59**, 1429 (2008).
- [25] М.А. Лебыодкин, Д.А. Земчужникова, Т.А. Лебыодкина, Е.С. Аифантис. *Res.Phys.* **12**, 867 (2019).
- [26] V.V. Gorbatenko, V.I. Danilov, L.B. Zuev. *Technical Phys.* **62**, 3, 395 (2017).
- [27] D. Yuzbekova, A. Mogucheva, Y. Borisova, R. Kaibyshev. *J. Alloys. Compounds* **868**, 159135 (2021).
- [28] Р. Хилл. *Математическая теория пластичности*. Гостехиздат, М. (1956). 408 p.
- [29] H.M. Zbib, E.C. Aifantis. *Scripta Met.* **22**, 8, 1331 (1988).
- [30] В.И. Никитенко. В кн.: *Несовершенства кристаллического строения и мартенситные превращения*. Наука, М. (1972). С. 136.
- [31] В.И. Альшиц, В.Л. Инденбом. *УФН* **115**, 1, 3 (1975).
- [32] В.М. Пестриков, Е.М. Морозов. *Механика разрушения твердых тел*. Профессия, СПб (2002). 320 с.
- [33] В.З. Паргон, Е.М. Морозов. *Механика упругопластического разрушения: Основы механики разрушения*. ЛКИ, М. (2008). 352 с.

- [34] L.P. Kubin, C. Fressengeas, G. Ananthakrishna. *Dislocat. Solids* **11**, 101 (2002).
- [35] H. Ait-Amokhtar, C. Fressengeas. *Acta Materialia* **58**, 4, 1342 (2010).
- [36] R. Nogueira de Codes, O.S. Hopperstad, O. Engler, O.-G. Lademo, J.D. Embury, A. Benallal. *Metall. Mater. Trans. A* **42**, 11, 3358 (2011).
- [37] Ж. Фридель. *Дислокации*. Мир, М. (1976). 660 с.
- [38] Таблицы физических величин. Справочник / Под ред. И.К. Кикина. Атомиздат, М. (1976). 1008 с.
- [39] А.А. Шибков, А.Е. Золотов, М.А. Желтов. *ФТТ* **52**, 11, 2223 (2010).
- [40] A.G. Beattie. *Acoustic emission non-destructive testing of structures using source location techniques*. Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM (2013).
- [41] В.С. Бойко, В.Ф. Кившик, Л.Ф. Кривенко. *ЖЭТФ* **82**, 2, 504 (1982).
- [42] В.Д. Нацик. *Письма в ЖЭТФ* **8**, 3, 198 (1968).
- [43] В.Д. Нацик, К.А. Чишко. *Акуст. журн.* **28**, 3, 381 (1982).

*Редактор Е.В. Толстякова*