

# Акустический предвестник неустойчивой пластической деформации алюминий-магниевого сплава АМг6

© А.А. Шибков, А.Е. Золотов, М.А. Желтов

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

E-mail: shibkov@tsu.tmb.ru

(Поступила в Редакцию 23 марта 2010 г.)

С помощью высокоскоростной видеосъемки поверхности и одновременного измерения сигнала акустической эмиссии выявлена связь между акустическим сигналом и динамикой первых деформационных полос на начальной стадии развития скачка пластической деформации в искусственно состаренном сплаве АМг6. Показано, что наиболее информативной характеристикой акустического сигнала является резкий рост потенциала пьезопреобразователя в первые  $\sim 10$  мс развития деформационного скачка. Обсуждаются механизмы распространения деформационных полос и генерирования акустических сигналов, а также возможное использование акустических предвестников скачков пластической деформации.

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

## 1. Введение

Скачкообразная деформация металлов и сплавов проявляется в виде ступеней на кривых ползучести („лестничная“ ползучесть), на кривых нагружения с постоянной скоростью роста нагрузки (эффект Савара–Массона [1]) и в виде повторяющихся сбросов нагрузки на кривых деформирования с постоянной скоростью (эффект Портевена–Ле Шателье (ПЛШ) [2]). Типичными модельными материалами для изучения природы скачкообразной деформации металлов, деформируемых скольжением, являются сплавы системы Al–Mg с содержанием магния от 2 до 6 wt.%. Среди них особый интерес представляет алюминий-магний сплав АМг6 в связи с его широким применением при производстве летательных аппаратов и автомобилей.

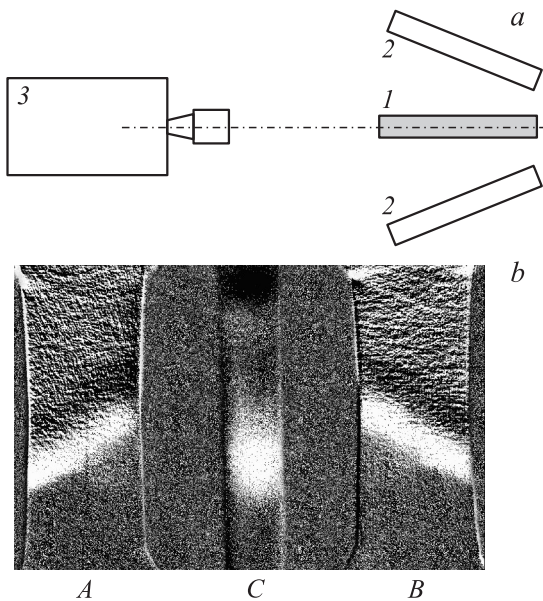
В работах [3–6] установлено, что скачкообразная деформация сплава АМг6 является структурно-чувствительным эффектом. В [3,4] выявлена зависимость начальной деформации появления скачков от размера зерна после интенсивной пластической деформации. Характеристики скачкообразной деформации, особенно количество скачков, первая критическая деформация, подвижность и морфология первых полос деформации резко меняются после отжига в окрестности температуры ограниченной растворимости магния в алюминии  $T_{SV} \approx 275^\circ\text{C}$  [5,6]. Наиболее чувствительными функциями отклика на растворение частиц вторичной  $\beta$  (Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub>)-фазы являются подвижность и геометрия первых полос: с ростом температуры отжига в окрестности точки  $T_{an} \approx T_{SV}$  происходит морфологический переход от плоской к дендритной геометрии полос деформации, сопровождаемый ростом (почти на порядок) их подвижности. В [6] установлено, что в сплаве АМг6 с преципитатной микроструктурой, полученной искусственным старением, первой полосой деформации является узкая полоса локализованного сдвига (шириной порядка размера зерна  $\sim 10\ \mu\text{m}$ ), рас-

пространяющаяся со скоростью 0.3–1 м/с в плоскости максимальных касательных напряжений, а в сплаве со структурой собирательной рекристаллизации потеря устойчивого пластического течения начинается со спонтанного формирования ветвящегося фронта полосы Людерса.

Ранние стадии развития полосы Людерса в рекристаллизованном сплаве АМг6 исследовали в работе [7] методами акустической эмиссии (АЭ) и скоростной видеосъемки. Обнаружено, что наиболее быстрые события на фронте полосы Людерса, связанные с распространением со скоростью  $\sim 1$  м/с первых полос локализованной деформации через сечение образца, сопровождаются генерированием характерных сигналов АЭ. Цель настоящей работы состояла в исследовании акустического предвестника потери деформационной устойчивости сплава АМг6 с преципитатной микроструктурой, полученной искусственным старением.

## 2. Методика

Образцы сплава АМг6 (Al–5.92 wt.% Mg–0.61 wt.% Mn) в форме двусторонних лопаток с размером рабочей части  $6 \times 3 \times 1.2$  мм вырезали из холоднокатаного листа ( $\epsilon = 5$ ). После полировки алмазной пастой (глубина риска около  $1\ \mu\text{m}$ ) образцы состаривали при температуре  $250^\circ\text{C}$  в течение часа и охлаждали на воздухе. Структура сплава, описанная в [5], свидетельствует о комбинации процессов возврата второго рода, первичной рекристаллизации и выделения частиц  $\beta'$  и  $\beta$ -фазы размерами 0.3–0.7  $\mu\text{m}$ ; средняя плотность дислокаций составила  $3 \cdot 10^9\ \text{cm}^{-2}$ , средний размер зерна — 7.5  $\mu\text{m}$ . Через час после термообработки образцы подвергали одноосному растяжению с постоянной скоростью возрастания напряжения  $\dot{\sigma}_0 = 0.2\ \text{MPa/s}$  в „мягкой“ деформационной машине, описанной в [8]. Для *in situ* исследования динамики полос деформации использова-



**Рис. 1.** *a)* Схема видеосъемки с двумя зеркалами для получения синхронных изображений полос на боковой и двух противоположных фронтальных поверхностях плоского образца. *1* — образец, *2* — зеркала, *3* — видеокамера. Ось растяжения перпендикулярна плоскости рисунка. *b)* Фотография деформационной полосы: *A* и *B* — на противоположных фронтальных поверхностях, *C* — на боковой поверхности.

лась скоростная видеосъемка со скоростью 500 кадров в секунду цифровой видеокамерой VS-FAST/G6 научной производственной компании „Видеоскан“. Обработка видеофильма состояла в вычитании с помощью компьютерной программы последовательных во времени кадров видеофильма. При такой методике обработки изображений выделяются только движущиеся объекты — распространяющиеся полосы деформации. Пространственное разрешение оптического метода регистрации полос составляло  $8 \mu\text{m}/\text{pixel}$ , временное —  $2 \text{ms}$ . Подробнее методика изложена в [8,9].

Для экспериментального исследования динамики и геометрии полос деформации важно не только достаточно высокое быстродействие и чувствительность используемых методов измерения, но и возможность получать объемную картину макролокализации деформации, используя, например, одновременную съемку боковой поверхности и противоположных фронтальных поверхностей деформируемого плоского образца с помощью двух зеркал (рис. 1).

Акустический датчик, выполненный на основе титаната бария, укреплялся через слой масла на нижней лопатке образца, связанной с базой (станиной испытательной машины). Сигнал пьезодатчика  $\varphi(t)$  усиливался широкополосным высокоомным предусилителем (полоса пропускания  $1-10^6 \text{ Hz}$ ), регистрировался осциллографом и одновременно с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) подавался на компьютер. Для синхронизации сигналов АЭ с данными видеосъемки изображение

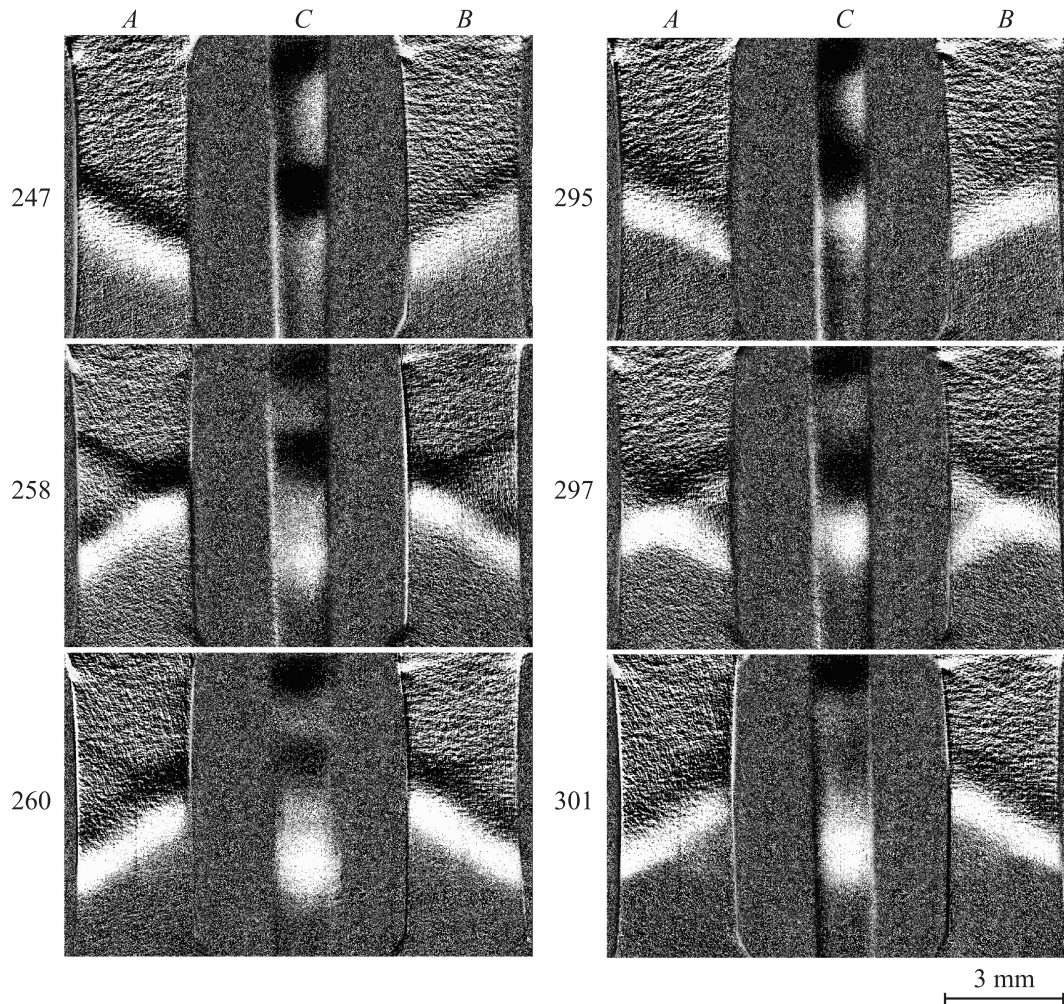
экрана осциллографа с помощью собирающей линзы проецировалось через небольшое отверстие в стальном экране (необходимом для защиты измерительной ячейки от помех) на объектив видеокамеры. Такое устройство позволяло наблюдать в поле зрения видеокамеры поверхность деформируемого образца и одновременно перемещение луча осциллографа для последующей синхронизации видеофильма с акустическими сигналами, записанными с помощью АЦП и компьютера (см. рис. 2 в работе [7]).

### 3. Результаты и обсуждение

3.1. Оптический мониторинг деформационных полос. В отличие от солитоноподобных полос деформации *A*, *B* и *C* в условиях эффекта ПЛШ, когда задается постоянная скорость деформирования  $\dot{\epsilon}_0 = \text{const}$  в жесткой испытательной машине, при нагружении с постоянной скоростью роста напряжения  $\dot{\sigma}_0 = \text{const}$  в мягкой машине полосы деформации представляют собой расширяющиеся шейки [9,10]. Для выяснения их роли в развитии скачка пластической деформации в серии экспериментов проводили синхронную видеосъемку противоположных фронтальных поверхностей образца и боковой поверхности с использованием схемы видеосъемки с помощью двух зеркал (рис. 1).

Анализ видеофильмов показывает, что картина деформационных полос на противоположных фронтальных поверхностях абсолютно идентична (рис. 2). Поэтому можно утверждать, что полоса макролокализованной деформации — сквозная, т.е. представляет собой объемный домен с более высокой скоростью пластической деформации, чем область образца вне полосы. Объем этого домена приблизительно равен произведению толщины плоского образца  $w$  на площадь  $A$ , заключенную между границами полосы. Для оценки вклада в скачкообразную деформацию полос деформации, регистрируемых данным оптическим методом (включающем скоростную цифровую видеосъемку и оригинальную методику компьютерной обработки изображений [8]), суммарную площадь всех полос, появившихся на поверхности к данному моменту времени, т.е.  $A_\Sigma(t)$ , сравнивали с формой скачка деформации  $\Delta\epsilon(t)$ .

На рис. 3 представлено сравнение временной зависимости суммарной площади полос  $A_\Sigma(t)$ , распространяющихся на фронте достаточно крупного скачка деформации амплитудой около 6%, и формы фронта деформационного скачка  $\Delta\epsilon(t)$ . Коэффициент корреляции этих зависимостей, рассчитанный с помощью программы MathCad, равен  $k = 0.9931$ . Столь высокая корреляция зависимостей  $A_\Sigma(t)$  и  $\Delta\epsilon(t)$  с величиной  $k$  в интервале  $0.9930-0.9985$  характерна для всех деформационных скачков вплоть до последнего скачка с разрывом образца. Поэтому полосы макролокализованной деформации дают основной вклад в скачкообразную деформацию образца, т.е. почти вся пластическая деформация на фронте деформационных скачков осуществляется полосами.



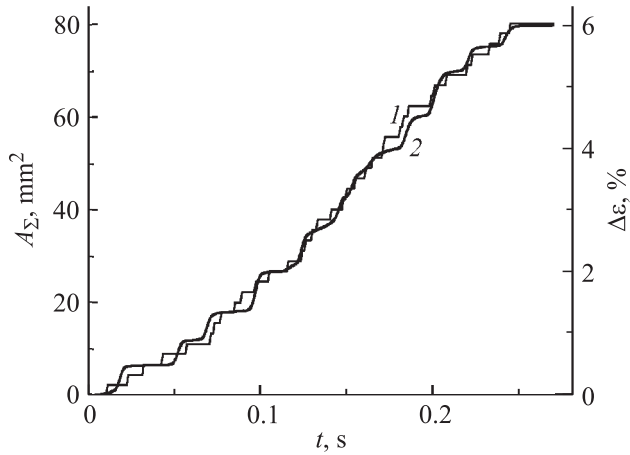
**Рис. 2.** Результаты компьютерной обработки фрагмента видеопленки распространяющихся полос деформации в ходе развития деформационного скачка в сплаве АМг6. Скорость съемки 500 кадров в секунду. Числа — номера кадров. Ось растяжения вертикальна.

Этот факт, с одной стороны, подтверждает корректность применяемого метода регистрации полос, а с другой — позволяет свести исследование скачкообразной деформации к исследованию деформационных полос.

Таким образом, деформационные скачки происходят за счет зарождения и роста полос макролокализованной деформации, которые являются доменами высокоскоростной деформации. В плоской геометрии образца, как установлено, эти домены сквозные. В ходе развития деформационного скачка их объем растет за счет увеличения площади полосы при неизменной толщине, равной толщине образца. Поэтому, как и в [11], кинетику скачкообразной деформации можно рассматривать аналогично кинетике фазового перехода и использовать в качестве кинетической кривой „фазового перехода“ временную зависимость суммарной площади полос  $A_{\Sigma}(t)$  как кривую роста „новой фазы“ (домена пластической деформации) в пластически недеформированном материале — „старой фазе“. Явление акустической эмиссии при фазовых переходах первого рода хорошо известно [12–17].

Можно ожидать, что наиболее быстрые стадии роста деформационных полос будут сопровождаться генерированием сигналов акустической эмиссии. Действительно, в работе [18] обнаружено, что при деформировании сплава системы Al–Mg в жесткой испытательной машине при  $\dot{\epsilon}_0 = \text{const}$  каждый тип неустойчивости на деформационных кривых *A*, *B* и *C* сопровождается характерным сигналом АЭ, причем отдельному скачку разгрузки машина–образец соответствует всплеск сигнала АЭ, который по визуальным наблюдениям связывается с эволюцией полос деформации. В [19] с помощью метода АЭ зафиксировано зарождение деформационной полосы по повышению энергии сигнала и смещению спектра АЭ в сторону низких частот.

Отличительной особенностью настоящей работы является использование синхронно с измерением акустических сигналов методики одновременной регистрации с помощью скоростной видеокамеры деформационных полос на различных поверхностях образца, деформируемого с постоянной скоростью возрастания прило-



**Рис. 3.** Сравнение временной зависимости площади полос  $A_{\Sigma}$  (1) и формы фронта скачка деформации  $\Delta\varepsilon$  (2). Коэффициент корреляции между зависимостями  $A_{\Sigma}(t)$  и  $\Delta\varepsilon(t)$   $k = 0.9931$ .

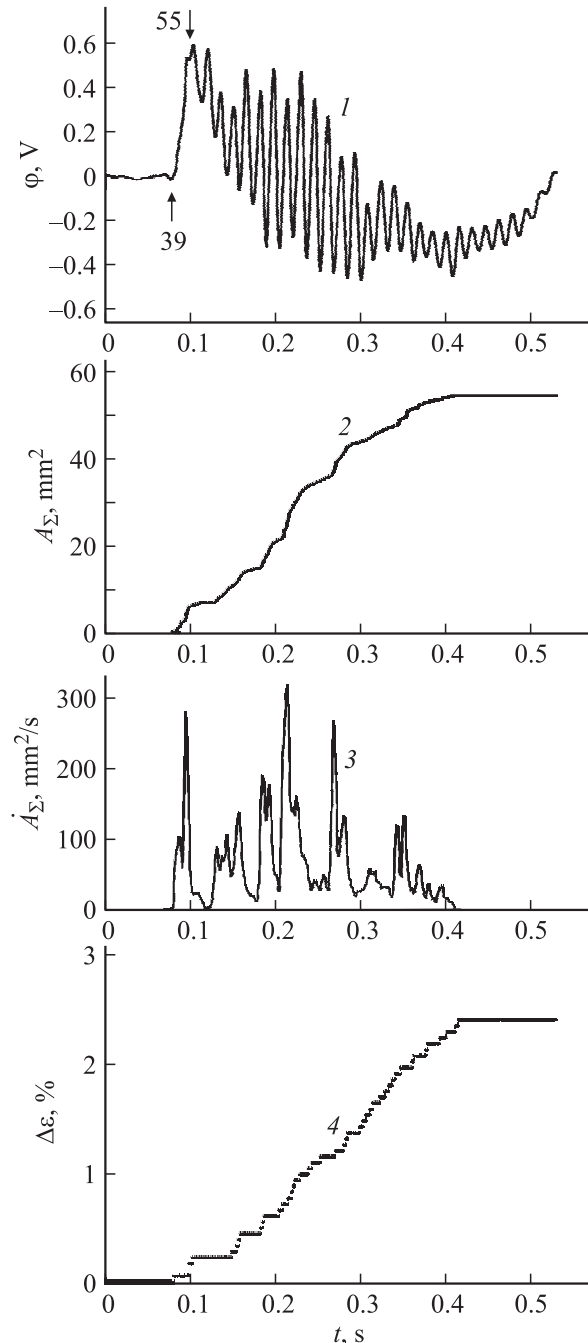
женного напряжения  $\sigma_0 = \text{const}$ . Далее рассматриваются основные особенности сигнала акустической эмиссии, вызванного развитием первых деформационных полос на фронте скачка деформации сплава АМг6, состаренного при температуре 250°С.

3.2. Сигнал акустической эмиссии, вызванный развитием первого скачка деформации. На рис. 4 представлены синхронные записи сигнала АЭ — временной зависимости потенциала  $\varphi$  (1) акустического датчика („осциллограмма“ сигнала АЭ), временных зависимостей суммарной площади полос  $A_{\Sigma}$  (2), скорости роста площади полос  $\dot{A}_{\Sigma}$  (3) и формы первого скачка деформации  $\Delta\varepsilon$  (4), построенной по данным видеосъемки. На рис. 5 представлен соответствующий этому временному интервалу фрагмент видеозаписи начальной стадии зарождения и развития полос деформации на фронтальной поверхности образца. Зависимость  $\dot{A}_{\Sigma}(t)$  приведена здесь как характеристика нестационарности деформации, осуществляемой полосами, что представляется важным для сравнения с сигналом АЭ.

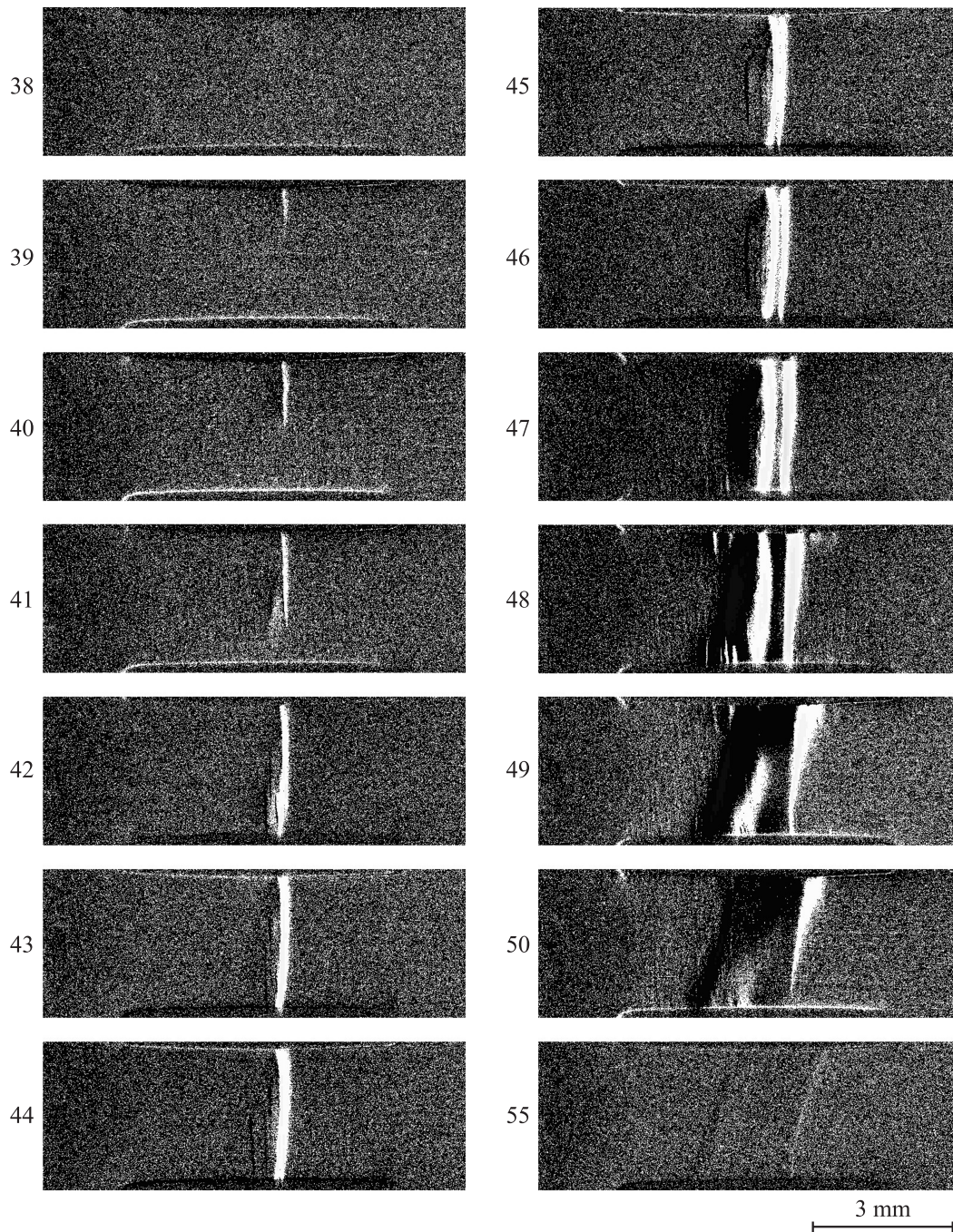
Данные видеосъемки со скоростью 500 кадров в секунду показывают, что потеря устойчивого пластического течения начинается с зарождения первичной полосы на оптически гладкой поверхности образца (рис. 5, кадр 39). Первичная полоса зарождается обычно в некоторой точке на ребре кристалла и распространяется на фронтальной поверхности вдоль направления, перпендикулярного оси растяжения, а на боковой — в направлении, составляющем угол около 45° к оси растяжения [6]. В первые миллисекунды ширина первичной полосы не превышает величины порядка размера зерна (10–20  $\mu\text{m}$ ), а через несколько десятков миллисекунд первичная полоса локализованного сдвига переходит в расширяющуюся шейку (рис. 5, кадры 49, 50; см. также рис. 2 в работе [10]), составляющую на фронтальной поверхности угол 53–63°, а на боковой — около 90°

к оси растяжения. Начальная ширина полосы-шейки составляет уже около 2 mm.

Первый пик зависимости  $\dot{A}_{\Sigma}(t)$  связан с начальной стадией зарождения и распространения первичной узкой полосы локализованного сдвига и резким переходом ее в расширяющуюся шейку (кадры 39–48 на рис. 5).



**Рис. 4.** Результаты обработки данных акустического и оптического мониторинга первого скачка деформации сплава АМг6 с преципитатной микроструктурой. 1 — сигнал АЭ  $\varphi(t)$ , 2 — временная зависимость суммарной площади полос  $A_{\Sigma}(t)$ , 3 — зависимость  $\dot{A}_{\Sigma}(t)$ , 4 — форма скачка деформации  $\Delta\varepsilon(t)$ . Числа 39 и 55 — номера кадров видеопленки, показанных на рис. 5.

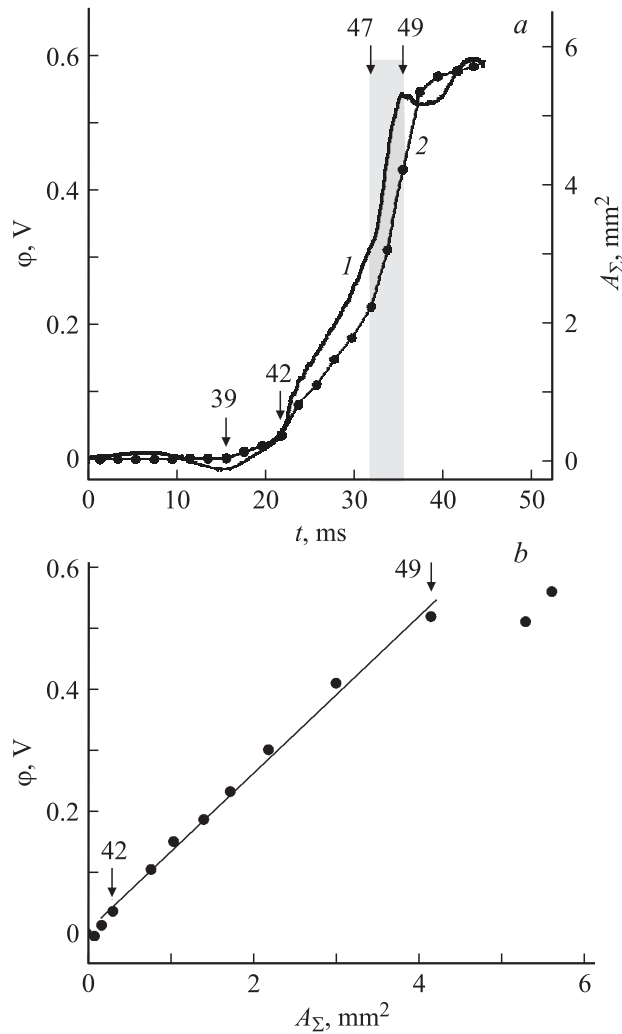


**Рис. 5.** Результаты компьютерной обработки видеопленки роста деформационных полос на фронте первого скачка деформации. Фронтальная съемка (вид со стороны поверхности  $3 \times 6$  mm). Числа — номера кадров. Временной интервал между кадрами 2 ms. Ось растяжения горизонтальна.

Этот нестационарный процесс продолжительностью около 18 ms „толкает“ систему машина–образец на частоте, близкой к резонансной (период собственных колебаний системы на данном участке кривой нагружения равен 15 ms). Это приводит к раскачке системы на ее собственной частоте с затуханием после окончания скачка деформации, т. е. спустя приблизительно 0.4–0.5 s после зарождения первичной полосы деформации. Поэтому корреляцию акустического сигнала с динамикой полос

деформации имеет смысл искать только на начальной стадии развития пластической неустойчивости продолжительностью 18–20 ms.

На рис. 6, а сравниваются временные зависимости сигнала акустического датчика  $\varphi(t)$  (кривая 1) и площади полос  $A_{\Sigma}(t)$  (кривая 2) для начальной стадии развития полос, представленной кадрами 38–55 на рис. 5. Коэффициент корреляции между зависимостями  $\varphi(t)$  и  $A_{\Sigma}(t)$  на этом временном отрезке весьма высокий,



**Рис. 6.** Связь между акустическим сигналом  $\varphi(t)$  и площадью полос  $A_{\Sigma}(t)$  на начальной стадии развития первых полос деформации: *a* — сравнение формы фронта акустического сигнала (1) и временной зависимости суммарной площади полос (2), коэффициент корреляции между зависимостями  $\varphi(t)$  и  $A_{\Sigma}(t)$   $k = 0.9856$ ; *b* — зависимость  $\varphi(A_{\Sigma})$ . Числа — номера кадров видеофильма, показанных на рис. 5.

$k = 0.9856$ , и, как хорошо видно, формы этих зависимостей почти совпадают. Видно также, что основные особенности динамики полос на этой стадии отражены в особенностях акустического сигнала. Первое заметное изменение сигнала АЭ соответствует стадии зарождения и незавершенного роста первичной полосы, когда она пересекает поперечное сечение образца со скоростью около 0.4 м/с (кадры 39–42). Затем начинается активный рост сигнала АЭ с почти постоянной скоростью продолжительностью 10 мс, которому соответствует расширение первичной полосы также приблизительно с постоянной скоростью. Наконец, как и ожидалось, наибольшая скорость роста сигнала АЭ и соответственно площади полос происходит на стадии перехода первичной полосы в расширяющуюся шейку (кадры 47–49) продолжитель-

ностью 4–6 мс. Соответствующий временной интервал выделен серой полосой на рис. 6, *a*. Затем скорость расширения полосы затухает во времени (кадры 50–55) и соответственно уменьшается корреляция между ростом площади  $A_{\Sigma}(t)$  и акустическим сигналом  $\varphi(t)$ , который теперь будет регистрировать в основном лишь собственные колебания системы машина-образец.

Наиболее высокая корреляция функций  $\varphi(t)$  и  $A_{\Sigma}(t)$  наблюдается на начальном временном интервале между кадрами 42 и 49. Зависимость  $\varphi(A_{\Sigma})$  на этом интервале носит линейный характер  $\varphi = mA_{\Sigma}$  (рис. 6, *b*), где  $m (= 0.13 \text{ V/mm}^2)$  — коэффициент пропорциональности, который зависит от чувствительности акустического метода регистрации напряжения (т.е. от коэффициента электромеханической связи пьезопреобразователя, жесткости и собственных частот системы машина-образец и т.д.).

3.3. Механизмы распространения деформационных полос и генерирования акустических сигналов. Обсудим возможные источники дальнедействующих упругих полей напряжений, способных вызвать акустические сигналы, связанные с распространением деформационных полос. Отметим, что при температурах порядка и выше дебаевской пластические неустойчивости разделяют на деформационную неустойчивость (неустойчивость Людерсова типа) и скоростную неустойчивость (неустойчивость ПЛШ-типа) [20–22]. Людерсову неустойчивость связывают преимущественно с лавинообразным размножением дислокаций на фронте полосы Людерса, а неустойчивость ПЛШ-типа — с процессом динамического деформационного старения дислокаций. Этот процесс понижает скоростную чувствительность деформирующего напряжения к скорости пластической деформации до отрицательных значений и, как следствие, к локализации деформации в распространяющихся солитоноподобных полосах деформации [22,23]. Несмотря на то что эти неустойчивости имеют совершенно различную природу, одни и те же механизмы пространственной связи между соседними сечениями материала предлагались для объяснения экспериментальных зависимостей скорости  $v_b$  и ширины  $w_b$  полосы Людерса и полос ПЛШ-типов А и В от температуры и скорости деформирования. Без решения проблемы пространственной связи величины  $v_b$  и  $w_b$  оставались неопределенными для деформационных полос различных типов.

Среди обсуждаемых в литературе механизмов пространственной связи следует выделить механизм двойного поперечного скольжения (ДПС) винтовых дислокаций [24] и механизмы, связанные с активацией скольжения избыточным сдвиговым напряжением на фронте деформационной полосы [25,26,28–33]. Оба типа механизмов, как показал анализ Ханера [25,26], дают дополнительный диффузионно-подобный терм, пропорциональный лапласиану деформационного поля  $\nabla^2 \varepsilon$ , в уравнение Пеннинга [27], связывающее напряжение течения  $\sigma$  с деформацией  $\varepsilon$  и скоростью деформации

$\dot{\varepsilon}$  материала. Этот терм впервые гипотетически ввел Айфангис [28,29]. Из-за сравнительно небольших значений высоты поперечного скольжения  $h_s \sim 1-10$  nm механизм ДПС способен объяснить тонкую структуру и скорость расширения линий и полос скольжения (микро- и мезоуровень) в металлах [30], но для понимания механизма передачи скольжения на расстояние в десятки и сотни микрон предпочтительными являются механизмы активации скольжения дальнедействующими полями напряжений.

Наиболее общей причиной возникновения избыточных напряжений на фронте полосы деформации является упругая аккомодация на границе между пластически деформируемым и недеформированным слоями материала. В дискретной модели активации скольжения образец „составляют“ из параллельных скользящих блоков равной толщины  $l$ , соединенных квазиупругими связями [22,31]. В континуальном пределе, в приближении „ближайших соседей“ дополнительное напряжение на активном фронте полосы дается в виде [22]

$$\tau = hl^2 \partial^2 \varepsilon / \partial x^2, \quad (1)$$

где  $h$  — коэффициент упрочнения,  $l$  — характерный размер неоднородности пластического течения, а ось  $x$  совпадает с направлением растяжения.

В поликристаллах несовместность деформации соседних зерен в области неоднородной деформации дает дополнительное напряжение в форме (1) с коэффициентом при лапласиане  $\nabla_x^2 \varepsilon$ , равном  $Gd/4$ , где  $d$  — размер зерна, а  $G$  — модуль сдвига [26], что позволяет сделать оценку характерного размера области неоднородного пластического течения

$$l = d \sqrt{G/4h}. \quad (2)$$

Подставляя для начальной стадии развития первой полосы деформации в сплаве АМг6  $h = \partial \sigma / \partial \varepsilon = 1.3$  GPa и  $G = 28$  GPa,  $d \approx 7.5$   $\mu\text{m}$ , получим оценку величины  $l \approx 18$   $\mu\text{m}$ .

Диффузионно-подобная пространственная связь (1) может быть вызвана также а) перенапряжением, создаваемым изгибающим моментом, который обусловлен локализацией решеточного поворота в узкой области на фронте полосы вследствие интенсивного сдвига [32–34]; б) перенапряжением, связанным с локальным изменением сечения в деформационной полосе, которая представляет собой распространяющуюся шейку (фактор Бриджмена [35,36]).

Принципиально иной причиной перенапряжения на фронте распространяющейся полосы может быть генерация геометрически необходимых дислокаций, плотность которых  $\rho_G$  пропорциональна градиенту первого порядка  $\nabla_x \varepsilon$ . Согласно градиентной теории пластичности Флека–Хатчинсона [37,38], величина

$$\rho_G = \frac{1}{b} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \quad (3)$$

дает аддитивный вклад в тейлоровское упрочнение в области неоднородной деформации

$$\sigma = \sigma_0 + m\alpha G b \sqrt{\rho_S + \rho_G}, \quad (4)$$

где  $\sigma_0$  — предел текучести,  $m$  — фактор Тейлора (для ГЦК-поликристаллов  $m = 3.08$  [39,40]),  $\alpha$  — постоянная, зависящая от дислокационной структуры,  $b$  — величина вектора Бюргерса,  $\rho_S$  — плотность статистически накопленных дислокаций. Из этой теории следует оценка характерного размера неоднородности сдвиговой деформации [41]

$$l = 18\alpha^2 (G/\sigma_h)^2 b, \quad (5)$$

где  $\sigma_h = \sigma_0 + m\alpha G b \sqrt{\rho_S}$  — напряжение течения в условиях гомогенной деформации, т.е. в отсутствие градиента пластического течения и связанных с ним геометрически необходимых дислокаций. На монотонном (без скачков) участке диаграммы деформации в сплавах системы Al–Mg с содержанием магния 3–6 wt.% формируется почти однородная структура дислокационных сплетений, в которой с ростом деформации появляются и растут микрополосы шириной 0.2–0.4  $\mu\text{m}$  [42,43]. Согласно [44], такой дислокационной структуре соответствует значение коэффициента  $\alpha$  в интервале 0.36–0.45. Для оценки величины  $l$  по формуле (5) возьмем типичное значение напряжения появления первого скачка в исследуемом сплаве АМг6 с преципитатной микроструктурой  $\sigma_h \approx 210-230$  МПа и  $b = 0.286$  nm, тогда получим  $l \approx 10-20$   $\mu\text{m}$ . Отметим, что мягкая деформационная машина не разгружается во время деформационного скачка и приложенное напряжение в ходе развития скачка сохраняется равным напряжению перед скачком деформации  $\sigma_h$ , когда деформация происходила макроскопически однородно.

Таким образом, различные теории градиентной пластичности дают одинаковую по порядку величины оценку ширины слоя сильно неоднородной пластической деформации („ширины“ границы полосы), в котором сосредоточены избыточные напряжения:  $l \approx 10-20$   $\mu\text{m}$ . Эта оценка совпадает с минимальной шириной первичной полосы локализованного сдвига, пересекающей сечение образца со скоростью вершины  $v_t \sim 0.3-1$  м/с. В первые миллисекунды своего развития эта полоса является строчкой светлых пикселей, что соответствует деформационным процессам в соседних зернах с близким фактором Шмида (см. также [6,45]). Далее в ходе эволюции полосы ее границы сохраняют ширину порядка 10–30  $\mu\text{m}$ . Избыточные напряжения в градиентном слое шириной  $l$ , с одной стороны, способствуют распространению полосы деформации, а с другой — являются источником сигнала АЭ. Поэтому важность изучения АЭ в ходе прерывистой деформации состоит в том, что природа акустического сигнала непосредственно связана с механизмом распространения полос деформации. Следует отметить, что избыточные напряжения на границе расширяющейся полосы играют роль поверхностного натяжения „деформационного домена“ (области макролокализованной интенсивной деформации), что является

дополнительным обоснованием аналогии между ростом полосы деформации и ростом домена новой фазы при фазовых переходах первого рода.

Отметим также, что по данным видеосъемки скорость вершины полосы  $v_t \sim 0.3\text{--}1\text{ м/с}$  и скорость ее бокового роста  $v_s \sim 1\text{--}10\text{ см/с}$  значительно меньше скорости звука  $c$ , поэтому можно пренебречь эффектами запаздывания (характерные времена запаздывания  $\Delta t \sim L/c \sim 10^{-6}\text{ с}$ , где  $c \sim 3 \cdot 10^3\text{ м/с}$ ,  $L \sim 3\text{ мм}$  — расстояние от границы полосы до пьезодатчика) и рассматривать акустический сигнал в ближней зоне излучения. Тогда сигнал АЭ — потенциал пьезопреобразователя — должен расти одновременно с перемещением границы полосы как основного источника внутренних дальнедействующих напряжений, что хорошо согласуется с экспериментом.

## 4. Заключение

Таким образом, на основе прямого наблюдения деформационных полос с помощью скоростной видеосъемки и одновременно измерения сигнала акустической эмиссии в работе выявлена связь между сигналом АЭ и эволюцией первых полос деформации на начальной стадии развития деформационного скачка в плоском образце сплава АМгб с преципитатной микроструктурой. Установлено, что в первые  $\sim 10\text{ мс}$  после зарождения первичной полосы рост электрического потенциала на пьезопреобразователе  $\varphi(t)$  определяется ростом площади полос  $A_\Sigma(t)$ . Затем корреляция между акустическим сигналом и динамикой деформационных полос падает вследствие возбуждения собственных колебаний системы машина–образец. Поэтому наиболее информативной характеристикой сигнала АЭ, генерируемого в ходе скачкообразной деформации, является рост потенциала пьезопреобразователя  $\varphi(t)$  в первые  $\sim 10\text{ мс}$ , который, как установлено, обусловлен зарождением и начальной стадией распространения первых деформационных полос. Поскольку продолжительность скачка деформации обычно составляет  $300\text{--}500\text{ мс}$ , резкий рост сигнала АЭ в первые  $\sim 10\text{ мс}$  после зарождения первичной полосы деформации можно рассматривать как акустический предвестник деформационного скачка. Акустические сигналы-предвестники могут быть использованы для запуска устройств с положительной или отрицательной обратной связью для усиления или подавления деформационных скачков соответственно.

Наиболее вероятным источником акустического сигнала, сопровождающего расширение деформационной полосы, являются избыточные напряжения сдвига в узком слое шириной  $\sim 10\text{--}30\text{ мкм}$  вблизи границы полосы. Эти избыточные напряжения, обусловленные неоднородностью пластического течения на границе между пластически деформируемой и пластически недеформируемой макрообластями материала, рассматриваются в литературе как один из основных механизмов распространения деформационных полос. Поэтому исследование

акустической эмиссии в ходе прерывистой деформации сплавов помимо прикладного аспекта, связанного с возможным использованием акустических предвестников потери механической устойчивости материала, важно и для измерения избыточных напряжений на границе полосы, что позволит тестировать теоретические модели пространственной связи, отвечающей за распространение деформационных полос.

## Список литературы

- [1] Дж.Ф. Белл. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. Наука, М. (1984). Ч. 2. 432 с.
- [2] A. Portevin, F. Le Chatelier. Trans. Am. Soc. Steels Treating **5**, 457 (1924).
- [3] М.В. Маркушев, М.Ю. Мурашкин. ФММ **91**, 5, 97 (2001).
- [4] М.В. Маркушев, М.Ю. Мурашкин. ФММ **92**, 1, 90 (2001).
- [5] А.А. Шибков, А.А. Мазилкин, С.Г. Протасова, Д.В. Михлик, А.Е. Золотов, М.А. Желтов, А.В. Шуклинов. Деформация и разрушение материалов **5**, 24 (2008).
- [6] А.А. Шибков, А.Е. Золотов, Д.В. Михлик, М.А. Желтов, А.В. Шуклинов, В.А. Аверков, А.А. Денисов. Деформация и разрушение материалов **8**, 23 (2009).
- [7] А.А. Шибков, А.Е. Золотов. Кристаллография, в печати (2010).
- [8] А.А. Шибков, М.А. Лебедкин, М.А. Желтов, В.В. Скворцов, Р.Ю. Кольцов, А.В. Шуклинов. Завод. лаб. **71**, 7, 20 (2005).
- [9] А.А. Шибков, Р.Ю. Кольцов, М.А. Желтов, А.В. Шуклинов, М.А. Лебедкин. Изв. РАН. Сер. физ. **70**, 9, 1372 (2006).
- [10] А.А. Шибков, А.Е. Золотов. Письма в ЖЭТФ **90**, 5, 412 (2009).
- [11] М.М. Криштал. Изв. РАН. Сер. физ. **68**, 10, 1391 (2004).
- [12] В.А. Плотников, Д.В. Коханенко. ФММ **97**, 4, 34 (2004).
- [13] I.A. Varon, M. Rosen. Acta Met. **30**, 9, 655 (1982).
- [14] Ю.П. Гололобов, И.Н. Саливанов. ФТТ **33**, 1, 298 (1991).
- [15] С.Н. Задумкин, Х.Б. Хоконов, Х.Б. Шокаров. ЖЭТФ **68**, 2, 1315 (1975).
- [16] Э.Л. Лубе, Х.С. Багдасаров, Е.А. Федоров, А.Т. Златкин, Е.В. Антонов. Кристаллография **27**, 3, 584 (1982).
- [17] S. Sreekala, G. Ananthakrishna. Phys. Rev. Lett. **90**, 13, 13550 (2003).
- [18] М.М. Криштал, Д.Л. Мерсон. ФММ **81**, 1, 156 (1996).
- [19] М.М. Криштал, А.К. Хрусталева, А.А. Разуваев, И.С. Демин. Деформация и разрушение материалов **1**, 28 (2008).
- [20] U.F. Kocks. Progr. Mater. Sci. **19**, 185 (1981).
- [21] Y. Estrin. Solid State Phenomena. **3–4**, 417 (1988).
- [22] Y. Estrin, L.P. Kubin. In: Continuum models for materials with microstructure / Ed. H.-B. Muhlhaus. Wiley & Sons, N.Y. (1995). P. 395.
- [23] K. Chihab, Y. Estrin, L.P. Kubin, J. Vergnol. Scripta Met. **21**, 203 (1987).
- [24] V. Jeanclaude, C. Fressengeas. Scripta Met. **29**, 1177 (1993).
- [25] P. Hahner. Scripta Met. Mater. **29**, 9, 1171 (1993).
- [26] P. Hahner. Mater. Sci. Eng. A **164**, 23 (1993).
- [27] P. Penning. Acta Met. **20**, 1169 (1972).
- [28] E.C. Aifantis. Am. Soc. Mech. Eng. J. Eng. Mater. Techn. **106**, 4, 326 (1984).
- [29] E.C. Aifantis. Int. J. Eng. Sci. **30**, 10, 1279 (1992).



- [30] H. Neuhauser. In: Dislocation in solids / Ed. F.R.N. Nabarro. North Holland Company, Amsterdam (1983). V. 6. P. 319.
- [31] М.А. Лебедкин, Л.Р. Дунин-Барковский. ЖЭТФ **113**, 5, 1816 (1998).
- [32] H. Neuhauser, O.B. Arkan. Phys. Status Solidi A **100**, 2, 441 (1987).
- [33] O.B. Arkan, H. Neuhauser. Phys. Status Solidi A **99**, 2, 385 (1987).
- [34] A. Neuhäuser, A. Hampel. Scripta Met. Mater. **29**, 1151 (1993).
- [35] P.W. Bridgman. Studies in large plastic flow and fracture. Mc.Graw-Hill, N.Y. (1952). 444 p.
- [36] P. Hahner, A. Ziegenbein, E. Rizzi, H. Neuhauser. Phys. Rev. B **65**, 13, 134 109 (2002).
- [37] N.A. Fleck, J.W. Hutchinson. Adv. Appl. Mech. **33**, 295 (1997).
- [38] R.K. Abu Al-Rub, G.Z. Voyiadjis. Int. J. Plasticity. **22**, 654 (2006).
- [39] G.I. Taylor. J. Inst. Met. **62**, 307 (1938).
- [40] U.F. Kocks. Am. Soc. Mech. Eng. J. Eng. Mater. Tech **98**, 76 (1976).
- [41] H. Gao, Y. Huang, W.D. Nix, J.W. Hutchinson. J. Mech. Phys. Solid **47**, 1239 (1999).
- [42] D.A. Hughes. Acta Met. Mater. **41**, 5, 1421 (1993).
- [43] Металловедение алюминия и его сплавов. Справ. изд. / Под ред. А.И. Беляева, О.С. Бочвара, Н.Н. Буйнова. Металлургия, М. (1983). 280 с.
- [44] Н.А. Конева, Э.В. Козлов. В сб.: Перспективные материалы / Под ред. Д.Л. Мерсона. ТГУ, МИСиС, М. (2006). С. 267.
- [45] А.А. Шибков, А.Е. Золотов, Д.В. Михлик, М.А. Желтов, А.В. Шуклинов. Деформация и разрушение материалов **9**, 22 (2009).