

01,07

Электромагнитная эмиссия при развитии макроскопически неустойчивой пластической деформации металла

© А.А. Шибков, С.А. Титов, М.А. Желтов, М.Ф. Гасанов, А.Е. Золотов,
К.А. Проскуряков, А.О. Жигачев

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

E-mail: shibkov@tsu.tmb.ru

(Поступила в Редакцию 2 июня 2015 г.)

Обнаружена и экспериментально исследована электромагнитная эмиссия, сопровождающая прерывистую деформацию алюминий-магниевого сплава АМг6. С помощью высокоскоростной видеосъемки и комплекса методов измерения деформации, нагрузки и потенциала электрического поля установлена связь сигналов электромагнитной эмиссии с динамикой деформационных полос. Обсуждаются возможные механизмы генерирования электромагнитных сигналов.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 15-12-00035).

1. Введение

Известно, что пластическая деформация и разрушение твердых тел сопровождаются генерацией в широкой полосе частот акустической и в ряде случаев электромагнитной эмиссии. Электромагнитная эмиссия (ЭМЭ) — нестационарное (скачкообразное) изменение потенциала электрического поля вблизи деформируемого кристалла, т.е. в ближней зоне излучения, когда длина электромагнитной волны значительно превышает дистанцию между зондом и источником излучения. Дискретные сигналы ЭМЭ в полосе частот 10^3 – 10^6 Hz, как правило, сопровождают пластическую деформацию высокоомных кристаллических материалов: полупроводников [1], твердых диэлектриков [2–7], льда [8–11] и др. — и отражают неустойчивые процессы структурной релаксации преимущественно на мезоскопическом структурном уровне, связанные с динамикой скоплений заряженных дислокаций [11] и электрически активных берегов микро- и мезотрещин [8,12]. В [13] зарегистрированы сигналы ЭМЭ при развитии прерывистой деформации алюминиевого сплава АМг3 в условиях обледенения, связанные в основном с динамикой электрически активной ледяной корки при зарождении и распространении полос деформации на поверхности металла. Наконец, автор работы [14] наблюдал сигналы ЭМЭ в процессе прерывистой деформации Портевена–Ле Шателье в алюминиевом сплаве $AlCu_4PbMgMn$ и стали С45 и связал это явление в основном с разрывом окисной пленки при выходе на поверхность дислокационных скоплений.

Цель настоящей работы — экспериментально исследовать связь характеристик сигнала ЭМЭ с развитием полос макролокализованной деформации и скачков деформации в алюминий-магниевого сплаве АМг6, демонстрирующем ярко выраженную прерывистую деформацию при комнатной температуре [15].

2. Методика

Поликристаллические образцы сплава АМг6 ($Al-6.03$ wt.% $Mg-0.5$ wt.% Mn) в форме двухсторонних лопаток с размером рабочей части $6 \times 3 \times 0.5$ mm вырезались из листового проката после холодной прокатки (степень обжатия 0.3). Образцы предварительно отжигались в течение часа при температуре $450^\circ C$ и закаливались на воздухе. После термообработки размер зерна составил $10 \mu m$. Растяжение образцов проводилось с постоянной скоростью возрастания напряжения $\dot{\sigma}_0 = 0.4$ МПа/с при комнатной температуре в мягкой деформационной машине, описанной в [16]. Деформация образца измерялась с помощью триангуляционного датчика положения фирмы Ritec с точностью $1.5 \mu m$ в полосе 0–2 kHz, а силовой отклик механической системы машина–образец измерялся с помощью датчика усилия Zemic H3-C3-100 kg-3В с чувствительностью $1.5 \mu m$. Скорость регистрации данных этих датчиков устанавливалась равной 2 kHz. Измерения датчиков синхронизировались с высокоскоростной цифровой видеокамерой VS-FAST/G6 НПК „Видеоскан“. Система синхронизации временных и видеорядов описана в [17]. Скорость видеосъемки поверхности составляла 500 frames/s. Для контрастирования изображений использовалась компьютерная программа вычитания последовательных цифровых изображений [15,16].

Схема эксперимента показана на рис. 1. Сигнал электромагнитной эмиссии измерялся с помощью плоского емкостного зонда 1, расположенного параллельно фронтальной поверхности рабочей части образца 2. Канал регистрации сигнала ЭМЭ состоял из высокоомного широкополосного предусилителя 3 ($R_{in} = 10^{12} \Omega$, $C_{in} = 20$ pF, полоса пропускания 1– 10^6 Hz, среднеквадратичный шум $10 \mu V$), аналого-цифрового преобразователя (АЦП) 4 и компьютера 5. Деформируемый образец электрически изолировался от испытательной машины

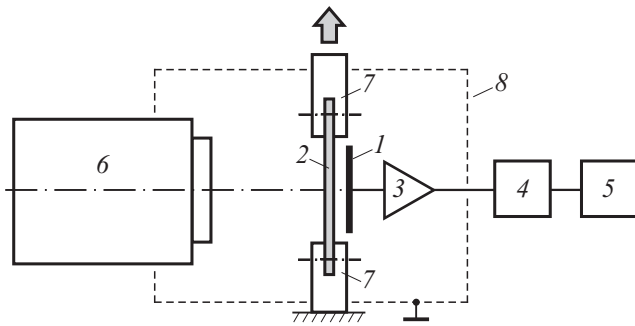


Рис. 1. Схема измерения сигнала ЭМЭ при растяжении плоского образца. 1 — плоский емкостной зонд, 2 — образец, 3 — предусилитель, 4 — АЦП, 5 — компьютер, 6 — скоростная видеокамера, 7 — стеклотекстолитовые захваты, 8 — экран толщиной 10 мм из армо-железа.

с помощью стеклотекстолитовых захватов 7. Измерительная ячейка помещалась в заземленный корпус 8 толщиной 10 мм, изготовленный из армо-железа.

По результатам видеосъемки эволюции деформационных полос строилась корреляционная диаграмма: временная зависимость координаты y границы полосы (полос) и временная зависимость суммарной площади полос $A(t) = \sum A_i(t)$, где A_i — площадь, заключенная между границами расширяющейся полосы. Часть образцов разгружалась после деформирования до разрыва, и измерялся профиль $z(x)$ статических полос с помощью бесконтактного профилометра Wyko NT 9080 с точностью до 10 нм; здесь z и x — проекции точки на фронтальной поверхности образца в направлениях, перпендикулярных этой поверхности и границе деформационной полосы соответственно.

3. Результаты

При растяжении с заданной скоростью роста напряжения $\dot{\sigma}_0 = \text{const}$ алюминий-магниевого сплава с содержанием магния 3–6% демонстрируют ступенчатую кривую деформации — эффект Савара–Массона (см. также [15,16]). В координатах деформация–время или деформация–напряжение (напряжение σ и время t связаны линейно $\sigma = \dot{\sigma}_0 t$ в этих условиях нагружения) ступенчатая кривая растяжения сплава АМг6 и соответствующий сигнал ЭМЭ представлены на рис. 2. Каждая ступень (деформационный скачок) амплитудой $\Delta \varepsilon_m \sim 1\text{--}5\%$ сопровождается импульсным сигналом ЭМЭ амплитудой $\Delta \varphi_m \sim 0.2\text{--}0.8\text{ мВ}$, причем амплитуда электромагнитного сигнала приблизительно линейно растет с увеличением высоты ступени на деформационной кривой, за исключением последнего скачка, на фронте которого происходит разрыв образца (см. вставку на рис. 2).

На рис. 3 приведены записи переднего фронта сигнала ЭМЭ $\varphi_{\text{ЕМЭ}}$ (1), датчика деформации $\Delta \varepsilon$ (2), силового

датчика σ (3), синхронизированные с корреляционной диаграммой y (4) и временной зависимостью суммарной площади A (5), а на рис. 4 представлен фрагмент видеофильма развития деформационных полос, соответствующий развитию деформационного скачка. Стрелками на рис. 3 отмечены характерные моменты эволюции полос, числа у стрелок — номера кадров видеофильма на рис. 4. В структуре деформационного скачка, как видно из рис. 3, имеют место два последовательных скачка (кривая 2). Один обусловлен зарождением и расширением первичной (материнской) полосы, а другой — вторичной полосы и полос более высоких порядков, которые зарождаются на границах предшествующих полос (см. корреляционную диаграмму, кривая 4 на рис. 3).

Из сопоставления кривых 1–5 на рис. 3 видно, что все основные особенности эволюции полос деформации (зарождение, активная фаза расширения полосы, резкое затухание скорости границ полос, зарождение вторичных полос на границах предшествующих полос

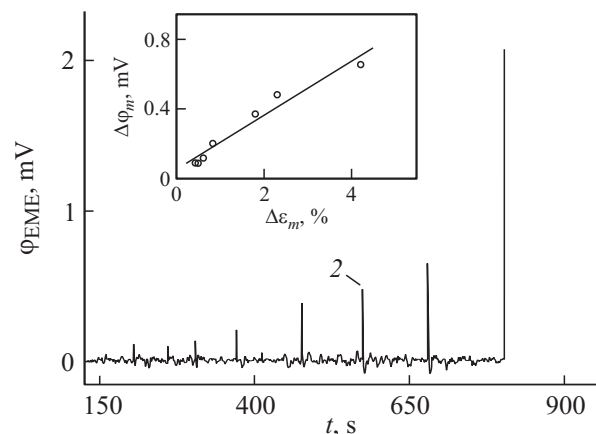
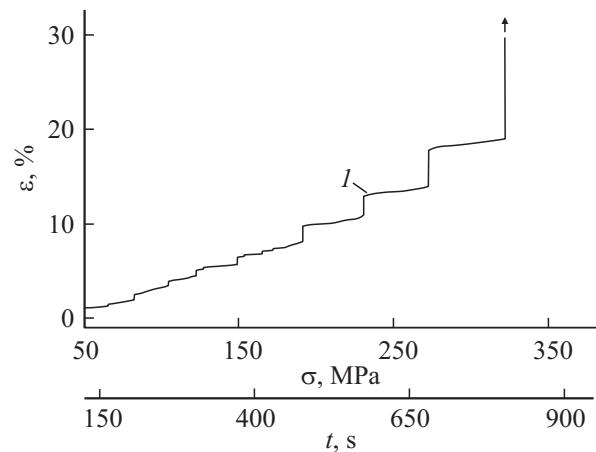


Рис. 2. Фрагмент ступенчатой кривой растяжения (1) с постоянной скоростью роста напряжения $\dot{\sigma}_0 = 0.4\text{ МПа/с}$ и соответствующий сигнал ЭМЭ (2). Стрелкой отмечен момент разрыва. На вставке — зависимость амплитуды сигнала ЭМЭ $\Delta \varphi_m$ от амплитуды деформационного скачка $\Delta \varepsilon_m$ (ступени на деформационной кривой).

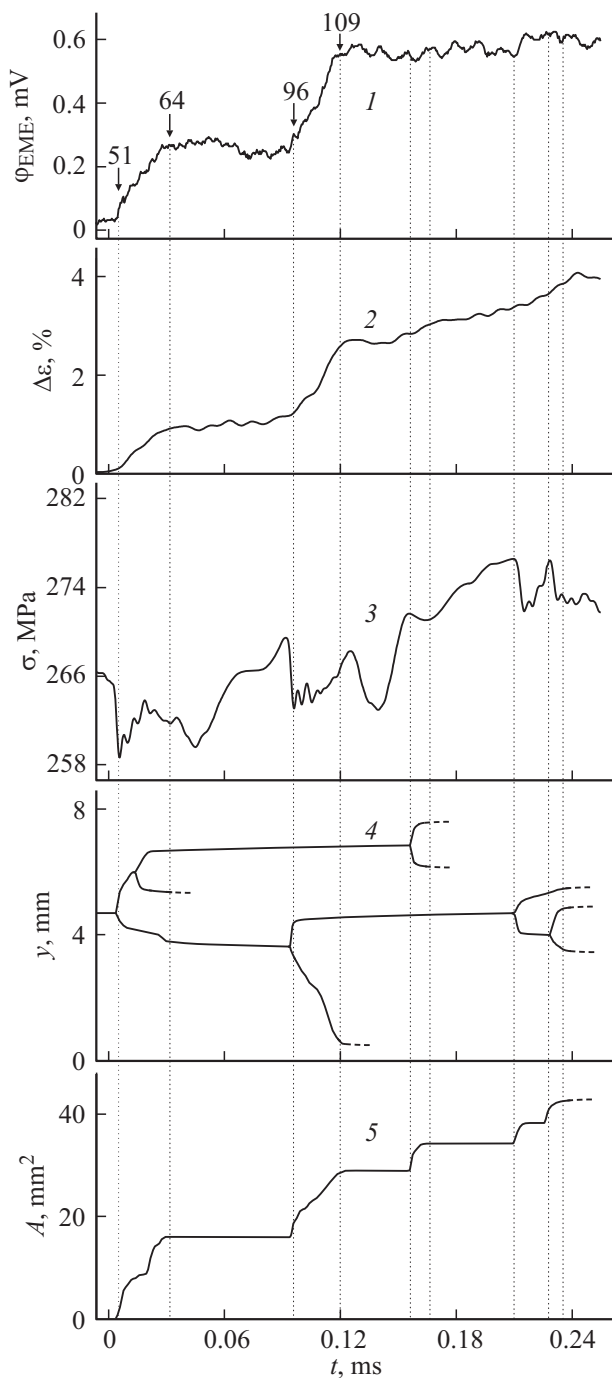


Рис. 3. Результаты обработки данных электромагнитного и оптического мониторинга скачка деформации в сплаве АМгб: 1 — передний фронт сигнала ЭМЭ $\varphi_{ЭМЕ}(t)$, 2 — форма скачка деформации $\Delta\varepsilon(t)$, 3 — силовой отклик $\sigma(t)$, 4 — корреляционная диаграмма $y(t)$, 5 — временная зависимость суммарной площади полос $A(t)$. Числами на кривой 1 отмечены номера кадров видеопленки, показанного на рис. 4.

и т.д.) отражены в структуре измеряемых временных рядов, особенно в структуре силового отклика $\sigma(t)$ (кривая 3) и в структуре сигнала собственной электромагнитной эмиссии $\varphi_{ЭМЕ}(t)$ (кривая 1). Например,

зарождение и активная стадия расширения первичной полосы, отмеченная на фрагменте видеопленки кадрами 50–64, сопровождаются соответствующим ростом сигнала ЭМЭ $\varphi_{ЭМЕ}$, коррелирующим с временной зависимостью площади этой полосы (кривая 5). Подобным образом согласуется на рисунках стадия роста сигнала, соответствующая временному отрезку между кадрами 95–108, на котором происходит зарождение и расширение вторичной деформационной полосы, возникающей на „левой“ (на рис. 4) границе первичной полосы (см. также корреляционную диаграмму $y(t)$, кривая 4 на рис. 3).

Таким образом, сигнал ЭМЭ пропорционален мгновенной деформации образца в ходе развития механической неустойчивости, в то же время силовой отклик $\sigma(t)$ наиболее чувствителен к событиям быстрой релаксации внутренних напряжений, связанных со стадией зарождения деформационной полосы, которая вносит лишь небольшой вклад в общую деформацию образца (см. резкие спады напряжения в моменты времени, соответствующие кадрам 50, 51 и 95, 96, когда происходит зарождение полос). Длительность фронта разгрузки системы машина–образец, связанной с зарождением первичной и вторичной полос, как обнаружено, составляет величину порядка 1–2 ms. Столь резкий скачок разгрузки вызывает колебания в силовом отклике на частоте 200 Hz, которая по данным баллистической калибровки совпадает с собственными колебаниями механической системы машина–образец.

Анализ зарегистрированных сигналов ЭМЭ, данных видеосъемки и силовых откликов на развитие прерывистой деформации показывает, что каждый деформационный скачок на кривой растяжения начинается с зарождения первичной деформационной полосы, которая вызывает наиболее глубокий скачок разгрузки механической системы машина–образец амплитудой $\Delta\sigma \sim 10\text{--}20$ МПа и одновременно сигнал ЭМЭ в виде резкого скачка потенциала $\varphi_{ЭМЕ}$ с типичной амплитудой $80\text{--}130$ μV . Синхронная запись со скоростью 2 kHz сигнала ЭМЭ и силового отклика, вызванных зарождением первичной полосы деформации, представлена на рис. 5. Как видно, эти сигналы возникают почти одновременно в пределах временного разрешения метода (0.5 ms). Таким образом, первый всплеск сигнала ЭМЭ может служить индикатором (электромагнитным предвестником) развития макроскопического (амплитудой несколько процентов) скачка деформации, несмотря на то что первичная полоса (источник сигнала ЭМЭ) вносит лишь незначительный вклад в деформационный скачок.

4. Обсуждение

Обсудим возможные механизмы разделения зарядов в деформируемом сплаве, способные вызвать генерирование наблюдаемых сигналов ЭМЭ. В отличие от диэлектриков и полупроводников, для которых максвелловское

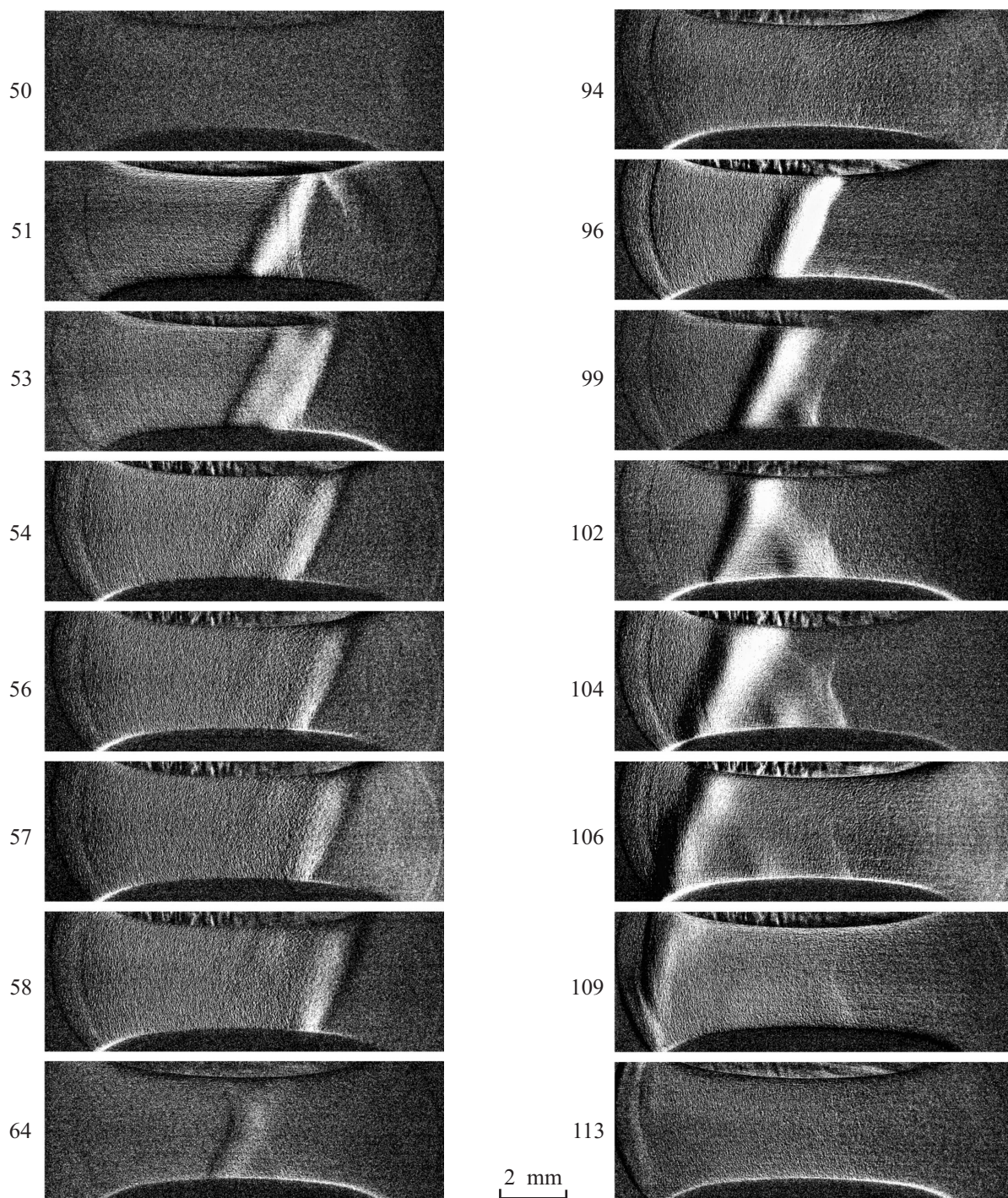


Рис. 4. Результаты компьютерной обработки видеопленки эволюции полос деформации на скачке деформации сплава АМг6, представленном на рис. 3. Числа — номера кадров. Температура испытания 25°C. $\dot{\sigma}_0 = 0.4$ МПа/с, скорость видеосъемки 500 frames/s.

время релаксации τ_M , как правило, больше характерных времен τ_d эволюции дислокационных ансамблей на мезоскопическом и макроуровне (линии и полосы скольжения, полосы Людерса и т. д. [4,18]), для металлов $\tau_M \ll \tau_d$ ($\tau_M \sim 10^{-14} - 10^{-15}$ s). Дислокации в металлах, как и в кристаллах с ковалентной и ионной связью, несут электрический заряд. Его причиной является нелинейная

дилатация ядра, вызывающая нарушение баланса между областями растяжения и сжатия по обе стороны от плоскости скольжения [19,20]. В результате вблизи дислокации образуется пониженная по сравнению с бездефектным объемом плотность ионов, а также электронов, компенсирующих их заряд. В ходе установления равновесия в область ядра перейдут дополнительные электро-

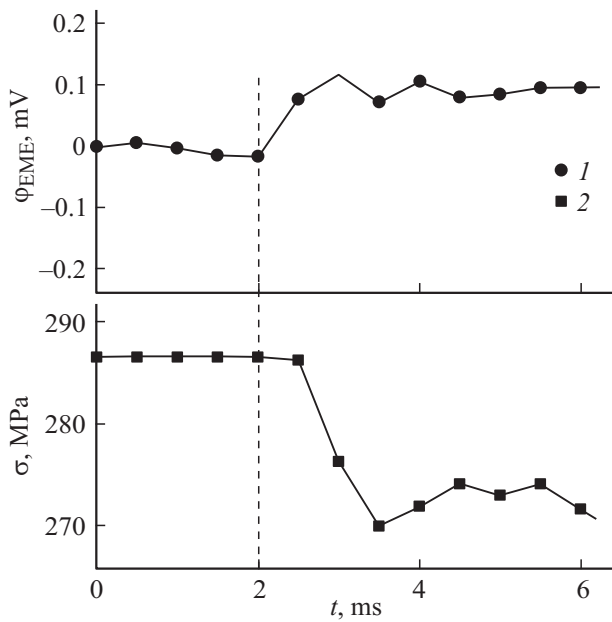


Рис. 5. Сигнал электромагнитной эмиссии $\varphi_{ЭМЭ}(t)$ (1) и силовой отклик σ (2) на зарождение первичной деформационной полосы, с которой начинается развитие макроскопического скачка деформации. Скорость записи данных датчиков электрического поля и усилия 2 kHz.

ны, создавая отрицательный погонный заряд дислокации, равный $q \sim 0.01-0.1 e/a$ [20] (где e — элементарный заряд, a — межатомное расстояние). Поэтому в деформируемом металле часть электронов Δn будет связана с дислокационными ядрами, и плотность свободных электронов будет понижена на величину Δn , что вызовет соответствующее уменьшение энергии Ферми ΔE_f по сравнению с бездислокационным металлом.

Основным механизмом развития макроскопической пластической неустойчивости, приводящей к ступенчатой деформации сплава Al–Mg, как установлено в [15], является зарождение и размножение деформационных полос (полос Савара–Массона). При зарождении и расширении полосы Савара–Массона, так же как и полосы Людерса, связанной с лавинообразным размножением дислокаций, между областью внутри полосы, где происходит интенсивная пластическая деформация, и областью вне полосы, в которой отсутствуют свежие дислокации, возникает разность потенциалов U_d , аналогичная контактной разности потенциалов между металлами с разными уровнями Ферми. Абсолютная величина этой разности потенциалов равна

$$U_d = \Delta E_f / e = \frac{1}{e} \frac{\partial E_f}{\partial n} \Delta n. \quad (1)$$

Уровень Ферми металла определяется, как известно [21], концентрацией электронов n в зоне проводимости

$$E_f = \frac{\hbar^2}{2m} (3\pi^2 n)^{2/3}, \quad (2)$$

где \hbar — квант действия, m — эффективная масса электрона. Из формул (1) и (2) имеем

$$U_d = (2/3e) E_f \Delta n / n. \quad (3)$$

Количество электронов в единице объема, находящихся в ядрах дислокаций, т.е. Δn , связано с плотностью дислокаций очевидным соотношением $\Delta n = \rho_d q / e$, где по определению ρ_d равна суммарной длине дислокаций в единице объема. Для оценки сверху положим погонный заряд дислокации $q \sim 0.1 e/a$ [20], а плотность подвижных дислокаций в полосе деформации $\rho_d \sim (1-3) \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}$ [20,22,23]. Принимая для Al $E_f = 5.73 \text{ eV}$, $n = 6.25 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ [24], $a = 0.4 \text{ nm}$ и учитывая, что $e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, $\hbar = 1.054 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$, $m = 1.16 m_e$ [25], где $m_e = 9.1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ — масса электрона, получим из формулы (3) оценку разности потенциалов на границе полосы деформации $U_d \sim 0.2-0.6 \mu\text{V}$, что значительно меньше амплитуды экспериментально наблюдаемого сигнала ЭМЭ, генерируемого в ходе развития одиночной полосы деформации в сплаве Al–Mg.

Известно, что динамика полос макролокализованной деформации сопровождается тепловым эффектом. Данные тепловизионной съемки распространяющихся полос деформации в сплавах Al–Mg показали, что нагрев материала в полосе не превышает $\Delta T \sim 1 \text{ K}$ [25, 26]. Следовательно, величина термоэдс $\Delta U_T = \alpha \Delta T$, связанная с неоднородным распределением температурного поля в образце с движущейся полосой деформации, есть величина порядка микровольта, так как для Al термоэлектрический коэффициент $\alpha \approx 2 \cdot 10^{-6} \text{ V/K}$ [27] и $\Delta U_T \sim 2 \mu\text{V}$. Таким образом, механизмы разделения зарядов, связанные с выравниванием уровня Ферми в металлическом образце с распространяющейся полосой макролокализованной деформации как в неоднородном проводнике с градиентом плотности дислокаций и температуры, не способны объяснить наблюдаемых сигналов ЭМЭ.

Обратимся теперь к процессам разделения зарядов вблизи поверхности пластически деформируемого металла. Наиболее известным процессом утечки заряда с поверхности металла является экзоэлектронная эмиссия (ЭЭ) — эффект Крамера [28,29], причем деформационная ЭЭ наблюдается только в условиях освещения и/или нагревания [30–32]. Работа выхода чистой поверхности Al равна 4.25 eV [30]. Наличие окисной пленки Al_2O_3 увеличивает работу выхода на десятки доли электрон-вольта, а дефекты кристаллического строения алюминия уменьшают ее на величину не более $\sim 1 \text{ eV}$. Поэтому для эмиссии экзоэлектронов с поверхности алюминия необходима ультрафиолетовая подсветка [31,33]. Контрольные эксперименты в темноте показали, что характеристики сигналов ЭМЭ не отличаются от таковых при дневном освещении. Следовательно, можно заключить, что явление ЭМЭ при прерывистой деформации алюминиевого сплава не связано с ЭЭ, что совпадает с выводами работы [14].

Рассмотрим роль динамики и/или разрыва диэлектрической окисной пленки в генерировании сигнала ЭМЭ в ходе образования и распространения деформационных полос на поверхности алюминиевого сплава. Согласно [34], при температурах ниже $\sim 60^\circ\text{C}$ на поверхности алюминия в сухой воздушной среде образуется окисный слой Al_2O_3 толщиной порядка 10 nm, состоящий из первичного рентгеноаморфного слоя толщиной ~ 4 nm, который образуется в течение нескольких миллисекунд, и следующего медленно растущего кристаллического слоя (при более высоких температурах во влажной среде окисный слой имеет другой состав и структуру [34]). Природа электрической активности окисного слоя непосредственно связана с механизмом его роста. В настоящее время экспериментально подтвержден механизм формирования окисного слоя на поверхности алюминия, предложенный ранее Моттом и Кабрерой [35,36]. В соответствии с этим механизмом после начальной очень быстрой стадии образования окисной пленки, когда молекулы кислорода не могут адсорбироваться на поверхности металла, а адсорбируются лишь на поверхности окисла, электроны проводимости, находящиеся вблизи уровня Ферми металла, туннелируют сквозь окисную пленку и оседают на уровнях кислорода, расположенных ниже уровня Ферми. В результате внешняя поверхность оксида заряжается отрицательно, а противоположный заряд соответственно находится в металле вблизи фазовой границы металл–окисел. Возникающая разность потенциалов порядка 1 V создает в тонкой окисной пленке электрическое поле напряженностью 3–10 MV/cm [30,37]. Это поле вытягивает катионы металла к внешней границе окисел–газ, где происходит реакция окисления. Такой механизм обеспечивает нормальный рост окисной пленки толщиной до 15–20 nm, после чего туннельный ток значительно падает из-за роста ширины барьера, а электрическое поле в окисном слое уменьшается до значения, недостаточного для доставки ионов металла на внешнюю поверхность слоя.

Будем считать в первом приближении, что сигнал ЭМЭ обусловлен перемещением нормально к зонду двойного электрического слоя, связанного с окисной пленкой, в ходе образования и расширения полосы деформации. Отметим, что полоса деформации в плоском образце представляет собой расширяющуюся шейку. Профиль статической полосы деформации, полученный с помощью профилометра Wyko NT 9080, представлен на рис. 6. Для деформируемых образцов сплава АМг6 ее типичная максимальная глубина в профиле составила 0.6–0.8 μm , а средняя глубина — 0.3–0.4 μm .

Потенциал поля двойного электрического слоя определяется выражением [38]

$$\varphi = (4\pi\epsilon_0)^{-1} \int \tau d\Omega. \quad (4)$$

Здесь $d\Omega$ — элемент телесного угла, $\tau = \sigma_e \delta$ — мощность слоя толщиной δ , σ_e — поверхностная плотность

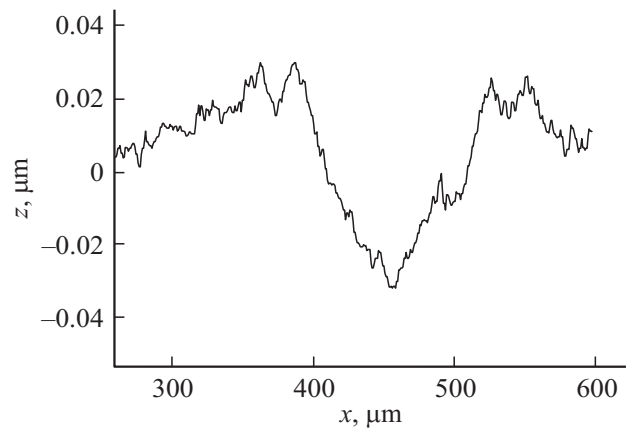


Рис. 6. Фрагмент профилограммы поверхности образца АМг6 со статической полосой макролокализованной деформации после деформирования образца до 10%.

заряда, связанная с разностью потенциалов U_e между внешней и внутренней поверхностью окисной пленки соотношением $\sigma_e = \epsilon_0 \epsilon U_e / \delta$, где ϵ — диэлектрическая проницаемость материала пленки, ϵ_0 — электрическая постоянная. Поэтому потенциал поля на расстоянии r от окисленной поверхности алюминиевого образца равен

$$\varphi = \frac{\epsilon U_e \Delta S}{4\pi r^2}, \quad (5)$$

где ΔS — площадь слоя. Предположим, что при образовании полосы деформации часть двойного слоя площадью, равной площади полосы $\Delta S \approx A$, удаляется от зонда в среднем на величину Δr , равную средней глубине шейки, тогда изменение потенциала $\Delta\varphi$ в точке r будет пропорционально среднему „объему шейки“ $A\Delta r$:

$$\Delta\varphi = -\frac{\partial\varphi}{\partial r} \Delta r = \frac{\epsilon U_e A \Delta r}{2\pi r^3}. \quad (6)$$

Полагая для окисленного алюминия $U_e \approx 1$ V [30], диэлектрическую проницаемость окисной пленки Al_2O_3 $\epsilon \approx 10$ [39] и учитывая результаты наших экспериментов ($A \approx 3$ mm², $r = 1$ mm и $\Delta r \approx 0.35$ μm), получим $\Delta\varphi \approx 2$ mV. Далее необходимо учитывать, что входная цепь предусилителя содержит емкостный делитель, состоящий из собственной емкости зонда $C_p \sim 1$ pF и входной емкости $C_{\text{in}} \approx 20$ pF, тогда смещение двойного слоя на поверхности металла, связанное с эволюцией деформационной полосы, может вызвать сигнал ЭМЭ амплитудой $\Delta\varphi C_p / (C_{\text{in}} + C_p) \approx 100$ μV , что по порядку величины совпадает с амплитудой наблюдаемых сигналов ЭМЭ, связанных с развитием деформационных полос.

Окисная пленка Al_2O_3 более хрупкая, чем алюминиевая матрица, и может разрушаться при образовании поверхностной ступени в результате выхода дислокационного скопления. Образование и рост окисной пленки на свежих участках поверхности вызовут формирование двойного электрического слоя по описанной качественно выше теории Мотта–Кабреры. Согласно [34],

первичный аморфный слой Al_2O_3 образуется в течение нескольких миллисекунд на воздухе при атмосферном давлении. Соответственно сигнал ЭМЭ $\varphi_{ЕМЭ}(t)$ должен возникать на несколько миллисекунд позже начала скачка разгрузки $\sigma(t)$, обусловленного зарождением полосы деформации. Реально измеряемые сигналы $\varphi_{ЕМЭ}(t)$ и $\sigma(t)$ стартуют одновременно в пределах 0.5 ms (временной шаг при скорости регистрации данных 2 kHz) при зарождении полосы деформации (рис. 5). Поэтому можно заключить, что процессы окисления, связанные с разрывом окисной пленки, играют второстепенную роль в генерировании наблюдаемых сигналов ЭМЭ, вызванных полосообразованием.

Таким образом, приведенные количественные оценки показывают, что среди перечисленных возможных причин генерирования сигналов ЭМЭ в ходе прерывистой деформации наиболее непротиворечивым представляется механизм смещения поверхностной электрически активной окисной пленки Al_2O_3 , вызванного образованием полосы макролокализованной деформации.

5. Заключение

В работе экспериментально с использованием высокоскоростных методов измерения деформации, нагрузки, а также динамики и морфологии полос макролокализованной деформации исследовалась корреляция между характеристиками прерывистой деформации алюминий-магниевого сплава АМгб и параметрами сигнала электромагнитной эмиссии — временными вариациями потенциала электрического поля $\varphi_{ЕМЭ}(t)$ вблизи поверхности деформируемого плоского образца. Установлено, что триггером развития деформационного скачка — ступени амплитудой в несколько процентов на кривой растяжения с заданной скоростью нагружения $\dot{\sigma}_0 = \text{const}$ в мягкой деформационной машине — является зарождение и быстрое расширение первичной полосы деформации, которая генерирует характерный сигнал электромагнитной эмиссии амплитудой $\sim 100 \mu V$. Этот сигнал является электромагнитным предвестником развития макроскопического скачка деформации и может быть в принципе использован для запуска силовых устройств, подавляющих развитие пластической неустойчивости (основанных, например, на подавлении прерывистой деформации электрическим током [40]). Показано, что среди возможных механизмов связи между явлением электромагнитной эмиссии и прерывистой деформацией (экзоэлектронная эмиссия, термоэдс, эдс между полосой и пластически недеформированной областью образца, разрыв и/или смещение окисной пленки) смещение электрически активной окисной пленки при образовании и эволюции полосы деформации дает по оценке сигнал электромагнитной эмиссии, сопоставимый по порядку величины с экспериментально наблюдаемым.

Обнаруженная корреляция между характерными особенностями сигнала электромагнитной эмиссии с процессами полосообразования в деформируемом сплаве Al–Mg может быть положена в основу при разработке бесконтактных электромагнитных методов ранней диагностики повреждений в алюминиевых сплавах, которые проявляют прерывистую деформацию (сплавы систем Al–Mg, Al–Cu, Al–Zn–Mg и Al–Li).

Список литературы

- [1] Ю.И. Головин, А.А. Шибков. Кристаллография **32**, 413 (1987).
- [2] Ю.И. Головин, А.А. Шибков. ФТТ **28**, 3492 (1986).
- [3] Ю.И. Головин, А.В. Горбунов, А.А. Шибков. ФТТ **30**, 1931 (1988).
- [4] Ю.И. Головин, А.А. Шибков. Кристаллография **35**, 440 (1990).
- [5] М.И. Мирошниченко, В.С. Куксенко. ФТТ **22**, 1531 (1980).
- [6] Н.И. Гершензон, Д.О. Зилпимиани, П.В. Манджгаладзе, О.А. Похотелов, З.Т. Челидзе. ДАН СССР **287**, 75 (1986).
- [7] Ю.П. Малышков, В.Ф. Гордеев, В.П. Дмитриев, В.А. Смирнов, Т.В. Фурса, В.И. Ульченко. ЖТФ **54**, 336 (1984).
- [8] V.F. Petrenko. Phil. Mag. В **67**, 301 (1993).
- [9] А.А. Шибков, М.А. Желтов, В.В. Скворцов, Р.Ю. Кольцов, А.В. Шуклинов. Кристаллография **50**, 1073 (2005).
- [10] А.А. Шибков, Р.Ю. Кольцов, М.А. Желтов. Кристаллография **51**, 104 (2006).
- [11] А.А. Шибков, А.А. Казаков. Кристаллография **54**, 323 (2009).
- [12] Ю.И. Головин, Т.П. Дьячек. ФТТ **29**, 552 (1987).
- [13] А.А. Шибков, А.Е. Золотов, Д.В. Михлик, М.А. Желтов, С.В. Назаров. Деформация и разрушение материалов **10**, 16 (2008).
- [14] E.D. Schmitter. Phys. Lett. A **368**, 320 (2007).
- [15] А.А. Шибков, А.Е. Золотов. Письма в ЖЭТФ **90**, 412 (2009).
- [16] А.А. Шибков, М.А. Лебедин, М.А. Желтов, В.В. Скворцов, Р.Ю. Кольцов, А.В. Шуклинов. Завод. лаб. **71**, 20 (2005).
- [17] А.А. Шибков, А.Е. Золотов, М.А. Желтов. ФТТ **52**, 2223 (2010).
- [18] H. Neuhauser. In: Dislocation in solids / Ed. by F.R.N. Nabarro. North Holland Company (1983). V. 6. P. 319.
- [19] R. Landauer. Phys. Rev. **82**, 520 (1951).
- [20] А.Н. Орлов. Введение в теорию дефектов в кристаллах. Высш. шк., М. (1983). 144 с.
- [21] Н. Ашкрофт, Н. Мермин. Физика твердого тела. Мир, М. (1979). Т. 2. 424 с.
- [22] L.P. Kubin, Y. Estrin. Acta Met. Mater. **38**, 697 (1990).
- [23] E. Rizzi, P. Hahner. Int. J. Plast. **20**, 121 (2004).
- [24] A.F. Sprecher, S.L. Mannan, H. Conrad. Acta Met. **34**, 1145 (1986).
- [25] А.И. Киселев, Л.А. Акашев, В.И. Кононенко. ЖТФ **74**, 3, 20 (2004).
- [26] М.М. Криштал. Металловедение и терм. обраб. металлов **4**, 26 (2003).

- [27] Б.Г. Лившиц, В.С. Крапошин, Я.Л. Линецкий. Физические свойства металлов и сплавов. Металлургия, М. (1980). С. 174.
- [28] J. Kramer. Acta Phys. Austr. **10**, 327 (1957).
- [29] Э. Рабинович. УФН **127**, 163 (1979).
- [30] В.Д. Евдокимов, Ю.И. Семов. Экзоэлектронная эмиссия при трении. Наука, М. (1973). 181 с.
- [31] Р.И. Минц, И.И. Мильман, В.И. Крюк. УФН **119**, 749 (1976).
- [32] В.Г. Резников, Г.И. Розенман, В.П. Мелехин, Р.И. Минц. Письма в ЖЭТФ **17**, 608 (1973).
- [33] J. Langehecker, R. Ray. J. Appl. Phys. **35**, 2588 (1964).
- [34] C. Vargel. Corrosion of aluminium. Elsevier, Ltd., Oxford (2004). 658 p.
- [35] N.F. Mott. Transact. Faraday Soc. **35**, 1175 (1939).
- [36] N. Cabrera. Rev. de Metallurgie **45**, 86 (1948).
- [37] Н. Мотт, Р. Генри. Электронные процессы в ионных кристаллах. ИИЛ, М. (1950). 303 с.
- [38] И.Е. Тамм. Основы теории электричества. Наука, М. (1976). 616 с.
- [39] J. Robertson. Eur. Phys. J. Appl. Phys. **28**, 265 (2004).
- [40] A.A. Shibkov, A.A. Denisov, M.A. Zheltov, A.E. Zolotov, M.F. Gasanov. Mater. Sci. Eng. A **610**, 338 (2014).