

05.1;05.2

## **Влияние скачкообразной деформации алюминий-магниевого сплава на его электропроводность**

© А.А. Шибков, А.Е. Золотов, М.Ф. Гасанов, М.А. Желтов,  
О.В. Гребеньков

Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, Тамбов  
E-mail: Shibkov@tsu.tmb.ru

Поступило в Редакцию 24 ноября 2015 г.

Экспериментально исследовано влияние скачкообразной деформации на электрическое сопротивление алюминий-магниевого сплава АМгб. Установлено, что зарождение и развитие отдельных деформационных полос, вызывающих скачкообразную деформацию, увеличивает удельное электросопротивление сплава в среднем на 2–3%. Предполагается, что основным механизмом увеличения электросопротивления в полосе деформации является рост концентрации деформационных вакансий, связанный с интенсивным размножением дислокаций на фронте полосы.

Хорошо известно, что электропроводность металлов и сплавов обусловлена нарушениями трансляционной симметрии кристаллической решетки и является структурно-чувствительной характеристикой материала, зависящей помимо температуры от концентрации точечных дефектов, плотности дислокаций, фазового состава сплава, степени старения, упорядочивания, магнитных превращений и т.д. [1]. Это обстоятельство позволяет использовать метод резистометрии, основанный на измерении остаточного сопротивления, в физическом материаловедении для контроля чистоты металла, построения диаграмм состояния, изучения распада пересыщенных твердых растворов, фазовых превращений и структурных изменений при термической и механической обработке сплавов и т.д.

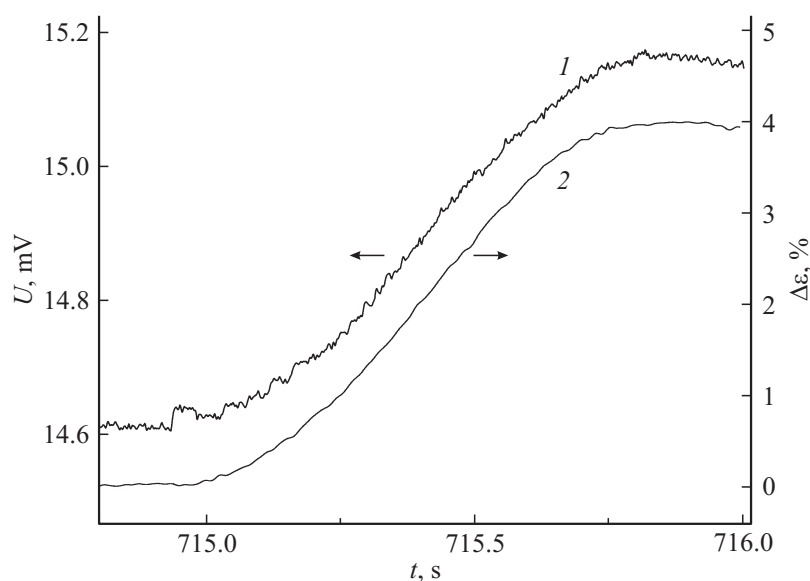
Целью данной работы является исследование *in situ* скачкообразной деформации металла методом измерения электрического сопротивления непосредственно в ходе распространения деформационных полос, вызывающих макроскопически неустойчивую пластическую деформацию. В качестве материала исследования выбран авиационный

алюминий-магниевый сплав АМг6, проявляющий ярко выраженную прерывистую деформацию и полосообразование при комнатной температуре. Кроме того, этот сплав нашел широкое применение в автотроме, судостроении и химическом машиностроении.

Образцы сплава АМг6 (Al–5.92 wt % Mg–0.61 wt % Mn) имели форму двухсторонних лопаток с размером рабочей части  $0.7 \times 3 \times 20$  mm. Образцы отжигали в течение 1 h при  $450^\circ\text{C}$ , закаливали на воздухе и испытывали при комнатной температуре одноосным растяжением с постоянной скоростью возрастания напряжения  $\dot{\sigma}_0 = \text{const}$  в мягкой испытательной машине, описанной в [2]. Деформацию измеряли оптическим экстенсометром, представляющим собой триангуляционный лазерный датчик положения фирмы Riftec с точностью  $1.5 \mu\text{m}$  в полосе частот  $0\text{--}2$  kHz. Силовой отклик механической системы машина–образец измеряли с помощью датчика усилия Zemic H3-C3-100kg-3В (чувствительность  $1.5 \mu\text{V/N}$ , собственная частота  $6.25$  kHz) в полосе  $0\text{--}2$  kHz. Показания датчиков деформации и усилия синхронизировали с цифровой видеокамерой VS-FAST/G6 (НПО „Видеоскан“). Скорость видеосъемки поверхности варьировали от 500 до 4000 fps.

В ходе растяжения по образцу пропускали постоянный ток  $I$  и измеряли разность потенциалов  $U$  на концах образца. Ранее было экспериментально установлено, что постоянный ток плотностью  $10\text{--}50$  A/mm<sup>2</sup> подавляет прерывистую деформацию Портевена–Ле Шателье и ступенчатую деформацию Савара–Массона при деформировании сплава АМг6 в жесткой и мягкой испытательных машинах соответственно [3,4]. Для измерения электросопротивления образца плотность тока подбирали почти в полтора раза меньше критической плотности тока  $j_c = 10$  A/mm<sup>2</sup>, выше которой начинается эффект подавления током прерывистой деформации, а именно  $j = 7.1$  A/mm<sup>2</sup>, что при сечении  $S_0 = 0.7 \times 3$  mm соответствует измерительному току  $I = 15$  А. Канал регистрации разности потенциалов  $U$  состоял из широкополосного усилителя, аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и компьютера. Температура образца с током, контролируемая с помощью бесконтактного пирометра Testo-8i, не превышала  $30^\circ\text{C}$ .

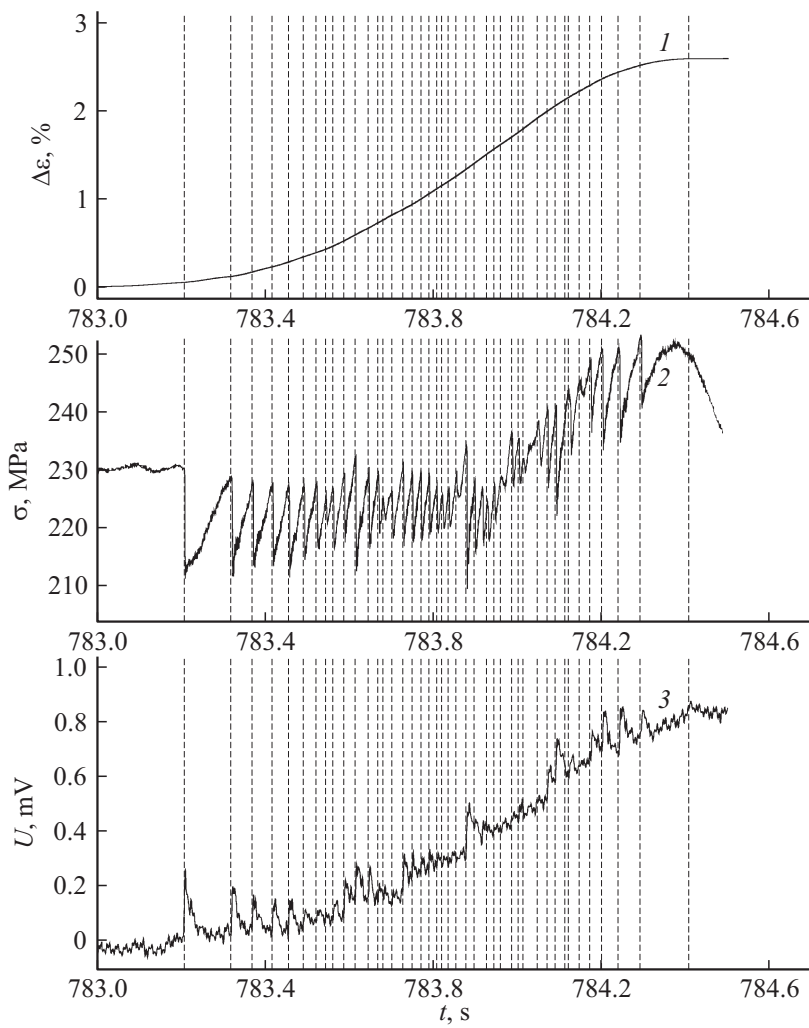
В первой серии экспериментов разность потенциалов на концах образца измеряли в полосе частот  $0\text{--}10^3$  Hz. На рис. 1 представлена запись сигнала  $U(t)$  синхронно с сигналом датчика положения  $\Delta\varepsilon(t)$  в ходе развития деформационной ступени амплитудой  $\Delta\varepsilon_m = 4\%$  на кривой нагружения со скоростью  $\dot{\sigma}_0 = 0.4$  МПа/s. Высокий коэффициент



**Рис. 1.** Временные зависимости разности потенциалов  $U$  на концах образца (1) в полосе частот 0–1 kHz и прироста деформации  $\Delta\varepsilon$  (2) в ходе развития скачка деформации — ступени на кривой нагружения со скоростью  $\dot{\sigma}_0 = 0.4$  МПа/с образца сплава АМгб с током плотностью  $7.1$  А/мм<sup>2</sup>.

корреляции  $k = 0.9985$  этих временных зависимостей, рассчитанный с помощью программы MathCad, свидетельствует о возможности исследования скачкообразной деформации с помощью измерения *in situ* электросопротивления сплава, что может быть полезным в ситуациях, когда измерение диаграммы растяжения сплава затруднено, например для характеристики неустойчивой деформации наиболее нагруженного элемента конструкции в ходе эксплуатации и т.д. Кроме того, резистивные измерения позволяют получать информацию о неустойчивой деформации в более широкой полосе частот, чем при измерении одноосной деформации.

Для изучения *in situ* резистивным методом тонкой структуры скачков деформации разность потенциалов  $U$  измеряли с помощью импульсного широкополосного усилителя в полосе частот 10 Hz–10 kHz, позволяющего увеличить отношение сигнала к шуму и выявить скачки



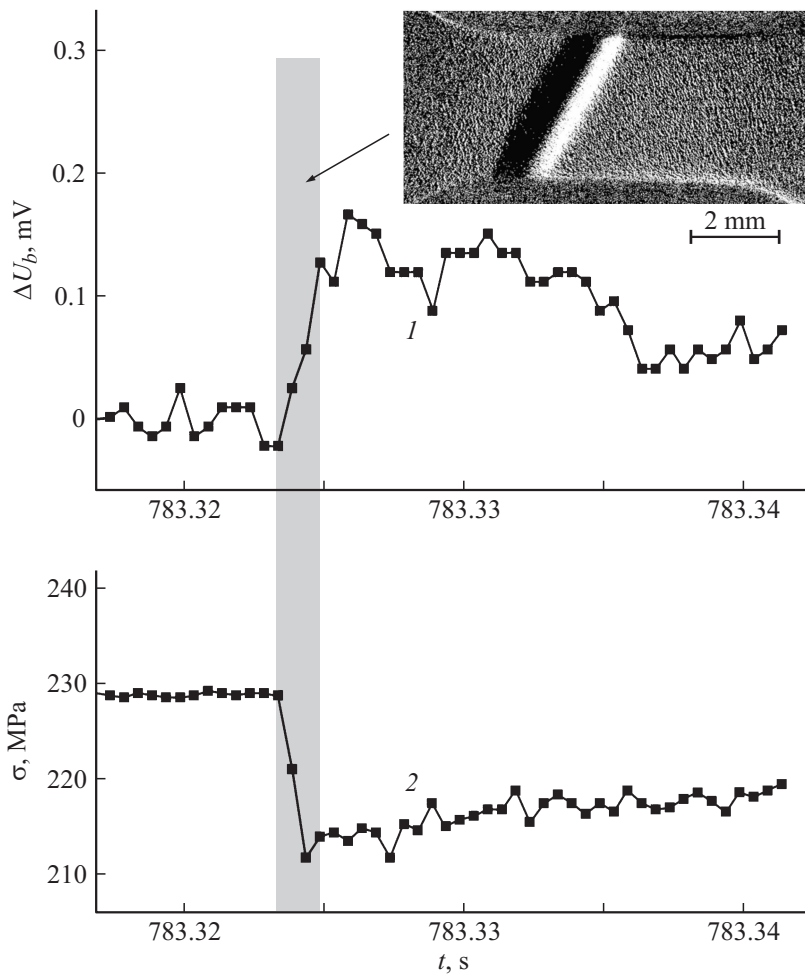
**Рис. 2.** Временные зависимости деформации  $\Delta\varepsilon$  (1), напряжения  $\sigma$  (2) и разности потенциалов  $U$  (3), измеренной в полосе частот  $10-10^3$  Hz, в ходе деформационного скачка.  $j = 7.1$  A/mm<sup>2</sup>,  $\dot{\sigma}_0 = 0.3$  MPa/s.

сигнала  $\Delta U_b(t)$ , связанные с динамикой отдельных деформационных полос. На рис. 2 представлены синхронные записи датчиков деформации и усилия (кривые 1 и 2) и разности потенциалов  $U$  (кривая 3) при развитии скачка деформации — ступени амплитудой около 3% на кривой нагружения. Силовой отклик  $\sigma(t)$  состоит из последовательности скачков разгрузки амплитудой  $\Delta\sigma \sim 5\text{--}15\text{ МПа}$  с характерным временем спада 1–3 мс. По данным видеосъемки каждому скачку разгрузки соответствует зарождение и расширение полосы деформации (полосы Савара–Массона [5]). Количество скачков разгрузки таким образом равно количеству деформационных полос, эволюция которых вызывает макроскопический скачок пластической деформации  $\Delta\varepsilon(t)$ , причем каждая полоса, за исключением первичной, зарождается на границе предшествующей полосы, что соответствует результатам работы [6], полученным на сплаве АМг6 в условиях ползучести.

Из рис. 2 видно, что каждому скачку разгрузки в структуре силового отклика отвечает скачок разности потенциалов  $\Delta U_b$ , причем длительность переднего фронта скачка (около 3 мс) сопоставима по данным видеосъемки со скоростью 4000 fps с характерным временем „быстрой“ стадии расширения полосы, а время спада  $\sim 30\text{ мс}$  равно постоянной времени дифференцирования электрического сигнала при измерении с помощью импульсного усилителя. Анализ результатов видеосъемки скачков электрического и силового откликов показывает, что каждый скачок электрического сигнала  $\Delta U_b$  возникает одновременно со скачком разгрузки  $\Delta\sigma(t)$ , а следовательно, с моментом зарождения полосы деформации с точностью не хуже 0.5 мс (рис. 3).

Помимо скачкообразного прироста электросопротивления в ходе скачкообразной деформации, причиной возникновения разности потенциалов на концах образца может быть термоэдс, связанная с разогревом материала в области полосы деформации, а также „контактная“ разность потенциалов на границе полосы, связанная с зависимостью уровня Ферми металла от плотности дислокаций и других дефектов кристаллической решетки. Оценка этих ЭДС, приведенная в работе [7], дает величины, не превышающие  $\sim 1\text{ }\mu\text{V}$ . Поэтому наблюдаемый скачок разности потенциалов  $\Delta U_b$  обусловлен в основном приростом электросопротивления сплава в ходе зарождения и эволюции деформационной полосы.

Типичная амплитуда скачка сигнала  $\Delta U_b(t)$  находится в интервале 60–200  $\mu\text{V}$  со средним значением около 80  $\mu\text{V}$ , а количество таких скачков равно количеству  $N$  расширяющихся по-



**Рис. 3.** Скачок разности потенциалов  $\Delta U_b$  (1) на концах деформируемого образца при зарождении и расширении полосы деформации и соответствующий скачок напряжения  $\sigma$  (2).  $j = 7.1 \text{ A/mm}^2$ ,  $\dot{\sigma}_0 = 0.3 \text{ MPa/s}$ . На вставке — изображение полосы деформации. Серой полосой отмечен временной интервал быстрой стадии расширения полосы.

лос деформации Савара–Массона на фронте отдельного скачка деформации  $\Delta\varepsilon(t)$ . Для типичных неразрушающих деформационных скачков  $N \sim 40\text{--}50$ . Среднее электрическое сопротивление индивидуальной полосы деформации оценим как  $\overline{\Delta R_b} = \overline{\Delta U_b}/I \approx 5.3 \mu\Omega$ , что составляет  $\overline{\Delta R_b}/R_0 \approx 0.2\%$  исходного сопротивления образца  $R_0 = \rho_0 l_0/S_0 = 2.5 \text{ m}\Omega$ , где  $\rho_0 = 26 \mu\Omega \cdot \text{cm}$  — исходное удельное сопротивление сплава АМг6,  $l_0 = 20 \text{ mm}$  — начальная длина образца,  $\overline{\Delta U_b} = 80 \mu\text{V}$ ,  $I = 15 \text{ A}$ . В ходе развития деформационного скачка со средней амплитудой  $\overline{\Delta\varepsilon} \approx 3\%$  суммарный прирост сопротивления достигает величины  $\overline{\Delta R_b}N \approx 0.25 \text{ m}\Omega$ , составляющей около 10% сопротивления недеформированного образца  $R_0$ . Результирующий прирост электрического сопротивления к моменту разрушения образца, полученный суммированием скачков электросопротивления на всех деформационных полосах от полосы Людерса до образования шейки перед разрывом, составил до 70% исходного сопротивления образца.

Электрическое сопротивление образца в ходе полосообразования может возрасти по следующим причинам: а) геометрическим, связанным с удлинением образца и соответственно с уменьшением его сечения; б) формирования в ходе полосообразования дефектов кристаллического строения (точечных дефектов, дислокаций, деформационных пор и микротрещин), на которых рассеиваются электроны проводимости; в) растворения малых преципитатов после перерезания их дислокациями.

Оценим сначала геометрический фактор. Сопротивление образца при одноосном растяжении без учета изменения микроструктуры  $R = \rho_0(l_0 + \Delta l)/S$ , где сечение  $S = S_0 l_0/(l_0 + \Delta l)$  находится из условия сохранения объема образца,  $\Delta l$  — деформация растяжения. Из этих формул имеем  $R = R_0(1 + \varepsilon)^2$ . При общей деформации до разрушения  $\varepsilon_m \approx 0.2$  получим  $R = 1.44R_0$ , т.е. геометрический прирост сопротивления (без учета роста количества дефектов) составляет 44% исходного сопротивления образца. В то же время сумма всех скачков сопротивления составляет около  $0.7R_0$ . Таким образом, около 26% исходного сопротивления приходится на прирост электросопротивления, связанного с изменением структуры металла, т.е.  $\Delta R_\Sigma \approx 0.65 \text{ m}\Omega$ .

Вклад дислокаций и точечных дефектов в электросопротивление металлов хорошо известен из литературы. Вклад дислокаций в алюминии составляет  $10^{-12} \mu\Omega \cdot \text{cm}/\text{cm}^{-2}$  [1], что дает нереально высокую плотность дислокаций  $\sim 3 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  для объяснения чисто

дислокационного прироста сопротивления в ходе скачкообразной деформации сплава АМг6. Наиболее вероятной причиной роста электросопротивления представляется рост концентрации деформационных вакансий (прирост электросопротивления на 1 at. % вакансий составляет  $2.2\mu\Omega \cdot \text{cm/at. \%}$  [1]), которые могут возникать в результате работы источников Франка–Рида, характерных для ГЦК типа алюминия, а также процесс двойного поперечного скольжения дислокаций, который, как предполагается, является механизмом пространственной связи, отвечающей за распространение полосы деформации [8]. Это косвенно подтверждается следующими обстоятельствами: а) изменение удельного электросопротивления  $\Delta\rho$  с увеличением деформации растет по закону  $\Delta\rho \sim \varepsilon^p$ , где  $p \leq 2$  [1], т.е. почти так же, как концентрация деформационных вакансий  $c = 10^{-4}\varepsilon^2$  [9]; б) основным механизмом развития деформационного скачка амплитудой  $> 1\%$  является каскадный механизм размножения полос деформации Савара–Массона [5], когда каждая полоса, за исключением первичной, зарождается на границе предшествующей полосы в результате, например, коллективного срабатывания источников Франка–Рида, а огибающая дислокационных скоплений, испущенных этими источниками, образует новый фронт полосы деформации; в) наиболее резкий скачок электросопротивления приходится именно на начальную, очень быструю, продолжительностью не более 3 ms стадию развития полосы деформации (рис. 3). Отметим, что ширина полосы  $w$  на этой стадии достигает 1.3–1.5 mm (см. вставку на рис. 3). Учитывая, что деформируемый образец с расширяющейся полосой деформации представляет собой неоднородный проводник, оценим прирост удельного сопротивления материала полосы как  $\Delta\rho_b \approx \overline{\Delta R_b S}/w \approx 0.65\mu\Omega \cdot \text{cm}$ , что составляет в среднем около  $2.5\% \rho_0$ .

Отметим также, что сплавы системы Al–Mg с содержанием магния 3–6% демонстрируют аномальное или „инверсное“ поведение деформации появления первого скачка  $\varepsilon_c$ , которая растет с температурой и уменьшается с ростом скорости деформации [4,10]. Традиционное объяснение этого явления основано на представлении о перерезании дислокациями малых преципитатов и растворении их осколков, которое провоцирует дислокационный прорыв. Рост концентрации примесных атомов (атомов замещения) может привести к росту электросопротивления в ходе распространения дислокационной лавины. Этот механизм роста электросопротивления, однако, представляется маловероятным из-за низкого значения коэффициента диффузии атомов Mg в Al при комнатной температуре [11], которое затрудняет объяснение малой



инерционности процесса роста электросопротивления в ходе развития полосы: задержка между ростом сопротивления и моментом зарождения полосы не превышает 0.5 ms (рис. 3). Рассеяние электронов проводимости на деформационных порах и микротрещинах может быть причиной прироста электросопротивления на последних скачках деформации, особенно при образовании шейки перед разрывом образца.

Таким образом, на основе *in situ* измерения электрического сопротивления образцов алюминий-магниевого сплава АМг6, подвергнутых растягивающей нагрузке в условиях эффекта Савара–Массона, установлено, что каждому макроскопическому скачку пластической деформации — ступени на кривой нагружения  $\varepsilon(t)$  — соответствует серия, состоящая из нескольких десятков скачков электросопротивления.

С помощью синхронного измерения электросопротивления в полосе частот 10 Hz–10 kHz, нагрузки и скоростной видеосъемки установлено, что каждый скачок электросопротивления в серии связан с зарождением и расширением одиночной полосы деформации. Показано, что относительный прирост удельного сопротивления сплава АМг6 в расширяющейся деформационной полосе составляет в среднем около 2.5%. Наиболее вероятным механизмом роста электросопротивления в деформационной полосе, как показали оценки, является рост концентрации неравновесных вакансий, обусловленный размножением дислокаций в полосе деформации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 13-08-00861).

## Список литературы

- [1] Лившиц Б.Г., Крапошин В.С., Линецкий Я.Л. Физические свойства металлов. М.: Металлургия, 1980. 320 с.
- [2] Шибков А.А., Желтов М.А., Лебедкин М.А. и др. // Заводская лаборатория. 2005. № 7. Т. 71. С. 20.
- [3] Shibkov A.A., Denisov A.A., Zheltov M.A. et al. // Mater. Sci. Eng. A. 2014. V. 610. P. 338.
- [4] Шибков А.А., Золотов А.Е., Желтов М.А. и др. // Кристаллография. 2015. Т. 60. № 6. С. 929.
- [5] Шибков А.А., Золотов А.Е. // Письма в ЖЭТФ. 2009. Т. 90. № 5. С. 412.
- [6] Шибков А.А., Золотов А.Е., Желтов М.А. и др. // ЖТФ. 2014. Т. 84. В. 4. С. 40.

- [7] Шибков А.А., Тутов С.А., Желтов М.А. и др. // ФТТ. 2016. Т. 58. В. 1. С. 3.
- [8] Hahner P., Ziegenbein A., Rizzi E. et al. // Phys. Rev. B. 2002. V. 65. N 13. P. 134 109.
- [9] Фридель Ж. Дислокации. М.: Мир, 1967. 643 с.
- [10] Brechet Y., Estrin Y. // Acta Metall. Mater. 1995. V. 43. N 3. P. 955.
- [11] Бокштейн Б.С. Диффузия в металлах. М.: Энергия, 1980. 239 с.