

УДК 539.374

DOI: 10.20310/1810-0198-2017-22-5-1086-1091

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЙ ОТКЛИК НА ПРЕРЫВИСТУЮ ДЕФОРМАЦИЮ ПОРТЕВЕНА–ЛЕ ШАТЕЛЬЕ

© А.А. Шибков, А.А. Денисов, М.А. Желтов,
А.Е. Золотов, М.Ф. Гасанов

Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина
392000, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Интернациональная, 33
E-mail: shibkov@tsu.tmb.ru

Экспериментально установлено, что прерывистая деформация алюминий-магниевого сплава, деформируемого в водном растворе NaCl, сопровождается скачками электрохимического потенциала поверхности образца амплитудой до ~ 10 мВ. Скачки потенциала возникают одновременно в пределах ~ 1 мс со скачками механического напряжения и связаны, как предполагается, с разрывом оксидной пленки, вызванным выходом на поверхность образца полос локализованной пластической деформации.

Ключевые слова: прерывистая деформация; эффект Портевена–Ле Шателье; деформационная полоса; электрохимический потенциал; заряд дислокации

1. ВВЕДЕНИЕ

Пластическая деформация кристаллических твердых тел является неустойчивой и неоднородной на различных масштабных уровнях. На макроскопическом уровне неустойчивое пластическое течение проявляет себя как повторяющиеся скачки напряжения при испытании с постоянной скоростью деформирования в жесткой испытательной машине – эффект Портевена–Ле Шателье (ПЛШ) [1]. Каждое падение напряжения соответствует формированию полосы макролокализованной пластической деформации. Эффект ПЛШ характерен для металлических сплавов с различной кристаллической решеткой: малоуглеродистые стали, аустенитные нержавеющие стали, алюминиевые, медные, циркониевые сплавы и т. д.

Прерывистая деформация вызывает в последнее время интерес как пример сложности пространственно-временной динамики, возникающей вследствие коллективного поведения дислокаций [2–4]. С другой стороны, неустойчивое течение является технологически важной проблемой, поскольку оно неблагоприятно воздействует на формуемость промышленных металлических сплавов. В частности, локализация деформации в полосах ухудшает пластические свойства конструкционного материала и может вызвать его преждевременную коррозию и внезапное разрушение. Кроме того, статические или распространяющиеся полосы деформации негативно влияют на качество поверхности промышленных изделий.

Большинство исследований динамики деформационных полос используют оптические, магнитные, термографические и акустические методы для мониторинга образцов. Некоторые исследования использовали измерения просачивания магнитного потока в ферромагнитных материалах, а также электромагнитные методы [5]. В настоящей работе экспериментально

исследуется обнаруженный прерывистый электрохимический отклик на эффект ПЛШ в алюминий-магниевом сплаве, находящегося в контакте с водным раствором бинарного электролита.

2. МЕТОДИКА

Материалом исследования является промышленный алюминий-магниевый сплав АМг6 (Al – 6,15 % Mg – 0,65 % Mn – 0,25 % Si – 0,21 % Fe – 0,1 % Cu – 0,12 % Zn). Плоские образцы в форме двухсторонних

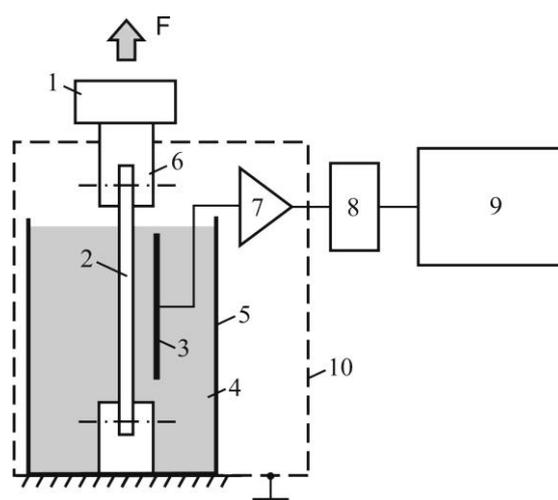


Рис. 1. Схема электрохимической измерительной ячейки: 1 – испытательная машина на растяжение; 2 – алюминиевый образец; 3 – плоский свинцовый электрод; 4 – электролит (водный раствор NaCl); 5 – кварцевый сосуд; 6 – диэлектрические захваты испытательной машины; 7 – усилитель; 8 – АЦП; 9 – компьютер; 10 – экран

лопатак размерами рабочей части $6 \times 3 \times 0,5$ мм вырезались машинным способом из холоднокатаной полосы вдоль направления прокатки. Перед испытанием образцы отжигались при 450°C в течение 1 часа и закаливались на воздухе. После термообработки средний размер зерна составил около 10 мкм. Результаты исследования микроструктуры сплава представлены в работе [6].

Схема электрохимической ячейки представлена на рис. 1. Электрохимическая ячейка представляет собой открытую гальваническую цепь, состоящую из деформируемого растяжением в испытательной машине 1 плоского образца алюминий-магниевого сплава 2, плоского свинцового электрода 3, установленного на расстоянии 2 мм от поверхности образца, электролита 4 (3 %-го водного раствора NaCl), налитого в стакан из плавленного кварца. Образец электрически изолировали от испытательной машины с помощью стеклотекстолитовых захватов 6. Канал регистрации электрического сигнала состоял из высокоомного широкополосного усилителя 7 ($R_{in} = 5 \cdot 10^9$ Ом, $C_{in} = 20$ пФ, полоса пропускания $10\text{--}10^6$ Гц), аналого-цифрового преобразователя (АЦП) 8 и компьютера 9. Растяжение образцов проводили в жесткой испытательной машине Instron (модель 3344) при комнатной температуре.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сначала образец выдерживали в электролите в течение около 10 минут до полной стабилизации (затухания дрейфа) электрического сигнала. Затем образец деформировали одноосным растяжением со скоростью $\dot{\epsilon}_0 = 3 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$ до разрушения. Основные результаты представлены на рис. 2–4, из которых следует, что скачки механического напряжения σ в ходе растяжения сплава АМг6 (эффект ПЛШ) сопровождаются скачками электрохимического потенциала U синхронно с точностью до десятой доли миллисекунды (рис. 4). Средняя амплитуда скачков электрохимического потенциала ΔU растет линейно с ростом средней амплитуды скачков механического напряжения $\Delta\sigma$ (рис. 5) с коэффициентом пропорциональности $k \approx 0,3 \text{ мВ/МПа}$. Регрессионный анализ этой зависимости показывает отсутствие скачков потенциала ($\Delta U = 0$), если амплитуда скачка разгрузки не превышает некоторого порогового значения, около 3,5 МПа.

Первый скачок напряжения на кривой деформации происходит при деформации $\epsilon_c = 14,7\%$ (первая критическая деформация). С ростом деформации ϵ амплитуда скачков напряжения возрастает от ~ 4 МПа до ~ 20 МПа на стадии предразрушения. В то же время первый скачок электрохимического потенциала наблюдается при деформации около 16 %, когда амплитуда скачка напряжения достигает величины 3 МПа, т. е. на начальной стадии прерывистого течения, когда амплитуда скачков напряжения меняется в интервале $\sim 1\text{--}3$ МПа, скачков потенциала не наблюдается.

Каждый скачок напряжения, как известно, сопровождается локализацией пластической деформации в полосах [7]. В работах [8–9] динамику полос исследовали *in situ* с помощью видеосъемки поверхности деформируемого образца АМг6 со скоростью от 5 до 20 тыс. кадр/с. Установлено, что полоса зарождается на боковой поверхности плоского образца и растет сначала

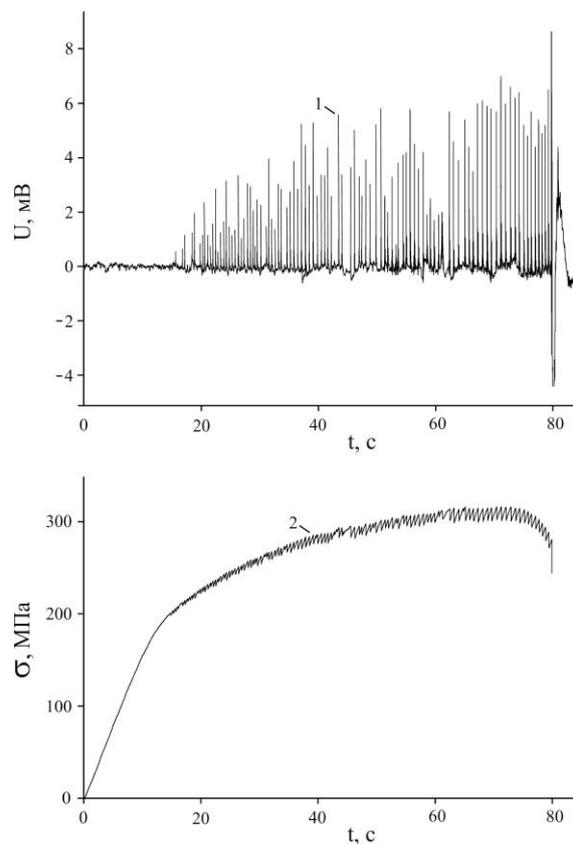


Рис. 2. Скачки электрического потенциала образца U (1) в ходе прерывистой деформации образца сплава АМг6, отвечающие скачкам напряжения σ (2). Скорость деформирования $\dot{\epsilon}_0 = 3 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$. $T = 300 \text{ K}$

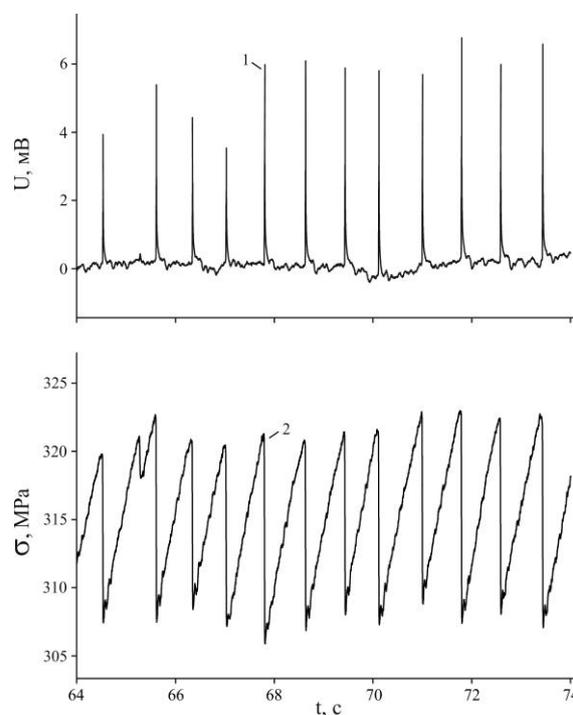


Рис. 3. Фрагмент рис. 1 с более высоким временным разрешением

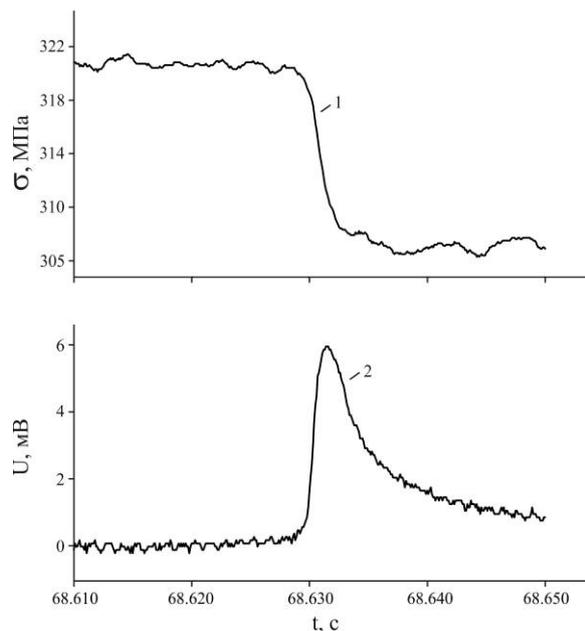


Рис. 4. Скачки напряжения σ (1) и электрохимического потенциала U (2)

поперек образца под углом около 60° к направлению растяжения, т. е. в плоскости максимальных касательных напряжений со скоростью вершины до 10–15 м/с, а затем после выхода на противоположную боковую поверхность полоса расширяется до величины $w_b \approx 1,5 w_s$, где w_s – толщина плоского образца. Полоса содержит избыток дислокаций одного механического знака $\rho_b \sim 10^8 \text{ см}^{-2}$, измеренный по изгибу образца с активной полосой, а скорость пластической деформации в полосе достигает значений $\sim 4\text{--}40 \text{ с}^{-1}$, характерных для ударных испытаний [9].

Алюминиевый сплав покрыт оксидной пленкой Al_2O_3 толщиной около 5 нм, измеренной методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии в работах [10–11]. Эта пленка более хрупкая по сравнению с вязкой алюминиевой матрицей и разрушается под действиями высокоскоростной («ударной») локальной деформации в полосе. Оксидная пленка, однако, быстро восстанавливается вследствие наличия растворенного кислорода в водном растворе электролита NaCl.

В результате разрыва оксидной пленки вдоль активной полосы деформации обнажается поверхность алюминиевой матрицы и «включается» механизм электрохимической коррозии, который связан с ростом потенциала поверхности. Для объяснения этого явления следует иметь в виду, что, как известно, образование дислокаций увеличивает электрическое сопротивление металлов вследствие захвата электронов дислокационными ядрами [12]. В ходе прерывистой деформации полосы макролокализованной деформации выходят на поверхность, разрушая оксидную пленку. Обнаженный от пленки участок поверхности содержит микроскопические ступеньки, образованные выходом краевой компоненты дислокаций.

Выход на поверхность дислокационных ядер сопровождается скачком электронной плотности в поверхностном слое [13], который приводит к скачку

потенциала поверхности, регистрируемого в виде всплеска электромагнитной эмиссии [13–14]. В условиях контакта металла с водным раствором электролита вследствие высокой диэлектрической проницаемости электролита электроны на оборванных связях в ядрах дислокации в момент разрыва связей могут перейти в раствор и участвовать в восстановлении ионов Na^+ (катодный процесс). В результате деформируемый образец приобретает положительный заряд, а противоположный заряд сосредоточивается по другую сторону границы металл–раствор.

Для количественной оценки этого заряда примем, согласно [15], что дислокации в металле переносят электрический заряд и что полоса деформации растет за счет эстафетной передачи скольжения в соседние зерна поликристалла. Тогда вынос заряда на поверхность будет происходить в основном в поверхностных зернах. Суммарная длина дислокаций в таких зернах, очевидно, равна $L = \rho_b V_{gr} N_{gr} = \rho_b V_{gr} S_b / S_{gr} = \rho_b d_{gr} S_b$, где d_{gr} , $S_{gr} = d_{gr}^2$, $V_{gr} = d_{gr}^3$ – средние размер, площадь и объем зерна, соответственно, $N_{gr} = S_b / S_{gr}$ – количество поверхностных зерен с разорванной оксидной пленкой, S_b – площадь полосы деформации. Тогда вынесенный на поверхность заряд $Q = qL$. Подставляя $\rho_b \approx 10^8 \text{ см}^{-2}$ [9], $q = -0,1 e/a$, $a = 4 \cdot 10^{-8} \text{ см}$ – межатомное расстояние в Al, $d_{gr} = 10 \text{ мкм}$, $S_b = 4 \text{ мм}^2$, получим $Q = -10^{11} e$, где $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ – элементарный заряд. Когда этот электронный заряд перейдет в электролит, поверхность металла приобретет положительный заряд Q и потенциал $U_s = Q/C_{DEL}$, где $C_{DEL} = \epsilon_0 S_b / \delta$ – емкость двойного электрического слоя у границы металл–электролит. Подставляя $S_b = 4 \text{ мм}^2$, $\delta \sim 10^{-9} \text{ м}$, получим $C_{DEL} \approx 4 \cdot 10^{-8} \text{ Ф}$ и $U_s \approx 0,4 \text{ В}$.

Скачок потенциала образца U_s вызовет скачок электрического сигнала на входе усилителя $\Delta U = U_s C_p / (C_p + C_{in})$, C_{in} – входная емкость усилителя, C_p – взаимная емкость системы образец–электрод, $C_p \approx \epsilon_0 \epsilon S_p / d_p$, где d_p – расстояние между образцом и электродом, ϵ – диэлектрическая проницаемость электролита. Учитывая, что $C_{in} \approx 20 \text{ пФ}$, $d_p = 2 \text{ мм}$, $\epsilon \approx 60$ [16], получим $C_p \approx 1 \text{ пФ}$ и $\Delta U \approx 20 \text{ мВ}$, как верхнюю оценку амплитуды сигнала. Нижняя оценка $\Delta U_{\min} \approx 2 \text{ мВ}$ следует, если положить нижнюю оценку линейного заряда дислокаций $q_{\min} \sim 0,01 e/a$. Таким образом, оценка диапазона возможных скачков электрического сигнала на входе предусилителя 2–20 мВ по порядку величины и интервалу близка к экспериментальным данным $\approx 3\text{--}10 \text{ мВ}$.

Скачок потенциала максимальной амплитуды (около 13 мВ) наблюдается при разрыве образца, когда в течение нескольких микросекунд вскрывается максимально возможная площадь свежей поверхности алюминиевого сплава, свободной от защитной оксидной пленки. В то же время первые низкоамплитудные скачки разгрузки амплитудой от 1 до около 3 МПа не сопровождаются скачками электрического потенциала,

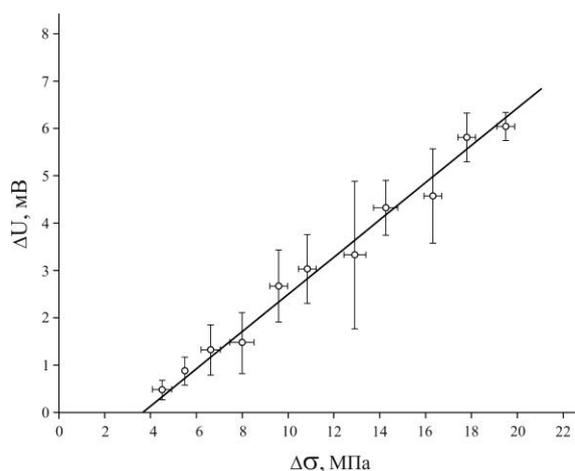


Рис. 5. Зависимость амплитуды скачка потенциала ΔU от скачка разгрузки $\Delta\sigma$ на кривой растяжения образца АМг6

т. к. при столь низком уровне неустойчивостей пластической деформации, и соответственно локализации деформации, оксидная пленка вероятно не разрушается.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе экспериментально установлено, что прерывистая деформация алюминий-магниевого сплава АМг6, погруженного в 3 %-раствор NaCl, сопровождается скачками электрохимического потенциала образца, возникающим одновременно со скачками разгрузки механической системы машина–образец. Предполагается, что электрохимический дискретный отклик на прерывистую деформацию непосредственно связан с разрушением хрупкого оксидного слоя Al_2O_3 , вызванного образованием и распространением полос макролокализованной пластической деформации. Обнаруженные скачки химического потенциала могут быть использованы для исследования массива событий неустойчивой пластической деформации методами статистического и фрактального анализа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белл Дж.Ф. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. М.: Наука, 1984. Ч. 2. 432 с.

2. Estrin Y., Kubin L.P. Spatial coupling and propagative plastic instabilities // Continuum models for materials with microstructure / ed. by H.-B. Mühlhaus. N. Y.: Wiley & Sons, 1995. P. 395-453.
3. Kubin L.P., Fressengeas C., Ananthakrishna G. Collective behavior of dislocation in plasticity // Dislocations in solids / F.R.N. Nabarro, M.S. Duesbery eds. Amsterdam: Elsevier, 2002. P. 101-192.
4. Rizzi E., Hahner P. On the Portevin–Le Chatelier effect: theoretical modeling and numerical results // Int. J. Plast. 2004. V. 20. P. 121-165.
5. Yilmaz A.J. The Portevin–Le Chatelier effect: a review of experimental findings // Sci. Technol. Adv. Mater. 2011. V. 12. P. 1-16.
6. Шибков А.А., Золотов А.Е., Шуклинов А.В. Структурно-чувствительные эффекты прерывистой деформации промышленных сплавов Al-Mg. Тамбов: Изд. дом ТГУ им. Г.Р. Державина, 2011. 173 с.
7. Chihab K., Estrin Y., Kubin L.P., Vergnol J. The kinetics of the Portevin–Le Chatelier bands in an Al-5 at % Mg alloy // Scr. Metall. 1987. V. 21. P. 203-208.
8. Шибков А.А., Золотов А.Е. Актуальные проблемы механики деформируемых твердых тел. Нелинейная динамика неустойчивой пластической деформации металлов. Тамбов: Изд. дом ТГУ им. Г.Р. Державина, 2010. 187 с.
9. Гасанов М.Ф., Золотов А.Е., Шибков А.А. Экспериментальное исследование механизма распространения деформационных полос в алюминиевом сплаве // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. Тамбов, 2017. Т. 22. Вып. 5. С. 1081-1085. DOI: 10.20310/1810-0198-2017-22-5-1081-1085.
10. Strohmaier B.R. An ESCA method for determining the oxide thickness on aluminum alloys // Surf. Interface Analysis. 1990. V. 15. P. 51-56.
11. Yu S.Y., O'Grady W.E., Ramaker D.E., Natishan P.M. Chloride ingress into aluminum prior to pitting corrosion an investigation by XANES and XPS // Journal of the American Chemical Society. 2000. V. 147. P. 2952-2958.
12. Landauer R. Conductivity of cold-worked metals // Phys. Rev. 1951. V. 82. P. 520-521.
13. Schmitter E.D. Electric signals from plastic deformation in metals. Monitoring intermittent plastic flow in metals with an electric sensor // Phys. Lett. A. 2007. V. 368. P. 320-323.
14. Шибков А.А., Титов С.А., Желтов М.А., Гасанов М.Ф., Золотов А.Е., Проскураков К.А., Жигачев А.О. Электромагнитная эмиссия при развитии макроскопически неустойчивой пластической деформации металла // Физика твердого тела. 2016. Т. 58. № 1. С. 3-10.
15. Орлов А.Н. Введение в теорию дефектов в кристаллах. М.: Высш. шк., 1983. 144 с.
16. Renou R., Ding M., Zhu H., Szymczyk A., Malfreyt P., Ghoufi A. Concentration Dependence of the Dielectric Permittivity, Structure, and Dynamics of Aqueous NaCl Solutions: Comparison between the Drude Oscillator and Electronic Continuum Models // J. Phys. Chem. B. 2014. V. 118. P. 3931-3940.

БЛАГОДАРНОСТИ: Исследование выполнено в рамках государственного задания Минобрнауки России, № 3.8515.2017\БЧ.

Поступила в редакцию 22 июня 2017 г.

Шибков Александр Анатольевич, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация, доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической и экспериментальной физики, e-mail: shibkov@tsu.tmb.ru

Денисов Андрей Александрович, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация, инженер кафедры теоретической и экспериментальной физики, e-mail: shibkov@tsu.tmb.ru

Желтов Михаил Александрович, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теоретической и экспериментальной физики, e-mail: shibkov@tsu.tmb.ru.

Золотов Александр Евгеньевич, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и экспериментальной физики, e-mail: shibkov@tsu.tmb.ru

Гасанов Михаил Фахрадинович, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация, кандидат физико-математических наук, инженер кафедры теоретической и экспериментальной физики, e-mail: shibkov@tsu.tmb.ru

UDC 539.374

DOI: 10.20310/1810-0198-2017-22-5-1086-1091

ELECTROCHEMICAL RESPONSE TO DISCONTINUOUS DEFORMATION OF PORTEVEN–LE CHATELIER

© A.A. Shibkov, A.A. Denisov, M.A. Zheltov,
A.E. Zolotov, M.F. Gasanov

Tambov State University named after G.R. Derzhavin
33 Internatsionalnaya St., Tambov, Russian Federation, 392000
E-mail: shibkov@tsu.tmb.ru

It has been experimentally established that the discontinuous deformation of a deformable sample of an aluminum-magnesium alloy immersed in an aqueous NaCl solution is accompanied by jumps in the electrochemical potential of the sample surface with an amplitude of up to ~ 10 mV. The potential jumps occur simultaneously within ~ 1 ms with jumps of mechanical stress and are associated, as expected, with the rupture of the oxide film caused by the exit to the sample surface of the localized plastic deformation band.

Keywords: jerky flow; the Portevin–Le Chatelier effect; deformation band; electrochemical potential; dislocation charge

REFERENCES

1. Bell Dzh.F. *Eksperimental'nye osnovy mekhaniki deformiruemyykh tverdykh tel* [Experimental Mechanic Basis of the Deformable Solid]. Moscow, Nauka Publ., 1984, pt. 2, 432 p. (In Russian).
2. Estrin Y., Kubin L.P. Spatial coupling and propagative plastic instabilities. In: H.-B. Muhlhaus (ed.). *Continuum models for materials with microstructure*. New York, Wiley & Sons, 1995, pp. 395–453.
3. Kubin L.P., Fressengeas C., Ananthakrishna G. Collective behavior of dislocation in plasticity. In: F.R.N. Nabarro, M.S. Duesbery (eds.). *Dislocations in solids*. Amsterdam, Elsevier, 2002, pp. 101–192.
4. Rizzi E., Hahner P. On the Portevin–Le Chatelier effect: theoretical modeling and numerical results. *Int. J. Plast.*, 2004, vol. 20, pp. 121–165.
5. Yilmaz A.J. The Portevin–Le Chatelier effect: a review of experimental findings. *Sci. Technol. Adv. Mater.*, 2011, vol. 12, pp. 1–16.
6. Shibkov A.A., Zolotov A.E., Shuklinov A.V. *Struktorno-chuvstvitel'nye efekty preryvisty deformatsii promyshlennykh splavov Al-Mg* [Structural-sensitive effects of jerky deformation of industrial alloys Al-Mg]. Tambov, Publishing House of Tambov State University named after G.R. Derzhavin, 2011, 173 p. (In Russian).
7. Chihab K., Estrin Y., Kubin L.P., Vergnol J. The kinetics of the Portevin–Le Chatelier bands in an Al-5 at % Mg alloy. *Scr. Metall.*, 1987, vol. 21, pp. 203–208.
8. Shibkov A.A., Zolotov A.E. *Aktual'nye problemy mekhaniki deformiruemyykh tverdykh tel. Nelineynaya dinamika neustoychivoy plasticheskoy deformatsii metallov* [Relevant Issues of Mechanics of Deformed Solids. Nonlinear Dynamics of Unstable Plastic Deformation]. Tambov, Publishing House of Tambov State University named after G.R. Derzhavin, 2010, 187 p. (In Russian).
9. Gasanov M.F., Zolotov A.E., Shibkov A.A. Eksperimental'noe issledovanie mekhanizma rasprostraneniya deformatsionnykh polos v alyuminievom splave [Experimental study of the deformation band propagation mechanism in aluminum alloy]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya Estestvennye i tekhnicheskie nauki – Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences*, 2017, vol. 22, no. 5, pp. 1081–1085. (In Russian). DOI: 10.20310/1810-0198-2017-22-5-1081-1085.
10. Strohmeier B.R. An ESCA method for determining the oxide thickness on aluminum alloys. *Surf. Interface Analysis*, 1990, vol. 15, pp. 51–56.
11. Yu S.Y., O'Grady W.E., Ramaker D.E., Natishan P.M. Chloride ingress into aluminum prior to pitting corrosion an investigation by XANES and XPS. *Journal of the American Chemical Society*, 2000, vol. 122, pp. 2952–2958.
12. Landauer R. Conductivity of cold-worked metals. *Phys. Rev.*, 1951, vol. 82, pp. 520–521.
13. Schmitter E.D. Electric signals from plastic deformation in metals. Monitoring intermittent plastic flow in metals with an electric sensor. *Phys. Lett. A*, 2007, vol. 368, pp. 320–323.
14. Shibkov A.A., Titov S.A., Zheltov M.A., Gasanov M.F., Zolotov A.E., Proskuryakov K.A., Zhigachev A.O. Elektromagnitnaya emissiya pri razviti makroskopicheski neustoychivoy plasticheskoy deformatsii metalla [Electromagnetic emission in the development of macroscopically unstable plastic deformation of a metal]. *Fizika tverdogo tela – Physics of the Solid State*, 2016, vol. 58, no. 1, pp. 3–10. (In Russian).
15. Orlov A.N. *Vvedenie v teoriyu defektov v kristallakh* [Introduction in Crystal Defect Theory]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1983, 144 p. (In Russian).
16. Renou R., Ding M., Zhu H., Szymczyk A., Malfreyt P., Ghoufi A. Concentration Dependence of the Dielectric Permittivity, Structure, and Dynamics of Aqueous NaCl Solutions: Comparison between the Drude Oscillator and Electronic Continuum Models. *J. Phys. Chem. B*, 2014, vol. 118, pp. 3931–3940.

ACKNOWLEDGEMENTS: The study is fulfilled within the framework of state assign of the Ministry of Education and Science of Russia no. 3.8515.2017\БЧ.

Received 22 June 2017

Shibkov Aleksander Anatolyevich, Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Tambov, Russian Federation, Doctor of Physics and Mathematics, Professor of Theoretical and Experimental Physics Department, e-mail: shibkov@tsu.tmb.ru

Denisov Andrey Aleksandrovich, Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Tambov, Russian Federation, Engineer of Theoretical and Experimental Physics Department, e-mail: shibkov@tsu.tmb.ru

Zheltoy Mikhail Aleksandrovich, Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Tambov, Russian Federation, Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor of Theoretical and Experimental Physics Department, e-mail: shibkov@tsu.tmb.ru

Zolotov Aleksander Evgenyevich, Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Tambov, Russian Federation, Candidate of Technics, Associate Professor of Theoretical and Experimental Physics Department, e-mail: shibkov@tsu.tmb.ru

Gasarov Mikhail Fakhraddinovich, Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Tambov, Russian Federation, Candidate of Physics and Mathematics, Engineer of Theoretical and Experimental Physics Department, e-mail: shibkov@tsu.tmb.ru

Для цитирования: Шибков А.А., Денисов А.А., Желтов М.А., Золотов А.Е., Гасанов М.Ф. Электрохимический отклик на прерывистую деформацию Портевена–Ле Шателье // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. Тамбов, 2017. Т. 22. Вып. 5. С. 1086-1091. DOI: 10.20310/1810-0198-2017-22-5-1086-1091

For citation: Shibkov A.A., Denisov A.A., Zheltoy M.A., Zolotov A.E., Gasarov M.F. Elektrokhimicheskiy otklik na preryvistuyu deformatsiyu Portevena–Le Shatel'e [Electrochemical response to discontinuous deformation of Porteven–Le Chatelier]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya Estestvennye i tekhnicheskie nauki – Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences*, 2017, vol. 22, no. 5, pp. 1086-1091. DOI: 10.20310/1810-0198-2017-22-5-1086-1091 (In Russian, Abstr. in Engl.).