

05.1;06.4

Динамика деформационных полос, инициированных ударом индентора о поверхность алюминий-магниевого сплава

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

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

E-mail: shibkov@tsu.tmb.ru

Поступило в Редакцию 21 апреля 2022 г.

В окончательной редакции 21 апреля 2022 г.

Принято к публикации 31 мая 2022 г.

Методами высокоскоростной видеосъемки и акустической эмиссии исследована динамика полос макролокализованной деформации, генерируемых ударом индентора Виккерса о поверхность алюминий-магниевого сплава АМг6, деформируемого в условиях ползучести. Установлено, что эти полосы являются триггером развития макроскопического скачка пластической деформации на кривой ползучести. Показано, что в сплавах, демонстрирующих эффект Портевена–Ле Шателье, необходимо учитывать зарождение и распространение макрополос деформации при эрозионном повреждении поверхности для оценки объема и морфологии пластической зоны при ударном микроиндентировании деформируемого сплава.

Ключевые слова: прерывистая деформация, полоса деформации, удар, индентор, алюминий-магний-сплав.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.14.52866.19228

Алюминий-магниевые сплавы с содержанием магния 3–6% широко используются в авиакосмической отрасли, судостроении, автопроме и химическом машиностроении. В технологически важном диапазоне скоростей деформирования и температур испытания эти сплавы демонстрируют прерывистую деформацию, которая выражается в появлении повторяющихся скачков напряжения при деформировании с заданной скоростью $\dot{\epsilon}_0 = \text{const}$ в жесткой испытательной машине (эффект Портевена–Ле Шателье), при нагружении с заданной скоростью $\dot{\sigma}_0 = \text{const}$ (эффект Савара–Массона) и в условиях ползучести $\sigma_0 = \text{const}$ (лестничная ползучесть) [1]. Во всех перечисленных случаях деформационные скачки возникают в результате спонтанного зарождения и распространения полос макролокализованной деформации, которые оказывают негативное влияние на механические и коррозионные свойства сплавов: уменьшают пластичность, коррозионную стойкость и могут вызвать внезапное разрушение. Исследования влияния внешних воздействий на прерывистую деформацию и полосообразование промышленных алюминиевых сплавов начаты в [2,3] относительно воздействия импульсного лазерного излучения [2] и химически агрессивной среды [3]. В настоящей работе экспериментально исследовано влияние удара индентора о поверхность деформируемого алюминий-магниевого сплава на динамику и морфологию деформационных полос и последующее развитие макроскопического скачка пластической деформации.

Материалом для исследования служил сплав АМг6 (Al–6.15 mass% Mg–0.65 mass% Mn–0.25 mass% Si–0.21 mass% Fe). Образцы в форме двухсторонних лопаток с размером рабочей части $6 \times 3 \times 0.5$ mm вырезались из холоднокатаного листа, отжигались в

течение часа при температуре 450°C и закаливались на воздухе. Схема растяжения в условиях прерывистой ползучести подробно описана в [4]. Растяжение в мягкой испытательной машине проводилось сначала в режиме нагружения со скоростью $\dot{\sigma}_0 = 1$ MPa/s до напряжения $\sigma_0 = 260$ MPa, а затем в режиме ползучести. Для исследования динамики полос были использованы метод акустической эмиссии (АЭ) и высокоскоростная видеосъемка со скоростью до 20 000 fps (frames per second) скоростной цифровой камерой VS-FASTG6 (Видеоскан), установленной с противоположной относительно индентора поверхности плоского образца. Акустический канал, включающий датчик акустической эмиссии Zetlab BC 601 и предусилитель АЕР5 (Vallen-Systeme), регистрирует сигналы АЭ в полосе частот от ~ 30 до ~ 600 kHz. Поверхность образца подвергалась ударному воздействию индентором Виккерса, подвешенным на легкой бронзовой ленте (см. вставку на рис. 1), который приводился в движение взрывом компактного заряда взрывчатого вещества (ВВ), инициированным импульсом инфракрасного лазера (YLP-1-100-50-50-NC-RG). Силовой отклик регистрировался тензодатчиком (Zemic H3-C3-100 kg-3B), деформация измерялась с помощью лазерного триангуляционного датчика (Riftec) с чувствительностью $1.5 \mu\text{m}$ в полосе частот до 2 kHz.

На рис. 1 представлена синхронная запись сигналов датчиков деформации (1), акустической эмиссии (2) и тензодатчика (3), вызванных ударом индентора Виккерса в центр рабочей части образца при его растяжении в условиях ползучести при $\sigma_0 = 260$ MPa. Удар индентора наносился спустя $\tau_{imp} = 60$ s после выхода на режим ползучести. В отсутствие внешних воздействий при данном уровне приложенного напряжения скачок на кривой ползучести происходит спонтанно через $\tau \sim 100$ s. Как

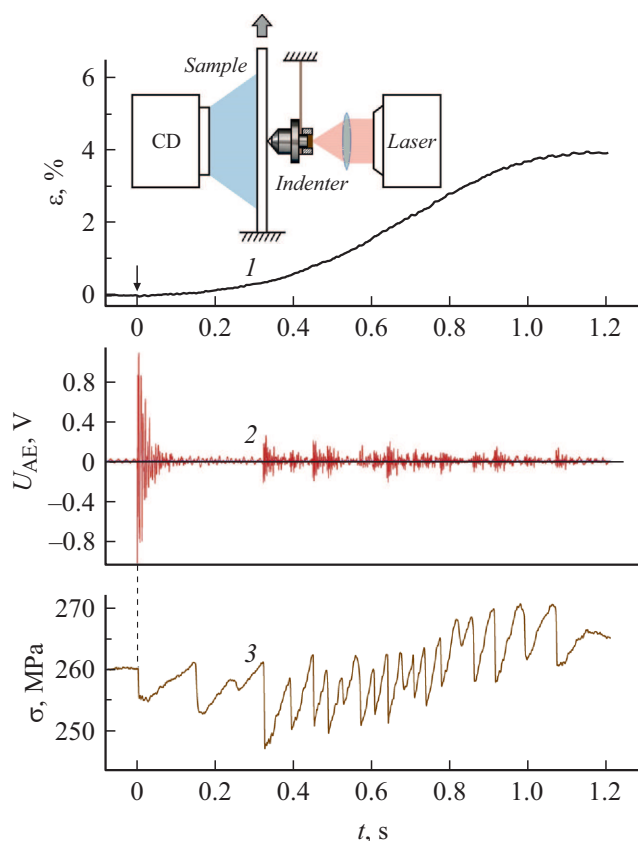


Рис. 1. Синхронная запись деформационного (1), акустического (2) и силового (3) откликов на удар индентора Виккерса о поверхность плоского образца сплава АМг6, инициированного взрывом заряда ВВ, установленного в хвостовой части индентора. Стрелкой отмечен момент удара. На вставке показана схема эксперимента.

видно из рисунка, удар индентора вызывает „преждевременное“ развитие деформационного скачка амплитудой $\Delta\varepsilon \approx 4\%$ (кривая 1 на рис. 1), которое сопровождается характерными повторяющимися всплесками сигналов АЭ (кривая 2) и скачками напряжения в силовом отклике (кривая 3). Амплитуда первого всплеска АЭ, возникающего одновременно с ударом индентора, существенно превышает амплитуды последующих сигналов АЭ и в значительной степени обусловлена собственно ударом индентора о поверхность образца. Последующие всплески АЭ и скачки напряжения связаны с зарождением и расширением деформационных полос, вызывающих развитие деформационного скачка. Корреляция этих временных рядов с динамикой деформационных полос подробно описана в работах [4,5].

Из данных видеосъемки со скоростью 20 000 fps следует, что на противоположной от индентора поверхности в центре рабочей части образца сначала появляется метка (обозначена стрелкой на рис. 2) крестообразной формы или в виде отрезка размером $\sim 0.1\text{--}0.3\text{ mm}$, из которой затем за 1–2 кадра ($50\text{--}100\text{ }\mu\text{s}$) через сечение образца „простреливают“ две сопряженные полосы деформации

в направлениях, составляющих углы $\pm 30^\circ$ относительно нормального сечения образца. Из формы сигнала АЭ видно, что первый максимум сигнала отвечает моменту появления метки, а старт сигнала АЭ соответствует предыдущему кадру, на котором метка еще отсутствует (рис. 2). Согласно [5], амплитуда сигнала АЭ соответствует моменту выхода зародышевой полосы на противоположную поверхность плоского образца. Из данных скоростной видеосъемки и измерения сигнала АЭ следует, что метка образуется в результате выхода на противоположную от индентора поверхность вершины полосы деформации, генерируемой ударом индентора, а начало удара фиксируется стартом сигнала АЭ, что дает верхнюю оценку времени распространения полосы $\Delta t = 50\text{ }\mu\text{s}$ и нижнюю оценку скорости ее вершины $v_t \approx w/\Delta t \sim 10\text{ m/s}$, где $w = 0.5\text{ mm}$ — толщина образца. Отметим, что в условиях прерывистой деформации полосы распространяются в плоскости максимальных касательных напряжений, составляющих угол $\beta \approx 56\text{--}63^\circ$ с осью растяжения [5,6] (для изотропного пластически деформируемого материала этот угол соответствует условию $\text{tg } \beta = \sqrt{2}$, откуда $\beta = 54^\circ 44'$ [7]). Развитие магистральной (сдвиговой) трещины всегда происходит по одной из сопряженных полос деформации, генерируемых ударом индентора (см. вставку на рис. 2).

На основании полученных результатов можно предложить следующую схему полосообразования при ударе индентора о поверхность образца, деформируемого одноосным растяжением. Вершина индентора как концентратор напряжения генерирует две сопряженные полосы в плоскостях, составляющих углы около $\pm 30^\circ$ относительно нормального сечения образца (рис. 3). До выхода на противоположную от индентора поверхность в объеме материала границы полос имеют форму, близкую к параболической. При выходе вершины одной из полос на противоположную поверхность, контролируемую видеокамерой, сначала появляется метка в виде отрезка, а затем, при выходе вершины сопряженной полосы, — крестообразная метка (рис. 3). При такой схеме полосообразования метка находится в точности напротив вершины индентора, что соответствует данным наблюдений. В результате конкуренции сопряженных полос одна из них будет преобладать и станет триггером развития макроскопического деформационного скачка на кривой ползучести за счет генерирования вторичных полос по каскадному механизму, описанному в [4].

Оценим по порядку величины основные характеристики локального ударного нагружения. Боковая съемка показала, что начальная скорость индентора $v_0 \approx 1\text{ m/s}$, что позволяет оценить его кинетическую энергию $W = m_i v_0^2 / 2 \approx 2\text{ mJ}$, где $m = 4\text{ g}$ — масса индентора, и среднюю силу \bar{P} в ходе индентирования как $\bar{P} = m\bar{a} = m v_0 / \tau_0 \approx 80\text{ N}$, где $\tau_0 \sim 50\text{ }\mu\text{s}$ — оценка времени индентирования по данным видеосъемки и анализа сигнала АЭ. Для оценки максимальной силы P_m в контакте примем, что в случае острого индентора

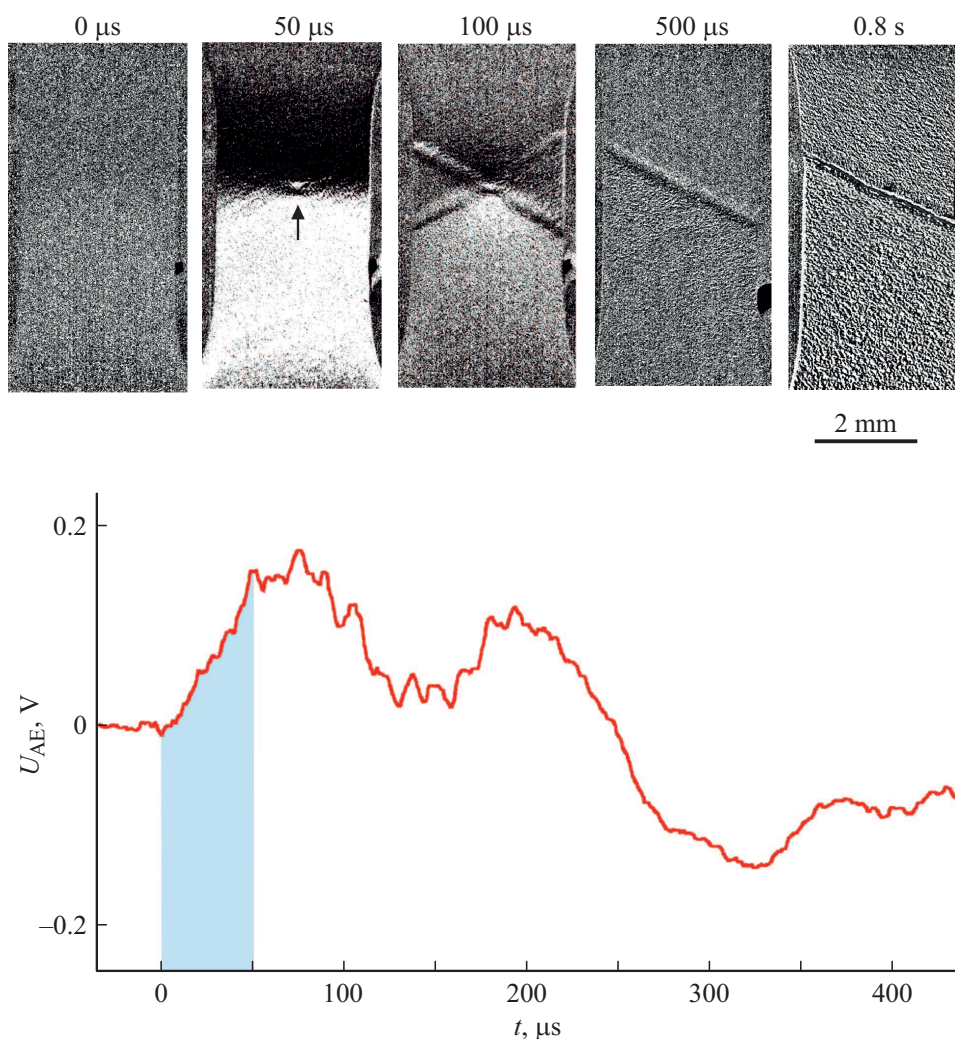


Рис. 2. Сигнал АЭ, синхронизированный с данными видеосъемки появления на противоположной от индентора поверхности метки и развития деформационных полос, инициированных ударом индентора. Выделен интервал времени $\Delta t = \tau_0 = 50 \mu\text{s}$ от начального момента ударного воздействия ($t = 0$) до момента появления метки (обозначена стрелкой), соответствующей выходу на поверхность вершины деформационной полосы. На вставке — результаты компьютерной обработки данных видеосъемки от момента времени $t = 0$ до разрушения образца по полосе деформации при $t = 0.8 \text{ s}$.

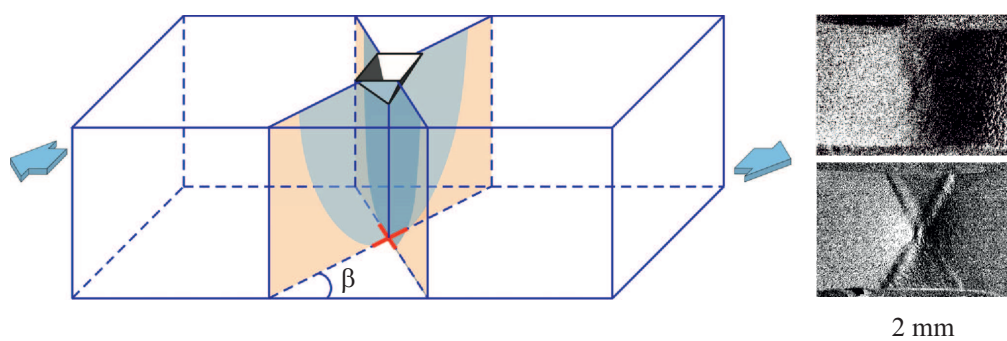


Рис. 3. Схема генерации сопряженных зародышевых полос, поясняющая образование метки на противоположной от индентора поверхности образца. На вставке — типичные изображения первичной крестообразной метки с интервалом $50 \mu\text{s}$. $\beta \approx 60^\circ$ — угол между плоскостью максимальных касательных напряжений и осью растяжения.

$P(h) = kh^2$ [8,9], тогда

$$\bar{P} = h_0^{-1} \int_0^{h_0} P(h)dh = kh_0^2/3 = P_m/3,$$

где $P_m = kh_0^2$, h_0 — контактное сближение, k — константа. Таким образом, $P_m = 3\bar{P} \approx 240$ N. Оценка динамической микротвердости по Виккерсу $HV_d = 1.854\bar{P}_m/d^2 \approx 2.37$ GPa (где $d = 4.95\sqrt{2}h_0 \approx 250$ μm — типичная диагональ отпечатка после удара индентора Виккерса) почти в 3 раза превышает статическую микротвердость сплава АМгб $HV_{st} \approx 800$ МПа. При ударе индентора скорость локальной деформации $\dot{\epsilon} = h^{-1}dh/dt \sim v_0/h_0 \sim 3 \cdot 10^4$ s^{-1} , а скорость локального нагружения $\dot{\sigma} \approx HV_d/\tau_0 \sim 5 \cdot 10^4$ GPa/s. На начальных стадиях динамического индентирования эти величины могут быть значительно выше. Применительно к этой области скоростей деформации и нагружения в работе [10] предложена модель инкубационного времени, основанная на концепции „дислокационного голодания“ в условиях высокоскоростной одноосной деформации (см. также [11]) и эрозионного разрушения [12], которая может быть применена и в рассматриваемом случае, представляющем пример высокоскоростной локальной деформации с динамическими характеристиками, значительно превышающими статические. Отметим, что энергия удара индентора сравнима с энергией абразивной частицы размером около 0.3 mm и плотностью ~ 3 g/cm^2 , летящей со скоростью 250 m/s (900 km/h), типичной, например, для вулканического пепла [13] в условиях контактного взаимодействия с обшивкой летательного аппарата.

Таким образом, динамическое микроиндентирование поверхности деформируемого алюминий-магниевого сплава, демонстрирующего эффект Портевена–Ле Шателье, помимо пластического отпечатка сопровождается образованием латентных повреждений в виде полос макролокализованной деформации, дальнейшая эволюция которых может привести к развитию магистральной трещины.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-22-00692) на оборудовании Центра коллективного пользования ТГУ им. Г.Р. Державина.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Дж.Ф. Белл, *Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел* (Наука, М., 1984), ч. 2, с. 279. [J.F. Bell, *Mechanics of solids. The experimental foundations of solid mechanics* (Springer, Berlin, 1973), vol. 1, part 2].
- [2] А.А. Шибков, А.Е. Золотов, М.Ф. Гасанов, М.А. Желтов, К.А. Прокуряков, ФТТ, **60** (9), 1632 (2018). DOI: 10.21883/FTT.2018.09.46376.063 [A.A. Shibkov, A.E. Zolotov, M.F. Gasanov, M.A. Zheltov, K.A. Proskuryakov, Phys. Solid State, **60** (9), 1674 (2018). DOI: 10.1134/S1063783418090299].
- [3] А.А. Шибков, М.Ф. Гасанов, Р.Ю. Кольцов, А.А. Денисов, Письма в ЖТФ, **45** (15), 6 (2019). DOI: 10.21883/PJTF.2019.15.48077.17828 [A.A. Shibkov, M.F. Gasanov, R.Yu. Koltsov, A. A. Denisov, Tech. Phys. Lett., **45** (8), 746 (2019). DOI: 10.1134/S106378501908013].
- [4] А.А. Шибков, М.Ф. Гасанов, М.А. Желтов, А.Е. Золотов, В.И. Иволгин, Int. J. Plast., **86**, 37 (2016). DOI: 10.1016/j.ijplas.2016.07.014
- [5] А.А. Шибков, М.А. Лебыодкин, Т.А. Лебыодкина, М.Ф. Гасанов, А.Е. Золотов, А.А. Денисов, Phys. Rev. E, **102** (4), 043003 (2020). DOI: 10.1103/PhysRevE.102.043003
- [6] D. Zhemchuzhnikova, M. Lebyodkin, D. Yuzbekova, N. Lebedkina, A. Mogucheva, R. Kaibyshev, Int. J. Plast., **110**, 95 (2018). DOI: 10.1016/j.ijplas.2018.06.012
- [7] Р. Хилл, *Математическая теория пластичности* (Гостехиздат, М., 1956), с. 369. [R. Hill, *The mathematical theory of plasticity* (Clarendon Press, Oxford, 1950).].
- [8] I.A. Garcia, E.G. Berasategui, S.J. Bull, T.F. Page, J. Neidhardt, L. Hultman, N. Hellgren, Phil. Mag. A, **82** (10), 2133 (2002). DOI: 10.1080/01418610208235723
- [9] Ю.В. Колесников, Е.М. Морозов, *Механика контактного разрушения* (ЛКИ, М., 2012), с. 11.
- [10] N. Selyutina, E.N. Borodin, Y. Petrov, A.E. Mayer, Int. J. Plast., **82**, 97 (2016). DOI: 10.1016/j.ijplas.2016.02.004
- [11] Н.С. Селютина, Ю.В. Петров, ФТТ, **60** (2), 240 (2018). DOI: 10.21883/FTT.2018.02.45374.239 [N.S. Selyutina, Yu.V. Petrov, Phys. Solid State, **60** (2), 244 (2018). DOI: 10.1134/S1063783418020221].
- [12] А.Д. Евстифеев, Ю.В. Петров, Н.А. Казаринов, Р.Р. Валиев, ФТТ, **60** (12), 2320 (2018). DOI: 10.21883/FTT.2018.12.46719.132 [A.D. Evstifeev, Yu.V. Petrov, N.A. Kazarinov, R.R. Valiev, Phys. Solid State, **60** (12), 2358 (2018). DOI: 10.1134/S1063783418120120].
- [13] F. Prata, B. Rose, *The encyclopedia of volcanoes*, 2nd ed. (Academic Press, 2015), ch. 52, p. 911. DOI: 10.1016/B978-0-12-385938-9.00052-3