

УДК 538.951

М. Н. Селезнев*

Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти

**ilt.seleznev@gmail.com,*

Научный руководитель – проф., Dr. Eng. *А. Ю. Виноградов*

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ПОЛОС СДВИГА В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТЕКЛАХ МЕТОДОМ СКОРОСТНОЙ ВИДЕОСЪЕМКИ

Рост полос сдвига (ПС) в аморфных металлических сплавах на основе палладия при сжатии и изгибе были исследованы методом высокоскоростной микроскопической видеосъемки. Показано, что ПС распространяются последовательно, а не возникают мгновенно. Скорости роста ПС, измеренные в настоящей работе и другими авторами обнаруживают нелинейное затухание.

Ключевые слова: металлическое стекло; полоса сдвига; высокоскоростная видеосъемка.

M. N. Seleznev

STUDY OF A SHEAR BAND KINETICS IN METALLIC GLASSES BY A HIGH-SPEED IMAGING TECHNIQUE

Growth of shear bands (SB) in Pd-based bulk metallic glassy (BMG) alloys during compression and bending was investigated by high-speed microscopic imaging. The evidence for progressive (not simultaneous) SB propagation is shown. SB velocities measured in present work and by other authors show non-linear decay.

Keywords: metallic glass; shear band; high-speed imaging.

Металлические стекла (МС) – аморфные сплавы (т. е. не имеющие кристаллической решетки) с преимущественно металлической связью между атомами. МС обладают высокой прочностью, непревзойденным пределом упругости и в то же время способностью к пластической деформации [1]. Однако при н.у. пластическая деформация МС сильно локализована в т. н. полосах сдвига (ПС) – плоскостях скольжения шириной ~10 нм [2]. Из-за недостатка упрочнения такая сдвиговая локализация сильно дестабилизирует пластическое течение и провоцирует раннее развитие микротрещин, падение вязкости и разрушение [3]. Несмотря на большой интерес научного сообщества к МС, механизм зарождения и эволюции ПС до сих пор остается предметом дискуссий [4,

5], являясь ключевым фактором в понимании и управлении деформацией МС.

Согласно последним результатам исследований локализованной деформации МС, существует по крайней мере три типа процессов с отчетливо различными скоростями:

- 1) одновременное (в течение одного кадра) появление ПС;
- 2) скольжение двух берегов относительно друг друга со скоростью порядка $\sim 1-10$ мм/с в ПС полностью разделившей образец [6,7];
- 3) распространение трещины сдвига со скоростью близкой к скорости звука ~ 3 км/с [8].

Очевидно, что скольжение возможно только в ПС полностью разделившей образец, когда одна часть образца может свободно скользить относительно другой. Однако возникновение самой ПС вряд ли может быть мгновенной, т. к.:

- 1) должна существовать некая точка инициации ПС, в которой уровень напряжения превышает критический;
- 2) незавершенные ПС обнаруживают линейное изменение величины сдвига от устья до вершины [9].

Тем не менее, экспериментальных доказательств последовательного распространения ПС в настоящее время нет.

Целью данной работы является экспериментальное исследование кинетики ПС, результаты которого позволят выявить:

- 1) характер возникновения ПС;
- 2) закономерности изменения скорости ПС.

Слиток аморфного сплава $Pd_{40}Cu_{30}Ni_{10}P_{20}$ с размерами $50 \times 2,7 \times 2,7$ мм³ был отлит в медную форму, как описано в работе [10]. Образцы на сжатие с размерами $5,5 \times 2,7 \times 2,7$ мм³ были вырезаны электроэрозионным способом. Радиальный 1-мм боковой надрез был сделан в середине каждого образца, чтобы локализовать зону сдвига. Образцы для трехточечного изгиба с размерами $10 \times 2 \times 1$ мм³ вырезались из слитка аморфного сплава $Pd_{40}Ni_{40}P_{20}$, полученного по методу, описанному в работе [11]. Зеркальная полировка образцов позволила отчетливо видеть появление ПС. Экспериментальная установка, используемая в работе, подробно описана в [12] и состоит из жесткой испытательной машины с двухшнековым приводом, высокоскоростной видеокамеры и микроскопическим объективом. Циклическая буферная запись видеокадров по сигналу триггера останавливалась, фиксируя нужное событие. В качестве триггера использовался метод акустической эмиссии (АЭ), который чрезвычайно чувствителен к локальной и быстрой атомной перестройке. Так как ступенька сдвига отбрасывает тень на полированной поверхности, наблюдаемая черная линия однозначно соответствует ПС. Скорость ПС оценивалась путем отношения изменения длины ПС в течение данного кадра к длительности кадра. Для точного вычисления

прироста длины ПС применялась процедура вычитания кадров. Более 200 событий сдвига были захвачены и проанализированы.

ПС – планарный дефект, который формируется в области максимальных касательных напряжений. Стартуя из некоего концентратора напряжения КН, сдвиг в общем случае будет представлять собой диск. В зависимости от местоположения КН на образце в форме параллелепипеда можно выделить два сценария развития зоны сдвига: 1 сдвиг распространяется в двух направлениях, если КН находится на грани (рис. 1, *a*) или 2 в одном направлении, если КН находится на ребре (рис. 1б). Описанные типичные ПС показаны на рис. 1, их скорость составляет около 2 м/с – существенно быстрее скольжения (мм/с), но и существенно медленнее сдвиговой трещины (км/с).

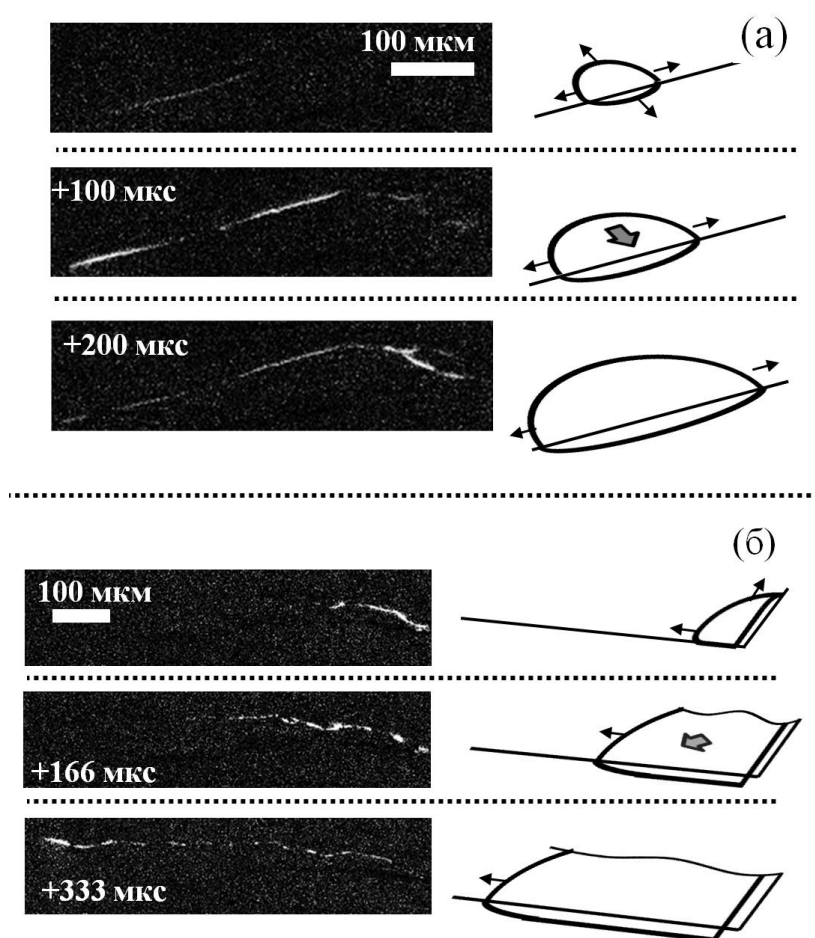


Рис. 1. Распространение полос сдвига в зависимости от положения концентратора напряжения – на грани (*a*) и на ребре образца (*б*). Левая колонка – результаты вычитания кадров высокоскоростной видеосъемки, где указано время, прошедшее между последовательными кадрами в мкс, а также масштабный отрезок. Правая колонка – схематическая модель распространения сдвига, соответствующая наблюдениям, где широкая стрелка указывает направление сдвига, а узкие стрелки – распространение фронта сдвига

Такой разброс физической величины (на шесть порядков) удобно изобразить в логарифмических координатах. Результаты измерения скорости сдвигообразования в МС, полученные как в данной работе, так и другими авторами, отображены в двойных логарифмических координатах на рис. 2. Тренд изменения скорости сдвига обратно пропорционален квадрату времени.

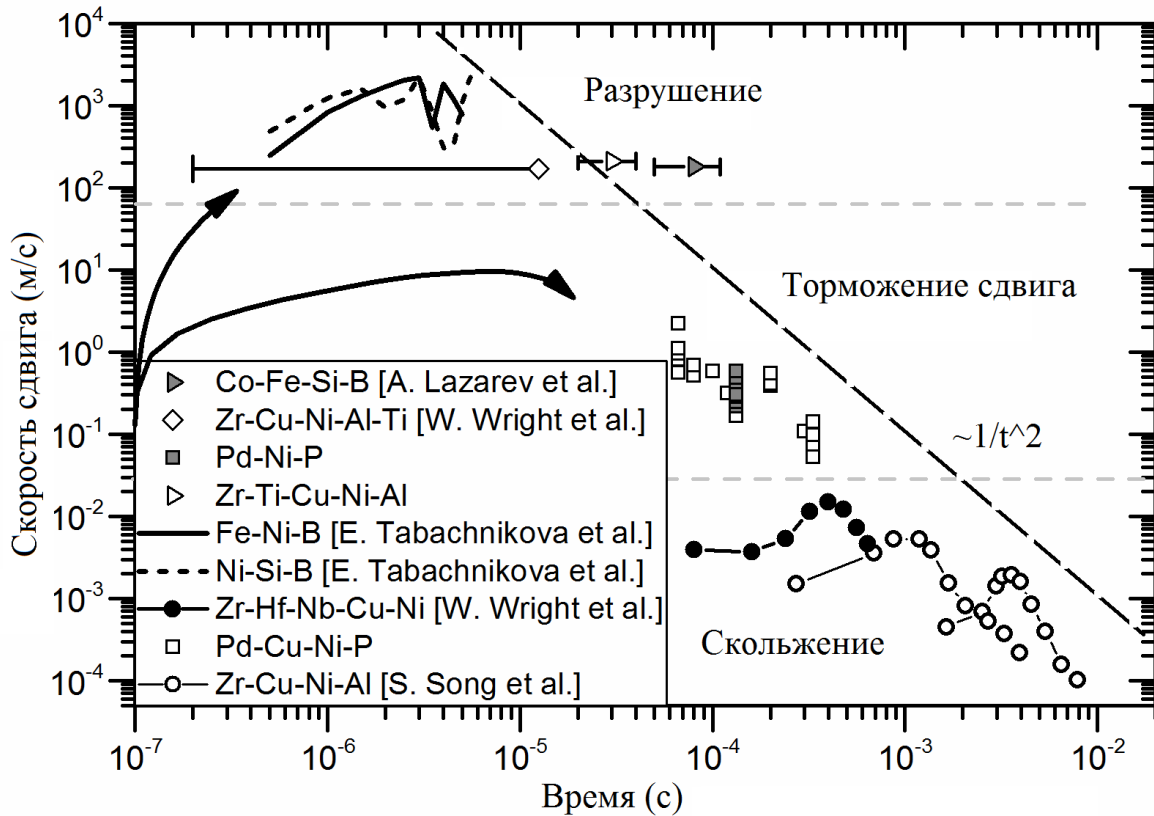


Рис. 2. Скорости сдвига во время локализованной деформации в различных сплавах МС во время трех характерных процессов: 1 разрушение посредством сдвиговой трещины согласно данным видеосъемки [6,8] и АЭ [13]; 2 распространение ПС, рассчитанное в данной работе; 3 скольжение в ПС, рассчитанное методом цифровой корреляции изображений [6,7]

Изменение скорости сдвига, по-видимому, подчиняется зависимости, аналогичной закону Гутенберга – Рихтера для магнитуд землетрясений. Это свидетельствует в пользу того, что сдвигообразование в МС – лавинообразный процесс, который может быть описан функцией скейлинга [14] вида:

$$V = Ate^{-Bt^2}, \quad (1)$$

где V – скорость сдвига, t – время, A и B – коэффициенты пропорциональности.

Гипотеза развития ПС к настоящему моменту следующая: при механической нагрузке, по достижению критического напряжения упругий сдвиг зарождается в точке максимальных напряжений и распространяется планарно. Скорость сдвига описывается формулой (1), где A и B зависят от структуры материала ПС, его упругих и пластических характеристик и предыстории деформации. Вышеописанные факторы определяют, достигнет ли скорость ПС критического значения, при котором автокаталитический процесс разупрочнения, разогрева и падения вязкости приводит к разрушению. В противном случае скорость сдвига затухает и приводит к формированию ПС.

Предлагаемый сценарий носит качественный характер. Количественная физическая модель находится на стадии разработки и требует дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Axinte E. Metallic glasses from “alchemy” to pure science: Present and future of design, processing and applications of glassy metals // *Mater. Des.* Elsevier Ltd, 2012. Vol. 35. P. 518–556.
2. Pekarskaya E., Kim C. P., Johnson W. L. In situ transmission electron microscopy studies of shear bands in a bulk metallic glass based composite // *J. Mater. Res.* 2011. Vol. 16, № 9. P. 2513–2518.
3. Zhao Y. et al. Evolution of shear bands into cracks in metallic glasses // *J. Alloys Compd.* Elsevier B. V., 2015. Vol. 621. P. 238–243.
4. Greer A. L., Cheng Y. Q., Ma E. Shear bands in metallic glasses // *Mater. Sci. Eng. R Reports.* 2013. Vol. 74. P. 71–132.
5. Maass R., Loeffler J. F. Shear-band dynamics in metallic glasses // *Adv. Funct. Mater.* 2015. Vol. 25, № 16. P. 2353–2368.
6. Wright W. J., Byer R. R., Gu X. High-speed imaging of a bulk metallic glass during uniaxial compression // *Appl. Phys. Lett.* 2013. Vol. 102, № 24. P. 241920.
7. Song S. X., Nieh T. G. Direct measurements of shear band propagation in metallic glasses – An overview // *Intermetallics.* Elsevier Ltd, 2011. Vol. 19, № 12. P. 1968–1977.
8. High speed cinematography of cracks spreading under failure of amorphous metallic alloys / Tabachnikova E.D. [et al.] // *J. Phys. IV.* 1997. Vol. 7, № C3. P. 307–310.
9. Progressive shear band propagation in metallic glasses under compression / Qu R. T. [et al.] // *Acta Mater.* 2015. Vol. 91. P. 19–33.
10. Vinogradov A., Danyuk A., Khonik V. A. Localized and homogeneous plastic flow in bulk glassy Pd₄₀Cu₃₀Ni₁₀P₂₀: An acoustic emission study // *J. Appl. Phys.* 2013. Vol. 113, № 15. P. 1–8.

11. Impact of micro-alloying on the plasticity of Pd-based Bulk Metallic Glasses / Nollmann N. [et al.] // *Scr. Mater. Acta Materialia Inc.*, 2015. Vol. 111. P. 119–122.
12. Seleznev M., Vinogradov A. Note: High-speed optical imaging powered by acoustic emission triggering // *Rev. Sci. Instrum.* 2014. Vol. 85, № 7. P. 76103.
13. Lazarev A., Vinogradov A., Hashimoto S. Comparative analysis of inhomogeneous plastic flow in bulk and ribbon metallic glasses monitored by acoustic emission // *J. Alloys Compd. Elsevier B.V.*, 2010. Vol. 504. P. S60–S64.
14. Mehta A. P., Dahmen K. A., Ben-Zion Y. Universal mean moment rate profiles of earthquake ruptures // *Phys. Rev. E - Stat. Nonlinear, Soft Matter Phys.* 2006. Vol. 73, № 5. P. 1–8.