

*Письма редактору*

## Низкотемпературная аномалия пластичности объемного металлического стекла



Е.Д. Табачникова, А.В. Подольский, В.З. Бенгус, С.Н. Смирнов

*Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина НАН Украины  
пр. Ленина, 47, г. Харьков, 61103, Украина  
E-mail: tabachnikova@ilt.kharkov.ua*

Д.В. Лузгин, А. Иноуе

*Institute for Materials Research, Tohoku University, Aoba-Ku, Sendai 980–8577, Japan*

Статья поступила в редакцию 4 июня 2008 г.

В интервале температур 300–4,2 К изучена пластическая деформация и разрушение при сжатии цилиндрических образцов объемного металлического стекла  $\text{Zr}_{64,13}\text{Cu}_{15,75}\text{Ni}_{10,12}\text{Al}_{10}$ . При температуре 300 К деформационная кривая имеет скачкообразный характер, обусловленный распространением тонких полос сдвига. При деформации ~ 3–4% наблюдается катастрофическое, неконтролируемое разрушение образцов, происходящее в результате распространения полосы макроскопического сдвига со скоростью (порядка  $10^3$  м/с), сравнимой со скоростью звука. Понижение температуры от 300 до 170 и 77 К изменяет характер деформационных кривых от скачкообразного к плавному. Обнаружена интересная низкотемпературная аномалия процесса деформации: при температурах 170 и 77 К наблюдается «медленное» (со скоростью порядка  $10^{-6}$  м/с) распространение одной макроскопической полосы сдвига. Охлаждение до 4,2 К приводит к исчезновению макроскопической пластичности образцов, а их разрушение происходит, как и при 300 К, в результате распространения полосы катастрофического сдвига с околозвуковой скоростью.

В інтервалі температур 300–4,2 К вивчено пластичну деформацію та руйнування при стиску циліндричних зразків об'ємного металевого скла  $\text{Zr}_{64,13}\text{Cu}_{15,75}\text{Ni}_{10,12}\text{Al}_{10}$ . При температурі 300 К деформційна крива має стрибкоподібний характер, який обумовлено розповсюдженням тонких смуг зсуву. При деформації ~ 3–4% спостерігається катастрофічне, неконтрольоване руйнування зразків, що відбувається в результаті поширення смуги макроскопічного зсуву зі швидкістю (порядку  $10^3$  м/с), яка приблизно співпадає зі швидкістю звуку. Зниження температури від 300 до 170 і 77 К змінює характер деформаційних кривих від стрибкоподібного до плавного. Виявлено цікаву низькотемпературну аномалію процесу деформації: при температурах 170 і 77 К спостерігається «повільне» (зі швидкістю порядку  $10^{-6}$  м/с) поширення однієї макроскопічної смуги зсуву. Охолодження до 4,2 К призводить до зникнення макроскопічної пластичності зразків, а їхнє руйнування відбувається, як і при 300 К, у результаті поширення смуги катастрофічного зсуву зі швидкістю, наближеною до звукової.

PACS: 81.05.Kf Металлические стекла;  
62.20.Fe Деформация и пластичность.

Ключевые слова: объемные металлические стекла, механические свойства, низкие температуры.

### 1. Введение

Микромеханизмы пластической деформации объемных аморфных металлических сплавов (ОАМС) в настоящее время однозначно не установлены и яв-

ляются предметом оживленной дискуссии [1–4]. Визуальные наблюдения за поверхностью образцов, деформированных при комнатной и более низких температурах, свидетельствуют о том, что пластическое течение в ОАМС происходит неоднородно путем за-

рождения и распространения полос сдвига [1–4]. В данной работе обнаружен новый экспериментальный факт — уменьшение на много порядков скорости распространения макроскопического пластического сдвига в образцах объемного металлического стекла  $Zr_{64,13}Cu_{15,75}Ni_{10,12}Al_{10}$  при их охлаждении от 300 до 170 и 77 К. Описанию этого явления и посвящена, в основном, данная работа.

## 2. Методика эксперимента

В экспериментах регистрировались деформационные кривые напряжение  $\sigma$ –пластическая деформация  $\varepsilon$  при сжатии объемного аморфного металлического сплава  $Zr_{64,13}Cu_{15,75}Ni_{10,12}Al_{10}$ . Исследовали цилиндрические образцы диаметром 2 мм и длиной 4 мм на жесткой деформационной машине со скоростью нагружения  $3,5 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$  при температурах 300, 220, 170, 77 и 4,2 К. Точность измерения напряжения и деформации составляла  $\pm 1 \text{ МПа}$ ,  $\pm 0,1\%$  соответственно. При температурах 300, 170 и 77 К на стадии легкого скольжения методом циклирования скорости деформирования [5] определяли значения активационного объема процесса пластической деформации. Некоторые образцы разгружали до их разрушения с целью изучения изменений их формы. Изучение боковой поверхности деформированных образцов и поверхности разрушения проводили на металлографическом микроскопе МИМ-7 и сканирующем электронном микроскопе Hitachi S4800 при ускоряющем напряжении 15 кВ.

## 3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 1,а представлены типичные деформационные кривые для разных температур. Видно, что при температуре 300 К на деформационных кривых наблюдается практически одна стадия легкого скольжения, в ходе которой пластическая деформация имеет скачкообразный характер. На боковой поверхности образцов на этой стадии деформации наблюдаются тонкие полосы сдвига. Оценки показывают, что сдвиг в одной полосе не превышает  $10^{-5} \text{ м}$ , а средняя скорость сдвига больше, чем  $10^{-4} \text{ м/с}$ . При достижении деформации  $\varepsilon \sim 3\text{--}4\%$  наблюдается катастрофическое, неконтролируемое разрушение образцов, происходящее в результате распространения полосы макроскопического сдвига со скоростью (порядка  $10^3 \text{ м/с}$ ), сравнимой со скоростью звука, и сопровождающееся интенсивным звуковым импульсом.

Понижение температуры опыта до 170 К, а затем до 77 К существенно влияет на процесс деформации (рис. 1,а). Деформационная кривая приобретает стадийный характер. Короткая начальная стадия на кривой  $\sigma(\varepsilon)$  с большим коэффициентом упрочнения сменяется коротким плато с нулевым коэффициентом упрочнения, кривая  $\sigma(\varepsilon)$  становится плавной, скачки напряжения не наблюдаются. Вместе с тем на боковой поверхности образцов наблюдаются узкие полосы скольжения, ориентированные примерно под углом  $45^\circ$  к оси сжатия. В ходе последующего нагружения образца после стадии легкого скольжения наблюдается стадия «разупрочнения» (рис. 1,а): на этой стадии

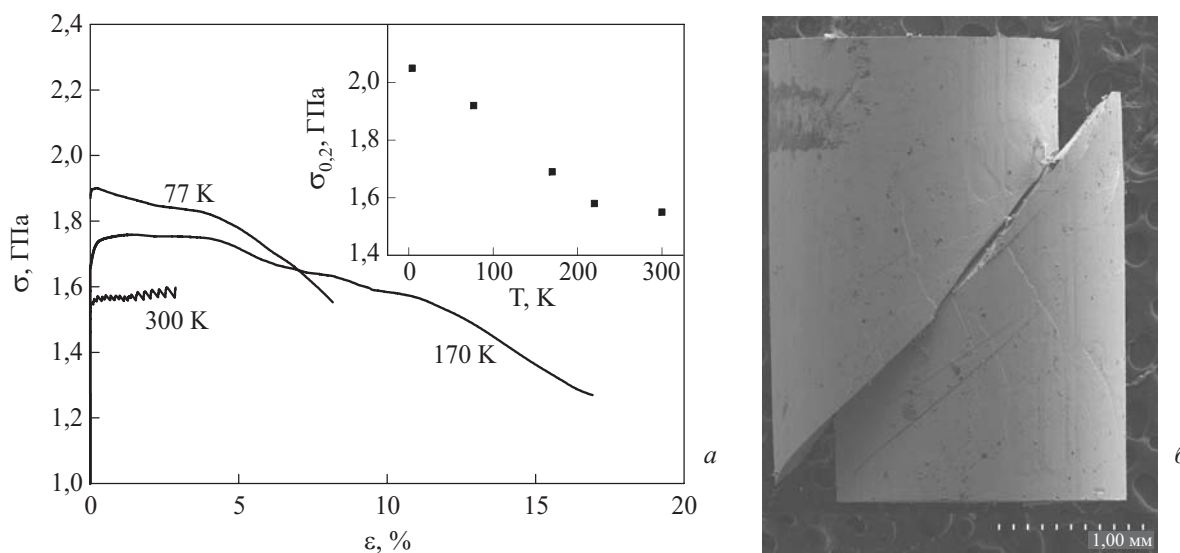


Рис. 1. Типичные деформационные кривые при различных температурах (на вставке — температурная зависимость предела текучести) (а); форма образца после деформации при 170 К (Примечание: образец не разрушен, нагружение остановлено при  $\sim 17\%$  пластической деформации) (б).

происходит плавное уменьшение деформирующего напряжения, а деформация достигает величин  $\sim 15\%$ . Стадии разупрочнения в деформируемом образце соответствует макроскопическая сдвиговая деформация, локализованная в одной узкой полосе и приводящая к сдвигу одной части образца по отношению к другой (рис. 1,б). Подчеркнем, что процесс распространения макроскопической сдвиговой деформации не носит лавинообразный характер: для образца, показанного на рис. 1,б, скорость сдвига в полосе не превышает  $2 \cdot 10^{-6}$  м/с. На стадии разупрочнения можно остановить нагружение, разгрузить образец без его полного разрушения и наблюдать макроскопический сдвиг, прошедший через все сечение образца (рис. 1,б).

На рис. 2 приведена фрактография поверхности той части образца, в которой произошел «медленный» макроскопический сдвиг (рис. 1,б). На поверхности сдвига не наблюдается «венный» узор [6], характерный для поверхности разрушения ОАМС при 300 и 4,2 К, наличие которого свидетельствует об интенсивном локальном разогреве поверхности катастрофического сдвига в процессе разрушения образца. Следовательно, можно предположить, что интенсивный разогрев отсутствует на поверхности разрушения в образцах, деформированных при 170 и 77 К.

Понижение температуры эксперимента до 4,2 К приводит к исчезновению на кривой  $\sigma$ – $\epsilon$  макроскопической пластической деформации и отсутствию тонких полос сдвига на боковой поверхности образцов. Не достигая предела текучести, образцы разрушаются катастрофическим, неконтролируемым способом (как и при 300 К), а на поверхности разрушения наблюдается характерный «венный» узор. Отметим, что при всех исследованных температурах разрушение об-

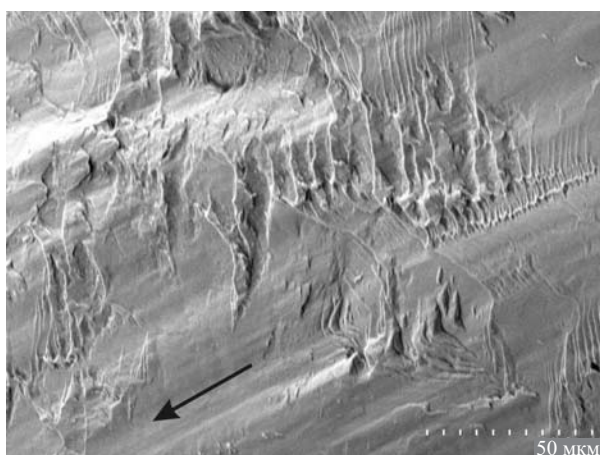


Рис. 2. Типичная картина поверхности образца, по которой произошел «медленный» сдвиг, наблюдаемая в образце, деформированном при 170 К. (Макроскопическая картина незавершенного сдвига для этого образца изображена на рис.1,б)

разцов происходит по плоскости, ориентированной примерно под углом  $45^\circ$  к оси сжатия.

На вставке к рис. 1 приведена температурная зависимость условного предела текучести  $\sigma_{0,2}$  (для  $T = 4,2$  К приведена величина максимально достигнутого напряжения). Рост величины  $\sigma_{0,2}$  при понижении температуры позволяет предположить, что процесс пластической деформации в интервале температур 300–77 К имеет термоактивируемый характер.

Величина активационного объема  $V$  процесса пластической деформации, определенная на начальной стадии легкого скольжения, имеет значение порядка  $20 a^3$ , ( $a$  — межатомное состояние) и практически не зависит от температуры опыта. В моделях [7,8], обсуждаемых в литературе при анализе гетерогенной пластической деформации ОАМС, рассмотрены различные физические механизмы для описания образования и распространения полос сдвига. Однако величина активационного объема для этих моделей примерно одинакова (порядка  $10 a^3$ ). Так, в модели [7], где атомная структура ОАМС описывается набором экспериментально обнаруженных поликластеров и предполагается, что полосы скольжения образуются в результате термоактивированного движения края внутренней межкластерной границы, величина  $V$  приблизительно равна  $(r/a)^{1/2} a^3 \sim 10 a^3$ , где  $r$  — размер нанокластера. В модели [8] предполагается, что пластическая деформация ОАМС осуществляется полосами скольжения, возникающими в результате термоактивированного кооперативного сдвига в зонах с избыточной концентрацией свободного объема, в этом случае величина  $V \sim 10 a^3$ . Таким образом, полученное в работе значение  $V$  практически совпадает с теоретическими оценками этой величины в моделях [7,8] и не позволяет указать преимущественный физический механизм, ответственный за образование и распространение полос сдвига в ходе гетерогенной пластической деформации данного сплава.

Исчезновение прерывистого течения на деформационной кривой, наблюдаемое в данной работе при понижении температуры испытания, упоминалось ранее в работах [9,10] для других составов ОАМС и обсуждалось на основе гипотезы о протекании термоактивированной структурной релаксации в зоне сдвиговой деформации, обусловленной диффузионными процессами.

Обнаруженная в данной работе новая низкотемпературная особенность — аномалия пластичности, выражающаяся в локализации деформации в одной полосе и резком уменьшении (по сравнению с 300 К) скорости распространения макроскопического сдвига, может означать, что тепло, диссипируемое на фронте этой полосы, успевает отводиться во внешнюю среду, что препятствует интенсивному локально-

му разогреву и затрудняет распространение сдвига с катастрофической скоростью.

Из сказанного выше ясно, что для однозначного объяснения обнаруженной в работе низкотемпературной аномалии пластичности необходимы дальнейшие экспериментальные и теоретические исследования. В частности, нужны более подробные измерения скоростной и температурной зависимости данного явления.

Авторы выражают благодарность профессору В.Д. Нацку за ценные дискуссии и Е.Е. Чернохвостенко за помощь в проведении экспериментов.

1. A. Inoue, *Mater. Trans. JIM* **36**, 866 (1995).
2. E.D. Tabachnikova, V.Z. Bengus, Yu.I. Golovin, V.I. Ivolgin, A.I. Tyurin, S.V. Potapov, and M.-P. Macht, *J. Metastable Nanocrystalline Materials* **24–25**, 89 (2005).
3. A.L. Greer and A.R. Yavari, *Phys. Rev. Lett.* **55**, 354 (2007).
4. A. Dubach, F.H. Dalla Torre, and J.F. Loeffler, *Philos. Mag. Lett.* **87**, 695 (2007).
5. A. Evans and R. Rawlings, *Phys. Status Solidi* **34**, 9 (1969).
6. V.Z. Bengus, E.D. Tabachnikova, J. Miskuf, K. Csach, V. Ocelik, W.L. Johnson, and V.V. Molokanov, *J. Mat. Science* **35**, 17 (2000).
7. A.S. Bakai, *Topics in Applied Physics*, vol. 72, Beck/Guntherodt (eds.), Springer-Verlag, Berlin Heidelberg (1994).
8. A.S. Argon, *Acta Metall.* **27**, 47 (1979).
9. C.A. Pampillo, *J. Mater. Science* **10**, 1194 (1975).
10. A.Yu. Vinogradov and V.A. Khonik, *Philos. Mag.* **84**, 2147 (2004).

## Low-temperature anomaly of plasticity of $Zr_{64,13}Cu_{15,75}Ni_{10,12}Al_{10}$ bulk metallic glass

E.D. Tabachnikova, A.V. Podolskiy, V.Z. Bengus, S.N. Smirnov, D.V. Luzgin, and A. Inoue

Compression plastic deformation and failure of cylindrical samples of  $Zr_{64,13}Cu_{15,75}Ni_{10,12}Al_{10}$  bulk metallic glass were studied in the temperature range of 300–4.2 K. At temperature  $T = 300$  K the deformation curve is serrated due to the propagation of narrow shear bands. At a deformation level of about 3–4% a catastrophic, uncontrolled failure of the specimens occurs resulting from the propagation of the macroscopic shear band at a rate  $\sim 10^3$  m/s comparable with the sound velocity. A decrease of temperature from 300 K down to 170 and 77 K changes the type of deformation curves from the jump-like type to a smooth one. An interesting low-temperature anomaly of the deformation process has been registered: at temperatures of 170 and 77 K a «slow» propagation of the single macroscopic shear band at a rate of about  $10^{-6}$  m/s is observed. Cooling down to 4.2 K causes the macroscopic plasticity of the specimens to disappear, and their failure results (as in the case of 300 K) from the propagation of the catastrophic shear band at a nearsonic velocity.

PACS: 81.05.Kf Metallic glasses;  
62.20.Fe Deformation and plasticity.

Keywords: bulk metallic glasses, mechanical properties, low temperatures.