

УДК 539.3

DOI: 10.20310/1810-0198-2017-22-5-1109-1114

## УСТАЛОСТНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ЛЕНТОЧНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТЕКОЛ НА РАСТЯЖЕНИЕ И ИЗГИБ

© Д.Ю. Федотов, В.А. Федоров, А.В. Яковлев,  
Т.Н. Плужникова, А.А. Шлыкова

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

Установлены характерные особенности роста усталостных трещин ленточных образцов аморфных сплавов на основе кобальта и нанокристаллического сплава на основе железа. Показано, что при испытаниях на растяжение в области зарождения трещины имеет место вязкое разрушение с образованием плотнорасположенных микроутяжек. Характерный размер таких утяжек  $\sim 0,5-1,5$  мкм. При переходе к зоне усталостного роста на фоне вязкого разрушения появляются участки роста трещин, похожие на скол. В переходной зоне наблюдаются также участки образования более крупных деформационных структур и ячеек. Основная зона роста усталостной трещины развивается подобно сколу с образованием «венного узора». Определено, что при испытаниях на изгиб зарождение трещин носит хрупкий характер. Вблизи краев образца трещина может переходить в параллельные плоскости, тогда как в центре образца ее рост происходит по одной плоскости. Трещина зарождается со стороны поверхности с растягивающими напряжениями в нескольких плоскостях. По характеру формирования деформационного рельефа и разрушения можно предположить зарождение интрузий и экструзий. Установлено, что трещины распространяются в нескольких плоскостях. Зарождение трещины происходит на интрузии. Вдоль траектории роста трещин наблюдаются сдвиги – экструзии. Ветвления трещин и сдвигов на берегах трещины при испытаниях на изгиб не наблюдали. «Венного узора» на поверхностях трещины также нет. Отмечено, что число циклов, приводящих к разрушению при испытаниях на изгиб при равных напряжениях, значительно превышает число циклов, приводящих к разрушению при испытаниях на растяжение.

*Ключевые слова:* деформация; усталость; трещина; растяжение; изгиб; интрузия; экструзия

Одним из распространенных воздействий на материал является приложение к нему механической нагрузки, что сопровождается деформацией. Деформация материала может происходить и в ходе эксперимента, и в процессе эксплуатации изделий из этого материала. В связи с этим любая информация о процессах, происходящих в материале при деформировании, является значимой. В настоящий момент имеется достаточно много данных о деформации кристаллических материалов. Данных о деформации аморфных тел [1–14] значительно меньше, т. к. аморфное состояние твердого тела – наименее изученная область современного структурного материаловедения. Аморфные металлические сплавы (АМС), или металлические стекла (МС) обладают набором уникальных свойств; одним из таких свойств является способность к пластическому течению [15–16]. Эта способность связана с коллективизированным металлическим характером межатомной связи, при которой легче идут процессы коллективных перемещений. Пластическая деформация в аморфных сплавах может протекать гомогенно или негомогенно. При гомогенной пластической деформации однородно нагруженный образец испытывает однородную деформацию. При негомогенной пластической деформации пластическое течение локализовано в тонких дискретных полосах сдвига, а остальной объем твердого тела остается недеформированным. Изучение смены механизмов течения представляет собой сложную эксперимен-

тальную задачу. Сведения об условиях изменения характера течения аморфных сплавов носят противоречивый характер. В работе [17] показано, что тип пластического течения, формирование его закономерностей определяются кинетикой необратимой структурной релаксации. В случае негомогенной деформации на поверхности продеформированных растяжением, сжатием, изгибом или прокаткой образцов формируются ступеньки сдвига. Эти ступеньки соответствуют выходу на поверхность полос сдвига. Таким образом, аморфные сплавы обладают существенной локальной пластичностью в области негомогенной деформации.

Известно, что при переменных механических (и термических) нагрузках различные материалы разрушаются при напряжениях ниже предела текучести. Это явление называют усталостью (термоусталостью).

Усталостное разрушение в МС [3], как и в кристаллических материалах, происходит путем зарождения и распространения трещин. Трещины зарождаются на дефектах внешней поверхности или вблизи внутренних неоднородностей, например границах зерен в кристаллических материалах. Признаком пластической деформации и скачкообразного распространения трещины в МС служит появление характерных полос в вершине трещины, как и в кристаллических сплавах.

Вопросы эволюции структуры МС относятся к ряду наиболее значимых проблем физики сильно неупорядоченных систем. Главная трудность заключается в

способе описания структуры аморфного состояния. В совокупности с малой эффективностью методов, основанных на взаимодействии твердого тела с электромагнитным излучением различных длин волн (нейтроны, рентгеновские лучи, электроны), здесь отсутствуют привычные кристаллографические термины и понятия. В связи с этим перспективным является расширение арсенала методов исследования механических свойств МС.

В течение последнего десятилетия идут интенсивные исследования нового класса аморфных материалов – т. н. объемных аморфных материалов [17–19]. Их особенность состоит в том, что они, во-первых, легко аморфизируются, т. е. затвердевают в аморфном состоянии, при малых скоростях охлаждения расплава, а во-вторых, температура стеклования этих сплавов существенно ниже температуры их кристаллизации. Такие материалы можно получать в виде объемных аморфных заготовок. В переохлажденном жидком состоянии они показывают очень низкую вязкость и хорошую деформируемость. В этом смысле объемные аморфные заготовки можно вполне рассматривать в качестве нового типа конструкционных и функциональных материалов. Современное машиностроение предъявляет высокие требования к эксплуатационным характеристикам конструкционных материалов и сплавов с особыми физико-механическими свойствами. Исходя из сказанного исследование деформационных свойств МС является актуальной задачей физики неупорядоченных сред.

В связи с этим целью работы было исследование усталостных характеристик МС при испытаниях на растяжение и изгиб.

В работе проведены исследования усталостных характеристик аморфных металлических сплавов на основе Со и нанокристаллического сплава на основе Fe, полученных методом спиннингования. Материалом для проведения исследования были выбраны ленты аморфных металлических сплавов марок АМАГ-186 и АМАГ-180 на основе кобальта и нанокристаллического сплава АМАГ-200 на основе железа. Размер рабочей области образцов  $20 \times 3,5 \times 0,02$  мм. Усталостные испытания образцов проводили методами на растяжение и изгиб.

В первой части работы проводили испытания на растяжение на специально разработанном устройстве. Испытания проводили нагрузкой, изменяющейся от некоторого  $\max$  значения до  $\min$  во времени, в знакопостоянном цикле с частотой 2 Гц. В конструкции установки предусмотрено 5 комплектов упругих элементов с различными коэффициентами жесткости. Это обеспечивает создание переменных напряжений в интервалах: 1) (144–284) МПа; 2) (200–428) МПа; 3) (310–570) МПа; 4) (355–660) МПа; 5) (400–750) МПа. Для всех упругих элементов построены тарировочные графики, по которым через величину перемещения определяли напряжение в образце. Зависимость изменения напряжения в образце от времени имеет вид периодической функции.

Во второй части работы проводили испытания на изгиб на специально разработанном устройстве. Частота нагружения образца составляла 12 Гц. Величину напряжений, возникающих в образце, оценивали по формуле [20]:

$$\sigma = E \frac{y}{\rho},$$

где  $y$  – толщина образца;  $\rho$  – радиус кривизны изгиба образца,  $E$  – модуль Юнга материала образца.

В ходе экспериментов была построена зависимость величины разрушающих напряжений от логарифма числа циклов при усталостных испытаниях на растяжение, приведенная на рис. 1. Видно, что максимальное напряжение, при котором образцы не разрушаются при числе циклов  $\sim 6 \cdot 10^5$ , составляет 428 МПа. При росте усталостных трещин выявлены области зарождения трещины, ее роста, переходная зона и зона долома. Отмечено, что в зоне долома трещина может развиваться в нескольких плоскостях, количество ветвей возрастает по мере распространения трещины.

В области роста усталостной трещины по ее берегам наблюдали ветвистые полосы сдвига (рис. 2). Отмечено, что при снижении величины нагрузки увеличивается зона роста усталостной трещины.

В ходе работы были проведены фратографические исследования поверхности разрушения. В области зарождения трещины имеет место вязкое разрушение с образованием плотнорасположенных микроутяжек. Характерный размер таких утяжек  $\sim 0,5$ – $1,5$  мкм. При переходе к зоне усталостного роста на фоне вязкого разрушения появляются участки роста трещин, похожие на скол. В переходной зоне наблюдаются также участки образования более крупных деформационных структур и ячеек. Основная зона роста усталостной трещины развивается подобно сколу с образованием «венного узора» (рис. 3). Образование «венного узора» наблюдали в работе [21] при разрушении объемного сплава на основе циркония. При этом трещина может переходить из одной плоскости роста в другую – параллельную.

На поверхностях роста усталостной трещины наблюдаются характерные для такого вида разрушения ступени, соответствующие одноразовому скачкообразному подрастанию трещины. Характерная величина такого «скачка»  $0,2$ – $0,5$  мкм. Переход к зоне долома сопровождается переходом к вязкому разрушению с развитием трещин в параллельных плоскостях. В зоне долома трещина продвигается вязко, скачками, с образованием локализованных зон пластичности в местах остановки. Величина скачков  $\sim 5$ – $8$  мкм. «Венный узор» на

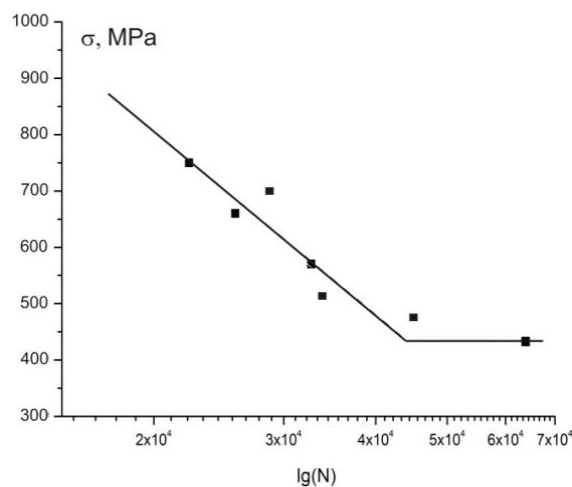
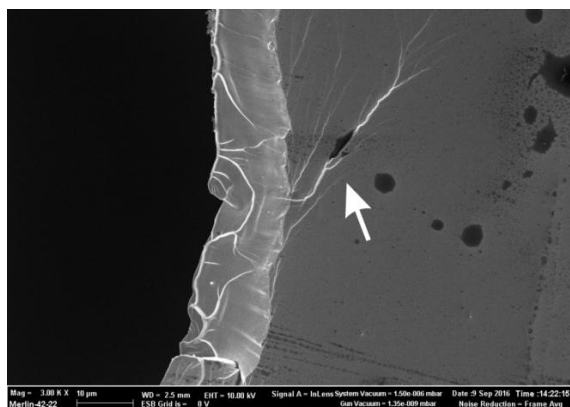
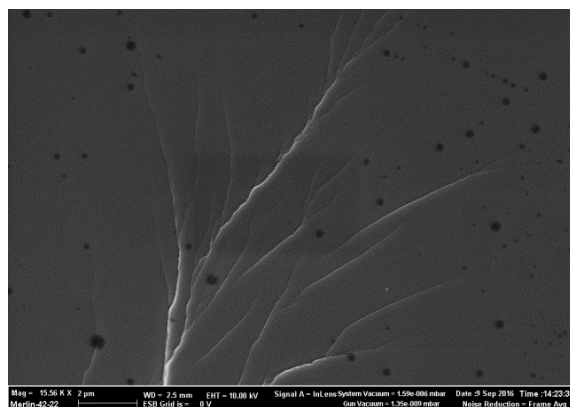


Рис. 1. Зависимость величины разрушающих напряжений от логарифма числа циклов при усталостных испытаниях на растяжение образцов сплав АМАГ-186



а)



б)

Рис. 2. а) полосы сдвига по берегам трещины (отмечено стрелкой); б) фрагмент ветвления полос сдвига

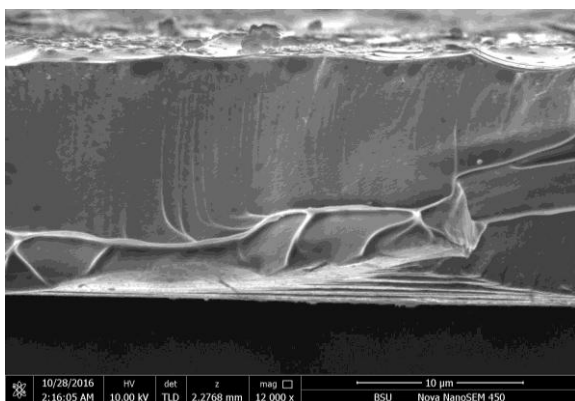


Рис. 3. Формирование «венного узора» на поверхности в зоне роста усталостной трещины

поверхностях разрушения наблюдается и при обычном разрушении растяжением, однако он слабо выражен.

В ходе работы было установлено, что образцы на основе кобальта, с различным его содержанием, демонстрируют практически одинаковые характеристики усталостной прочности.

Во второй части работы были проведены исследования усталостных свойств методом на изгиб. В ходе экспериментов была построена зависимость величины разрушающих напряжений от логарифма числа циклов, приведенная на рис. 4. Видно, что максимальное напряжение, при котором образцы не разрушаются при числе циклов  $\sim 6 \cdot 10^5$ , составляет 0,95 ГПа.

Зарождение трещин в этом случае носит хрупкий характер (рис. 5). Вблизи краев образца трещина может переходить в параллельные плоскости, тогда как в центре образца ее рост происходит по одной плоскости. В ходе работы были проведены фрактографические исследования поверхности разрушения и берегов роста трещины. В результате на поверхности разрушения были выявлены три зоны: 1 – зона образования трещины (поверхность разрушения гладкая, без видимых следов пластичности); 2 – зона усталостного роста, связанная с образованием деформационного рельефа с характерным размером блоков структуры  $\sim 0,5\text{--}1$  мкм; 3 – зона роста с развитием грубых пластических сдвигов (рис. 6).

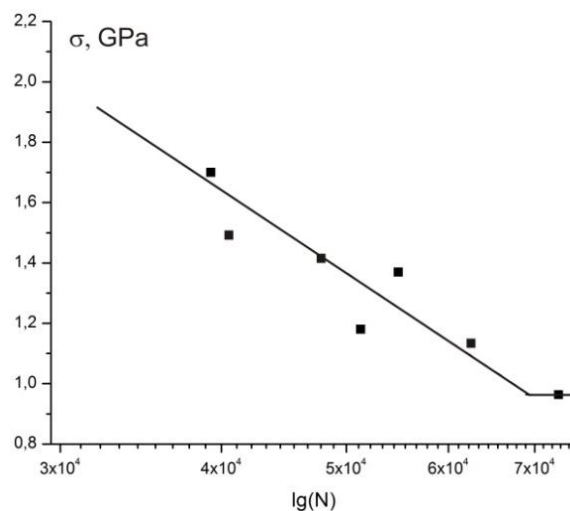
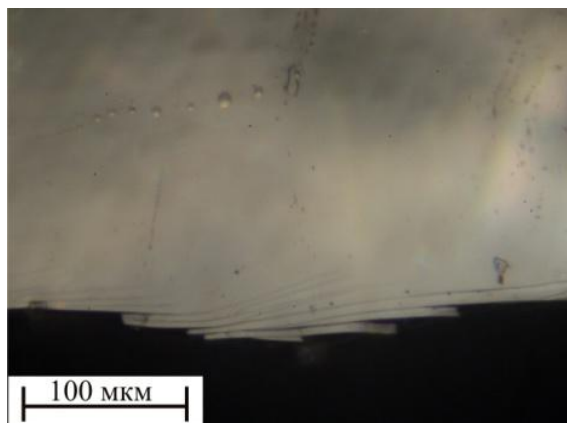


Рис. 4. Зависимость числа циклов нагружения, приводящих к разрушению образца от величины нагрузки. АМАГ-186

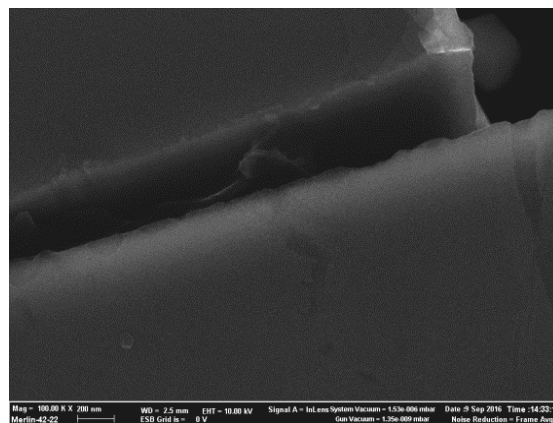
Трещина зарождается со стороны поверхности с растягивающими напряжениями в нескольких плоскостях. По характеру формирования деформационного рельефа и разрушения можно предположить зарождение интрузий и экструзий (рис. 5).

Было установлено, что трещины распространяются в нескольких плоскостях. Зарождение трещины происходит на интрузии. Вдоль траектории роста трещин наблюдаются сдвиги – экструзии. Ветвления трещин и сдвигов на берегах трещины при испытаниях на изгиб не наблюдали. «Венного узора» на поверхностях трещины также нет.

Таким образом, установлено, что общие закономерности усталостного разрушения образцов аморфного металлического сплава отличаются от закономерностей, характерных для кристаллических металлов. В частности, зарождения усталостной трещины в нескольких плоскостях при изгибе и образования «венного» узора на поверхностях в зоне роста усталостной трещины при растяжении. Число циклов, приводящих к разрушению при испытаниях на изгиб при равных напряжениях, значительно превышает число циклов, приводящих к разрушению при испытаниях на растяжение.



а)



б)

Рис. 5. Траектория роста усталостной трещины: а) вблизи края образца; б) фрагмент

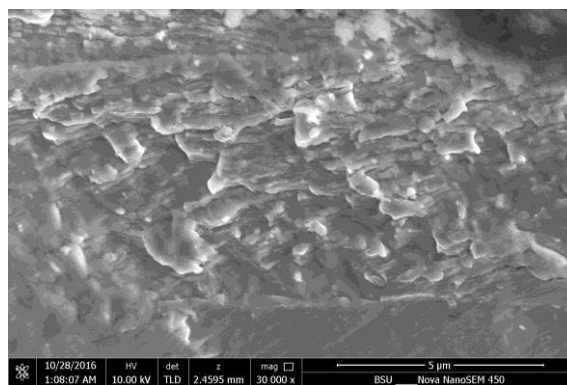
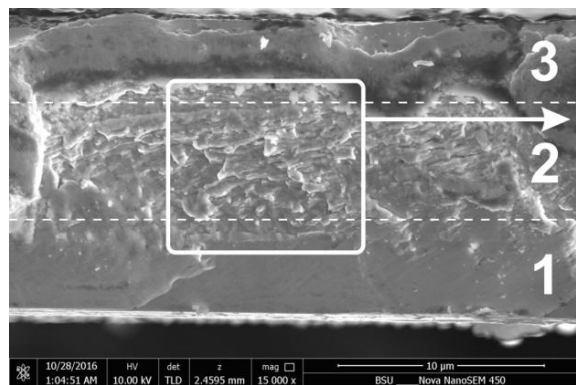


Рис. 6. Поверхность роста усталостной трещины при испытаниях на изгиб: 1 – зона зарождения трещины; 2 – зона усталостного роста; 3 – зона долома

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Stolyarov V.V. Electroplastic effect in nanocrystalline and amorphous alloys // *Materials Science and Technology*. 2015. V. 31. № 13. P. 1536-1540.
2. Yiu P., Hsueh C.H., Shek C.H. Electroplastic forming in a Fe-based metallic glass ribbon // *Journal of Alloys and Compounds*. 2016. № 658. P. 795-799.
3. Сузуки К., Фудзимори Х., Хасимото К. Аморфные металлы / под ред. Ц. Масумото. М.: Металлургия, 1987. 328 с.
4. Meagher P., O'Searbhaill E.D., James H.B., Browne D.J. Bulk Metallic Glasses for Implantable Medical Devices and Surgical Tools // *Adv. Mater.* 2016. № 28. P. 5755-5762.
5. Colea K.M., Kirkb D.W., Singha C.V., Thorpe S.J. Optimizing electrochemical micromachining parameters for Zr-based bulk metallic glass // *Journal of Manufacturing Processes*. 2017. V. 168. P. 012052-1-012052-6.
6. Аморфные металлические сплавы / под ред. Ф.Е. Люборского; пер. с англ. М.: Металлургия, 1987. 584 с.
7. Fedorov V.A., Yakovlev A.V., Pluzhnikova T.N., Shlikova A.A., Berezhner A.D. Influence of laser irradiation on change properties of bulk amorphous Zr-Pd metallic alloys // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017. V. 168. P. 012052-1-012052-6.
8. Nair B., Priyadarshini G. Process, structure, property and applications of metallic glasses // *Materials Science*. 2016. V. 3. № 3. P. 1022-1053.
9. Inoue A. Bulk Metallic Glasses: as Environmental Advanced Materials // *Readings in Social and Environmental Studies* sat. sci. tr. Togane City: The Faculty of Social and Environmental Studies, Josai International University, 2015. P. 44-58.
10. Бакай А.С. Радиационная повреждаемость аморфных и мелкокристаллических тел // Структура и радиационная повреждаемость конструкционных сталей / под ред. И.В. Горынина, А.М. Паршина. М.: Металлургия, 1996. 168 с.
11. Яковлев А.В., Плужникова Т.Н., Федотов Д.Ю., Березнер А.Д., Антониу Франсиску Домингуш Изменение магнитных свойств аморфных металлических сплавов, вызванное внешним воздей-

12. вием // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. Тамбов, 2016. Т. 21. Вып. 3. С. 1453-1455.
13. Алехин В.П., Хоник В.А. Структура и физические закономерности деформации аморфных сплавов. М.: Металлургия, 1992. 248 с.
14. Hirata A., Matsue K., Chen M. Structural Analysis of Metallic Glasses with Computational Homology // *Springer Briefs in the Mathematics of Materials*. 2016. V. 66. P. 37-46.
15. Hufnagel T.C., Schuh C.A., Falk M.L. Deformation of metallic glasses: Recent developments in theory, simulations, and experiments // *Acta Materialia*. 2016. P. 1-19.
16. Глезер А.М., Пермякова И.Е., Громов В.Е., Коваленко В.В. Механическое поведение аморфных сплавов. Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2006. 416 с.
17. Hansen M. Production and Characterization of a Zr-based Bulk Metallic Glass. Trondheim, 2013. 206 p.
18. Li T.H., Wong P.C., Chang S.F., Tsai P.H., Jang J.S.C., Huang J.C. Biocompatibility study on Ni-free Ti-based and Zr-based bulk metallic glasses // *Materials Science & Engineering C*. 2017. V. 75. P. 1-5.
19. Suryanarayana C., Inoue A. Bulk metallic glasses. L.: Taylor and Francis Group, 2011. 548 p.
20. Берлев А.Е., Ота М., Хоник В.А. Ползучесть массивного металлического стекла  $Zr_{52.5}Ti_{17.9}Ni_{14.6}Al_{10}$  // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. Тамбов, 2003. Т. 8. Вып. 4. С. 522-524.
21. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999.
22. Yunhu Zhu, Jie Fu, Chao Zheng, Zhong Ji Effect of laser shock peening without absorbent coating on the mechanical properties of Zr-based bulk metallic glass // *Optics & Laser Technology*. 2015. № 75. P. 157-163.

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-31-00432).

Поступила в редакцию 26 июля 2017 г.

Федотов Дмитрий Юрьевич, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация, ассистент кафедры теоретической и экспериментальной физики, e-mail: feodorov@tsu.tmb.ru

Федоров Виктор Александрович, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры теоретической и экспериментальной физики, заслуженный деятель науки Российской Федерации, e-mail: feodorov@tsu.tmb.ru

Яковлев Алексей Владимирович, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры педагогики и образовательных технологий, e-mail: DAK-83@mail.ru

Плужникова Татьяна Николаевна, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры теоретической и экспериментальной физики, e-mail: plushnik@mail.ru

Шлыкова Александра Александровна, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация, магистрант по направлению подготовки «Физика конденсированного состояния», кафедра теоретической и экспериментальной физики, e-mail: feodorov@tsu.tmb.ru

UDC 539.3

DOI: 10.20310/1810-0198-2017-22-5-1109-1114

## FATIGUE TESTING OF BENDED METALLIC GLASS ON STRETCHING AND CURVE

© D.Y. Fedotov, V.A. Fedorov, A.V. Yakovlev,  
T.N. Pluzhnikova, A.A. Shlikova

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

Characteristic features of growth of fatigue cracks on the basis of cobalt and nanocrystalline alloys iron are established. It is shown that in tensile tests in the region of fracture initiation, viscous destruction takes place with the formation of dense microtights. The characteristic size of such coils is  $\sim 0.5\text{--}1.5\ \mu\text{m}$ . Holders of crack growth, similar to chipping appear. In the transition zone, classes of formation of larger deformation structures and cells are also observed. The main zone of growth of the fatigue crack develops like a cleave with the formation of a "vintage pattern". It is determined that during the bend tests the nucleation of cracks is fragile. Near the edges of the sample, the crack can pass into parallel planes, whereas in the center of the sample its growth occurs along a single plane. The crack originates from the side of the surface with tensile stresses in several planes. By the nature of the formation of deformation relief and destruction, it is possible to assume the origin of intrusions and extrusions. It is established that the cracks propagate in several planes. The initiation of a crack occurs on the intrusion. Along the trajectory of crack growth there are shifts-extrusions. Branching of cracks and shifts on the crack edges during bend tests was not observed. There is also no "vein pattern" on the surfaces of the crack. It is noted that the number of cycles leading to failure in bending tests at equal stresses is significantly higher than the number of cycles leading to failure during tensile tests.

*Keywords:* deformation; fatigue; crack; stretching; bending; intrusion; extrusion

### REFERENCES

1. Stolyarov V.V. Electroplastic effect in nanocrystalline and amorphous alloys. *Materials Science and Technology*, 2015, vol. 31, no. 13, pp. 1536-1540.
2. Yiu P., Hsueh C.H., Shek C.H. Electroplastic forming in a Fe-based metallic glass ribbon. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, no. 658, pp. 795-799.
3. Suzuki K., Fudizimori Kh., Khasimoto K. *Amorfnye metally* [Amorphous Metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987, 328 p. (In Russian).
4. Meagher P., O'Cearbhaill E.D., James H.B., Browne D.J. Bulk metallic glasses for implantable medical devices and surgical tools. *Adv. Mater.*, 2016, no. 28, pp. 5755-5762.
5. Colea K.M., Kirkb D.W., Singha C.V., Thorpe S.J. Optimizing electrochemical micromachining parameters for Zr-based bulk metallic glass. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, no. 25, pp. 227-234.
6. Lyuborskiy F.E. (ed). *Amorfnye metallicheskie splavy* [Amorphous Metal Alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987, 584 p. (In Russian).
7. Fedorov V.A., Yakovlev A.V., Pluzhnikova T.N., Shlikova A.A., Berezner A.D. Influence of laser irradiation on change properties of bulk amorphous Zr-Pd metallic alloys. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 168, pp. 012052-1-012052-6.

8. Nair B., Priyadarshini G. Process, structure, property and applications of metallic glasses. *Materials Science*, 2016, vol. 3, no. 3, pp. 1022-1053.
9. Inoue A. *Bulk Metallic Glasses: as Environmental Advanced Materials*. Readings in Social and Environmental Studies sat. sci. tr. Togane City: The Faculty of Social and Environmental Studies, Josai International University, 2015. P. 44-58.
10. Bakay A.S. Radiatsionnaya povrezhdaemost' amorfnykh i melkokristallicheskih tel [Radiation damage rate of amorphous and metal crystalline bodies]. In: Gorynin I.V., Parshin A.M. (eds.). *Struktura i radiatsionnaya povrezhdaemost' konstruksionnykh staley* [Structure and radiation damage rate of construction steel]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1996, 168 p. (In Russian).
11. Yakovlev A.V., Pluzhnikova T.N., Fedotov D.Y., Berezner A.D., Domingush A.F. Izmenenie magnitnykh svoystv amorfnykh metallicheskih splavov, vyzvanoe vneshnim vozdeystviem [The magnetic properties of amorphous metal alloys due to external effects]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya Estestvennye i tekhnicheskie nauki – Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences*, 2016, vol. 21, no. 3, pp. 1453-1455. (In Russian).
12. Alekhin V.P., Khonik V.A. *Struktura i fizicheskie zakonomernosti deformatsii amorfnykh splavov* [Structure and physical regularities of amorphous alloys deformation]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1992, 248 p. (In Russian).
13. Hirata A., Matsue K., Chen M. Structural Analysis of Metallic Glasses with Computational Homology. *Springer Briefs in the Mathematics of Materials*, 2016, vol. 66, pp. 37-46.
14. Hufnagel T.C., Schuh C.A., Falk M.L. Deformation of metallic glasses: Recent developments in theory, simulations, and experiments. *Acta Materialia*, 2016, pp. 1-19.
15. Glezer A.M., Permyakova I.E., Gromov V.E., Kovalenko V.V. *Mekhanicheskoe povedenie amorfnykh splavov* [Automatic behaviour of amorphous alloys]. Novokuznetsk, Siberian State Industrial University Publ., 2006, 416 p. (In Russian).
16. Hansen M. *Production and Characterization of a Zr-based Bulk Metallic Glass*. Trondheim, 2013, 206 p.
17. Li T.H., Wong P.C., Chang S.F., Tsai P.H., Jang J.S.C., Huang J.C. Biocompatibility study on Ni-free Ti-based and Zr-based bulk metallic glasses. *Materials Science & Engineering C*, 2017, vol. 75, pp. 1-5.
18. Suryanarayana S., Inoue A. *Bulk Metallic Glasses*. London, Taylor and Francis Group, 2011, 548 p.
19. Berlev A.E., Ota M., Khonik V.A. Polzuchest' massivnogo metallicheskogo stekla  $Zr_{52.5}Ti_5Cu_{17.9}Ni_{14.6}Al_{10}$  [Creeping of massive metal glass  $Zr_{52.5}Ti_5Cu_{17.9}Ni_{14.6}Al_{10}$ ]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya Estestvennye i tekhnicheskie nauki – Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences*, 2003, vol. 8, no. 4, pp. 522-524. (In Russian).
20. Feodos'ev V.I. *Soprotivlenie materialov* [Strength of the Materials]. Moscow, Bauman Moscow State Technical University, 1999. (In Russian).
21. Yunhu Zhu, Jie Fu, Chao Zheng, Zhong Ji. Effect of laser shock peening without absorbent coating on the mechanical properties of Zr-based bulk metallic glass. *Optics & LaserTechnology*, 2015, no. 75, pp. 157-163.

ACKNOWLEDGEMENTS: The work is fulfilled under financial support of Russian Foundation for Basic Research (grant no. 16-31-00432)

Received 26 July 2017

Fedotov Dmitriy Yurevich, Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Tambov, Russian Federation, Assistant of Theoretical and Experimental Physics Department, e-mail: feodorov@tsu.tmb.ru

Fedorov Viktor Aleksandrovich, Tambov State University named after G. R. Derzhavin, Tambov, Russian Federation, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Professor of Theoretical and Experimental Physics Department, Honored Worker of Science of Russian Federation, e-mail: feodorov@tsu.tmb.ru

Yakovlev Aleksey Vladimirovich, Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Tambov, Russian Federation, Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Associate Professor of Methodology of Teaching Natural Sciences Department, e-mail: DAK-83@mail.ru

Pluzhnikova Tatyana Nikolaevna, Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Tambov, Russian Federation, Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Associate Professor of Theoretical and Experimental Physics Department, e-mail: plushnik@mail.ru

Shlikova Aleksandra Aleksandrovna, Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Tambov, Russian Federation, Master's Degree Student on Training Direction "Bulk State Physics", Theoretical and Experimental Physics Department, e-mail: feodorov@tsu.tmb.ru

**Для цитирования:** Федотов Д.Ю., Федоров В.А., Яковлев А.В., Плужникова Т.Н., Шлыкova А.А. Усталостные испытания ленточных металлических стекол на растяжение и изгиб // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. Тамбов, 2017. Т. 22. Вып. 5. С. 1109-1114. DOI: 10.20310/1810-0198-2017-22-5-1109-1114

**For citation:** Fedotov D.Y., Fedorov V.A., Yakovlev A.V., Pluzhnikova T.N., Shlikova A.A. Ustalostnye ispytaniya lentochnykh metallicheskih stekol na rastyazhenie i izgib [Fatigue testing of bended metallic glass on stretching and curve]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya Estestvennye i tekhnicheskie nauki – Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences*, 2017, vol. 22, no. 5, pp. 1109-1114. DOI: 10.20310/1810-0198-2017-22-5-1109-1114 (In Russian, Abstr. in Engl.).