

**ВЛИЯНИЕ АГРЕССИВНЫХ СРЕД И ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ
НА УСТАЛОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО СТЕКЛА**

© 2018

Д.Ю. Федотов, ассистент кафедры теоретической и экспериментальной физики*В.А. Федоров*, доктор физико-математических наук, профессор,

профессор кафедры теоретической и экспериментальной физики, заслуженный деятель науки РФ

А.В. Яковлев, кандидат физико-математических наук, доцент,

доцент кафедры педагогики и образовательных технологий

Т.Н. Плужникова, кандидат физико-математических наук, доцент,

доцент кафедры теоретической и экспериментальной физики

А.Д. Березнер, аспирант кафедры теоретической и экспериментальной физики*Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина, Тамбов (Россия)*

Ключевые слова: аморфные металлические сплавы; усталость; электроимпульсное воздействие; агрессивные среды.

Аннотация: Проведены усталостные испытания на растяжение ленточных образцов металлического стекла на грузкой, изменяющейся во времени от некоторого максимального значения до минимального, в знакопостоянном цикле с частотой 2 Гц. В конструкции установки предусмотрено 5 комплектов упругих элементов с различными коэффициентами жесткости. Для упругих элементов построены тарировочные графики, по которым через величину перемещения определяли напряжение в образце. Установлены характерные особенности развития усталостных трещин образцов аморфных сплавов на основе кобальта и нанокристаллического сплава на основе железа. Выявлена область зарождения усталостной трещины, ее роста и зона долома. Установлено, что в области зарождения трещины имеет место вязкое разрушение с образованием плотнорасположенных микроутяжек, в зоне роста усталостной трещины ее развитие происходит подобно сколу с образованием развитого «венного узора» и плотнорасположенных полос сдвига, формирующихся при остановках усталостной трещины. Величина скачка составляет 0,2–0,5 мкм. В зоне долома трещина продвигается вязко, скачками, с образованием локализованных зон пластичности в местах остановки. Для образцов построены кривые Веллера, определены пределы усталости.

Проведены исследования влияния агрессивных сред и предварительного воздействия импульсного электрического тока на усталостные свойства аморфных металлических сплавов. Установлено, что образцы после воздействия импульсного тока или агрессивной среды разрушаются при меньшем количестве циклов нагружения относительно исходных образцов. Отмечено, что содержание Со в исследуемых образцах практически не влияет на усталостные свойства.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из воздействий на материал является приложение к нему 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 том, что происходит с материалом при деформировании, является значимой. В настоящий момент имеется достаточно много данных о деформации кристаллических материалов. Данных о деформации аморфных тел значительно меньше [1–3], так как аморфное состояние твердого тела – наименее изученная область современного структурного материаловедения. Аморфные сплавы обладают набором уникальных свойств [4–6], одним из таких свойств является способность к пластическому течению [7; 8]. Эта способность связана с коллективизированным металлическим характером межатомной связи, при которой легче идут процессы коллективных перемещений [9]. Пластическая деформация в аморфных сплавах может протекать гомогенно или негомогенно [10]. 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 [11]. Изучение смены механизмов течения представляет собой слож-

ную экспериментальную задачу. Сведения об условиях изменения характера течения аморфных сплавов носят противоречивый характер. В работе [12] показано, что тип пластического течения, формирование его закономерностей определяется 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.

В течение последнего времени идут интенсивные исследования нового класса аморфных материалов – так называемых объемных аморфных материалов [13–15]. 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 [16; 17]. Такие материалы можно получать в виде объемных аморфных заготовок. В переохлажденном жидком состоянии они показывают очень низкую вязкость и хорошую деформируемость [18]. В этом смысле объемные аморфные заготовки вполне возможно рассматривать в качестве нового типа конструкционных и функциональных материалов.

Механические свойства аморфных металлических сплавов продолжают представлять большой интерес. Однако усталостные свойства металлических стекол до сих пор остаются малоизученными.

Цель работы – выявление основных закономерностей усталостного разрушения ленточных образцов аморфного металлического сплава и изучение влияния агрессивных сред и импульсного электрического воздействия на усталостные свойства аморфных металлических сплавов.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Материалом для проведения исследования были выбраны ленты аморфных металлических сплавов АМАГ-186 ($\text{Co}_{85,5}\text{Fe}_{2,27}\text{Si}_{5,15}\text{Mn}_{4,07}\text{B}_2\text{Cr}_1$), АМАГ-180 ($\text{Co}_{78,5}\text{Ni}_{4,73}\text{Fe}_4\text{Si}_{7,25}\text{Mn}_{1,88}\text{B}_2\text{Cr}_{1,5}$) и нанокристаллического сплава АМАГ-200 ($\text{Fe}_{80,22}\text{Si}_{8,25}\text{Cu}_{1,44}\text{Nb}_{10,09}$). Размер рабочей области образцов – $20 \times 3,5 \times 0,02$ мм.

Усталостные испытания образцов проводили на специально разработанной установке [19] растягивающей 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 (рис. 1).

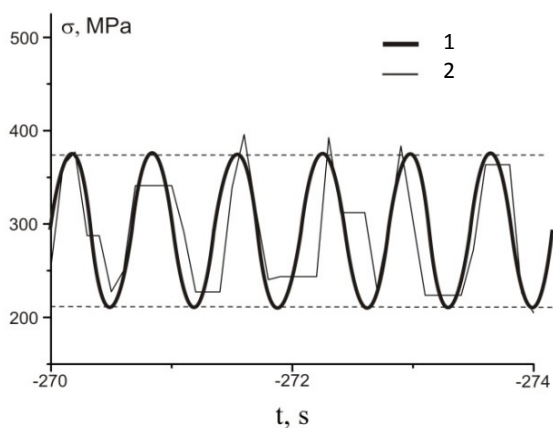


Рис. 1. Зависимость изменения напряжения от времени: 1 – усредненная циклическая нагрузка; 2 – нагрузка, фиксируемая датчиком

Для исследования влияния электроимпульсного воздействия на усталостные свойства перед испытаниями образцы под нагрузкой 500 МПа подвергли воздействию 10 импульсов электрического тока напряжением 100 В. Нагружение образцов производили на электро-механической машине для статических испытаний Instron-5565. Импульсы тока подавались путем разрядки конденсатора. Длительность импульсов ~5 мс, плотность тока, протекающего через образцы, $1 \cdot 10^8 \text{ А/м}^2$.

Изменение температуры образцов в момент пропуска импульса не превышало 20° . Время релаксации нагрева составляло 2 с.

Для исследования влияния воздействия агрессивной среды на усталостные характеристики металлических стекол образцы сплавов АМАГ-180, АМАГ-186, АМАГ-200 выдерживались в 1%-м растворе азотной кислоты, после чего подвергались усталостному растяжению в интервале нагрузок 400–750 МПа. Время выдержки образцов в растворе составляло от 10 до 45 минут.

Фрактографические исследования проводили на растровом электронном микроскопе Quanta 600. Металлографические исследования проводили на микроскопе ММР-2Р.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 2 приведена зависимость величины разрушающих напряжений от логарифма числа циклов при усталостных испытаниях на растяжение. Максимальное напряжение, при котором образцы не разрушаются при числе циклов $\sim 6 \times 10^5$, составляет 428 МПа.

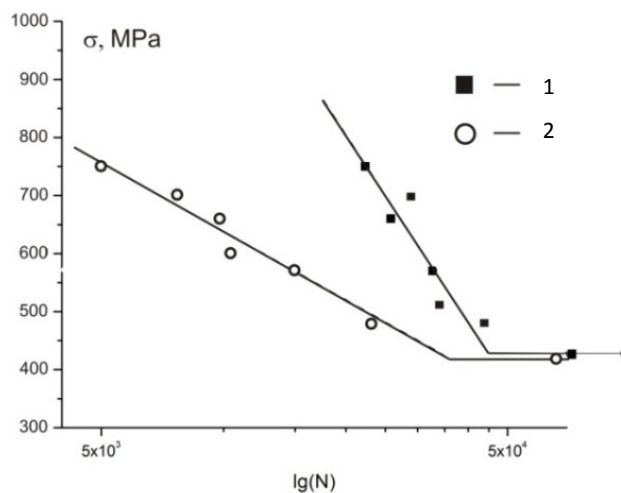


Рис. 2. Зависимость величины разрушающих напряжений от логарифма числа циклов при усталостных испытаниях на растяжение образцов сплава АМАГ-186: 1 – для образцов в исходном состоянии; 2 – для образцов, подвергнутых электроимпульсному воздействию

Проведены исследования влияния импульсного воздействия электрического тока на усталостные характеристики аморфного металлического сплава. На рис. 2 приведены зависимости для сплава АМАГ-186. Установлено, что образцы разрушаются при меньшем количестве циклов нагружения относительно исходных образцов. Нагружение до 428 МПа, при количестве циклов $\sim 6 \times 10^5$, к разрушению образца не приводит. Исследование структурного состояния образцов после электроимпульсного воздействия показало, что материал остается рентгеноаморфным. Снижение характеристик усталостной прочности можно объяснить начинающимися процессами структурной релаксации, переводящими аморфные сплавы в более равновесное состояние.

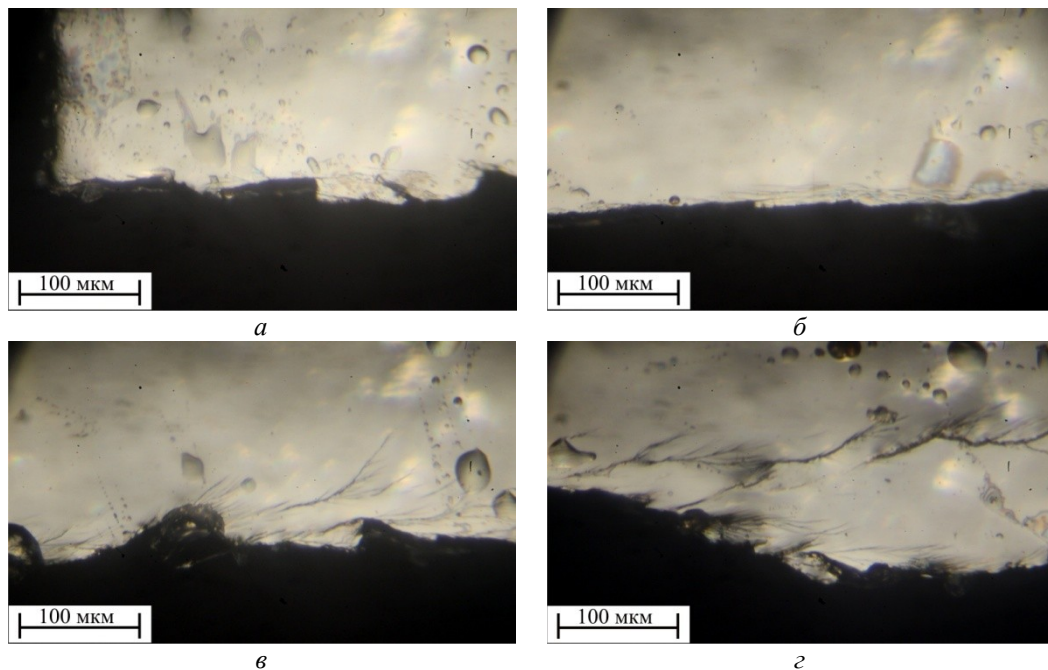


Рис. 3. Вид траектории роста усталостной трещины после разрушения образца со стороны перпендикулярной поверхности трещины: а – зарождение усталостной трещины; б – рост усталостной трещины; в – переход в зону долома; г – зона долома

Снятие закалочных напряжений повышает значение долговременной прочности.

При росте усталостных трещин выявлены области зарождения трещины (рис. 3 а), ее роста (рис. 3 б), переходная зона (рис. 3 в) и зона долома (рис. 3 г). Отмечено, в зоне долома рост трещина может развиваться в нескольких плоскостях (рис. 3 г), количество ветвей возрастает по мере распространения трещины. В области роста усталостной трещины, по ее берегам наблюдали ветвистые полосы сдвига. Отмечено, что при снижении величины нагрузки увеличивается зона роста усталостной трещины.

Проведены фрактографические исследования поверхности разрушения. В области зарождения трещины имеет место вязкое разрушение с образованием плотно-расположенных микроутяжек (рис. 4).

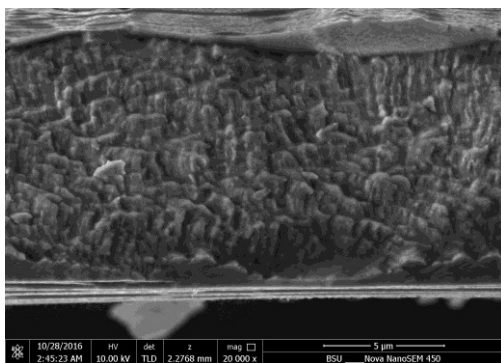


Рис. 4. Поверхность усталостного разрушения в зоне зарождения трещины

Характерный размер таких утяжек ~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. 5 а). Образование «венного узора» наблюдали в работе [20] при разрушении объемного сплава на основе циркония. При этом трещина может переходить из одной плоскости роста в другую – параллельную (рис. 5 б). На поверхностях роста усталостной трещины наблюдаются характерные для такого вида разрушения фрагменты, соответствующие одноразовому скачкообразному подрастанию трещины (рис. 6). 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 (рис. 7).

Были проведены исследования влияния воздействия агрессивной среды на усталостные характеристики металлических стекол. На рис. 8 приведены зависимости числа циклов усталостного нагружения от времени воздействия кислотной среды на образцы, приводящего к их разрушению.

При воздействии кислотной среды происходит образование на поверхности образцов солей $\text{Co}(\text{NO}_3)_2$ на АМАГ-180, АМАГ-186 и $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ на АМАГ-200. При этом происходит изменение сечения образцов, и действующее напряжение заметно превышает величину нагрузки, заданную в испытательной машине. Ее значения превышают усталостный предел прочности, что вызывает ускоренное разрушение образцов. Характерные

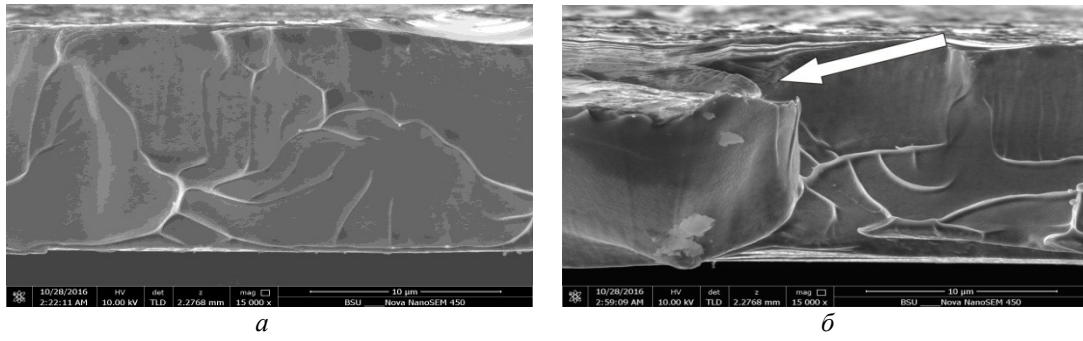


Рис. 5. Формирование «венного узора» на поверхности в зоне роста усталостной трещины. Стрелкой указана область перехода трещины в параллельную плоскость

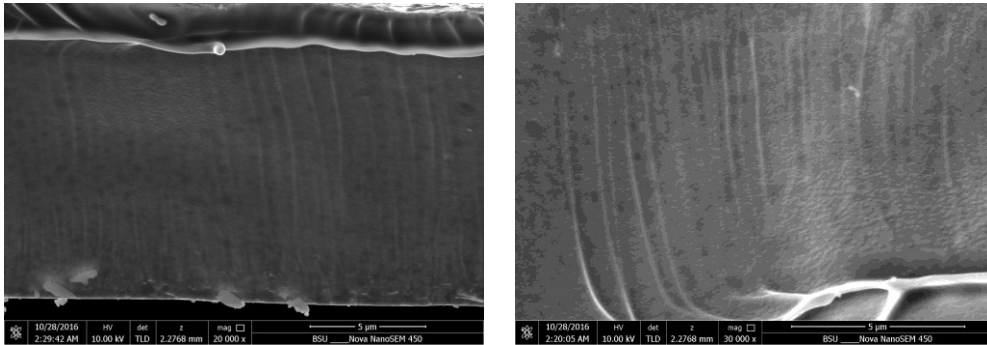


Рис. 6. Характерный рельеф на поверхности роста усталостной трещины

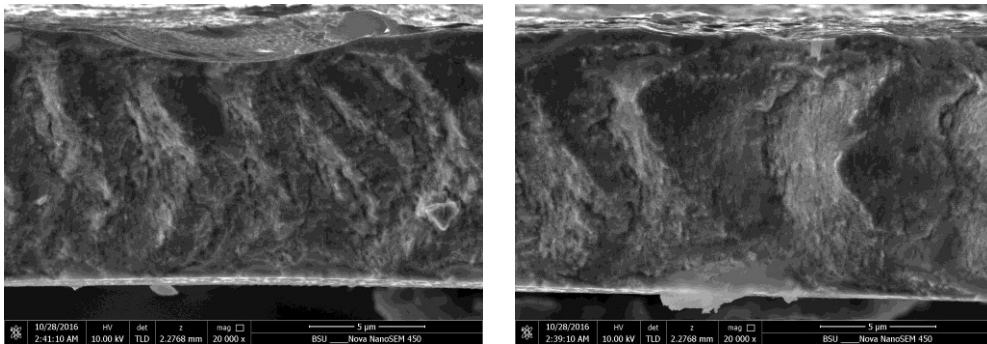


Рис. 7. Поверхность разрушения в зоне долома

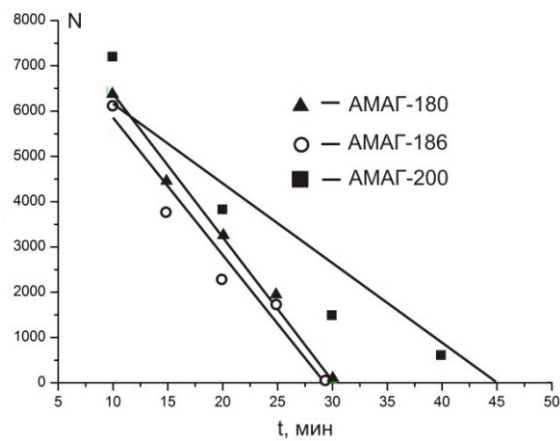


Рис. 8. Зависимость числа циклов нагружения, приводящих к разрушению, от времени воздействия на образцы 1%-го раствора HNO_3

особенности роста усталостных трещин в этом случае трудно проследить из-за пленки на поверхности образцов. Отмечено, что образцы на основе кобальта с различным его содержанием демонстрируют практически одинаковые характеристики усталостной прочности.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Установлено, что общие закономерности усталостного разрушения образцов аморфного металлического сплава совпадают с закономерностями, характерными для кристаллических металлов. Усталостная прочность образцов, подвергнутых предварительному воздействию импульсного электрического тока, снижается, при этом предел усталости остается прежним.

При воздействии на металлическое стекло кислотной среды на его поверхности образуются соли металлов, в результате чего меняется площадь сечения, что ускоряет усталостное разрушение образца.

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

Статья подготовлена по материалам докладов участников VIII Международной школы «Физическое материаловедение» с элементами научной школы для молодежи, Тольятти, 3–12 сентября 2017 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алехин В.П., Хоник В.А. Структура и физические закономерности деформации аморфных сплавов. М.: Металлургия, 1992. 248 с.
2. Судзуки К., Фудизимори Х., Хасимото К. Аморфные металлы. М.: Металлургия, 1987. 328 с.
3. Глезер А.М., Молотилов Б.В. Структура и механические свойства аморфных сплавов. М.: Металлургия, 1992. 208 с.
4. Аморфные металлические сплавы / под ред. Ф.Е. Люборского. М.: Металлургия, 1987. 584 с.
5. Манохин А.И., Митин Б.С., Васильев В.А., Ревякин А.В. Аморфные сплавы. М.: Металлургия, 1984. 160 с.
6. Металлические стекла / под ред. Дж.Дж. Гилмана, Х.Дж. Лими. М.: Металлургия, 1984. 264 с.
7. Nair B., Priyadarshini G. Process, structure, property and applications of metallic glasses // *Materials Science*. 2016. Vol. 3. № 3. P. 1022–1053.
8. Suryanarayana C., Inoue A. *Bulk metallic glasses*. USA: Taylor and Francis Group, 2011. 548 p.
9. Глезер А.М., Шурыгина Н.А. Аморфно-нанокристаллические сплавы. М.: Физматлит, 2013. 450 с.
10. Немошкаленко В.В., Романова А.В., Ильинский А.Г. Аморфные металлические сплавы. Киев: Наук. Думка, 1987. 248 с.
11. Глезер А.М., Плотникова М.Р., Сундеев Р.В., Шурыгина Н.А. Самоблокировка полос сдвига и делокализация пластического течения в аморфных сплавах при мегапластической деформации // *Известия РАН. Серия физическая*. 2013. Т. 77. № 11. С. 1687–1692.
12. Кобелев Н.П., Колыванов Е.Л., Хоник В.А. Нелинейные упругие характеристики объемных металлических стекол $Zr_{52.5}Ti_5Cu_{17.9}Ni_{14.6}Al_{10}$ и $Pd_{40}Cu_{30}Ni_{10}P_{20}$ // *Физика твердого тела*. 2005. Т. 47. № 3. С. 395–399.
13. Глезер А.М., Пермякова И.Е., Громов В.Е., Коваленко В.В. Механическое поведение аморфных сплавов. Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2006. 416 с.

14. Новые материалы / под ред. Ю.С. Карабасова. М.: МИСИС, 2002. 736 с.
15. Берлев А.Е., Ота М., Хоник В.А. Ползучесть массивного металлического стекла $Zr_{52.5}Ti_5Cu_{17.9}Ni_{14.6}Al_{10}$ // *Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки*. 2003. Т. 8. № 4. С. 522–524.
16. Зайцев А.И. Термодинамический подход к количественной оценке склонности металлических расплавов к аморфизации // *Металлы*. 2004. № 5. С. 64–78.
17. Ковнеристый Ю.К. Объемно-аморфизирующиеся металлические сплавы. М.: Наука, 1999. 80 с.
18. Смирнов О.М. Сверхпластичность нанокристаллических и аморфных материалов // *Перспективные материалы*. 2010. № 9. С. 228–241.
19. Федотов Д.Ю., Федоров В.А., Яковлев А.В., Плужникова Т.Н., Березнер А.Д. Усталостные испытания ленточных аморфных металлических сплавов на основе СО методами на растяжение и изгиб // *Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки*. 2016. Т. 21. № 3. С. 1396–1399.
20. Zhu Y., Fu J., Zheng C., Ji Z. Effect of laser shock peening without absorbent coating on the mechanical properties of Zr-based bulk metallic glass // *Optics and Laser Technology*. 2015. Vol. 75. P. 157–163.

REFERENCES

1. Alekhin V.P., Khonik V.A. *Struktura i fizicheskie zakonomernosti deformatsii amorfnykh splavov* [Structure and physical laws of deformation of amorphous alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1992. 248 p.
2. Sudzuki K., Fudizimori Kh., Khasimoto K. *Amorfnye metally* [Amorphous metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987. 328 p.
3. Glezer A.M., Molotilov B.V. *Struktura i mekhanicheskie svoystva amorfnykh splavov* [Structure and mechanical properties of amorphous alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1992. 208 p.
4. Loborsky A.E., ed. *Amorfnye metallicheskie splavy* [Amorphous metal alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987. 584 p.
5. Manokhin A.I., Mitin B.S., Vasilyev V.A., Revyakin A.V. *Amorfnye splavy* [Amorphous alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1984. 160 p.
6. Gilman J.J., Limi H.J. *Metallicheskie stekla* [Metallic glasses]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1984. 264 p.
7. Nair B., Priyadarshini G. Process, structure, property and applications of metallic glasses. *Materials Science*, 2016, vol. 3, no. 3, pp. 1022–1053.
8. Suryanarayana C., Inoue A. *Bulk metallic glasses*. Taylor and Francis Group, 2011. 548 p.
9. Glezer A.M., Shurygina N.A. *Amorfno-nanokristallicheskie splavy* [Amorphous-nanocrystalline alloys]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2013. 450 p.
10. Nemoshkalenko V.V., Romanova A.V., Ilyinsky A.G. *Amorfnye metallicheskie splavy* [Amorphous metal alloys]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1987. 248 p.
11. Glezer A.M., Plotnikova M.R., Sundeev R.V., Shurygina N.A. Self-blocking of shear bands and the delocalization of plastic flows in amorphous alloys upon megaplastic deformation. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2013, vol. 77, no. 11, pp. 1391–1396.

12. Kobelev N.P., Kolyvanov E.L., Khonik V.A. Nonlinear elastic characteristics of $Zr_{52.5}Ti_5Cu_{17.9}Ni_{14.6}Al_{10}$ and $Pd_{40}Cu_{30}Ni_{10}P_{20}$ bulk metallic glasses. *Physics of the solid state*, 2005, vol. 47, no. 3, pp. 405–410.
13. Glezer A.M., Permyakova I.E., Gromov V.E., Kovalenko V.V. *Mekhanicheskoe povedenie amorfnykh splavov* [The mechanical behavior of amorphous alloys]. Novokuznetsk, SibGIU Publ., 2006. 416 p.
14. Karabasov Yu.S., ed. *Novye materialy* [New materials]. Moscow, MISIS Publ., 2002. 736 p.
15. Berlev A.E., Ohta M., Khonik V.A. Creep of bulk $Zr_{52.5}Ti_5Cu_{17.9}Ni_{14.6}Al_{10}$ metallic glass. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2003, vol. 8, no. 4, pp. 522–524.
16. Zaitsev A.I. Thermodynamic approach to the quantitative estimation of the glass-forming ability of metallic melts. *Russian metallurgy (Metally)*, 2004, no. 5, pp. 460–471.
17. Kovneristy Yu.K. *Obyemno-amorfiziruyushchiesya metallicheskie splavy* [Volumetric amorphous metal alloys]. Moscow, Nauka Publ., 1999. 80 p.
18. Smirnov O.M. Superplasticity of nanocrystalline and amorphous materials. *Perspektivnye materialy*, 2010, no. 9, pp. 228–241.
19. Fedotov D.Yu., Fedorov V.A., Yakovlev A.V., Pluzhnikova T.N., Berezner A.D. Fatigue test on ribbon of amorphous metal alloys on Co methods tensile and flexural strength. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2016, vol. 21, no. 3, pp. 1396–1399.
20. Zhu Y., Fu J., Zheng C., Ji Z. Effect of laser shock peening without absorbent coating on the mechanical properties of Zr-based bulk metallic glass. *Optics and Laser Technology*, 2015, vol. 75, pp. 157–163.

THE INFLUENCE OF AGGRESSIVE ENVIRONMENT AND ELECRO-IMPULSE IMPACT ON FATIGUE CHARACTERISTICS OF METALLIC GLASS

© 2018

D.Yu. Fedotov, assistant of Chair of Theoretical and Experimental Physics
V.A. Fedorov, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor,
 professor of Chair of Theoretical and Experimental Physics, Honored master of sciences
A.V. Yakovlev, PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor,
 assistant professor of Chair of Pedagogy and Educational Technologies
T.N. Pluzhnikova, PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor,
 assistant professor of Chair of Theoretical and Experimental Physics
A.D. Berezner, postgraduate student of Chair of Theoretical and Experimental Physics
Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Tambov (Russia)

Keywords: amorphous metal alloys; fatigue; electro-impulse effect; aggressive environment.

Abstract: The authors carried out the fatigue tests for the tension of metallic glass tape samples by the load varying in time from some maximum value to minimum, in a constant-sign cycle with the frequency of 2 Hz. In the device construction, five sets of elastic elements with different stiffness coefficients are designed. For the elastic elements, the calibration graphs were constructed, according to which the stress in the sample was determined by the displacement value. Characteristic features of the development of fatigue cracks in the samples of cobalt-based amorphous alloys and iron-based nanocrystalline alloy were determined. The study determined the area of the fatigue crack nucleation, its growth and the break area. It is identified that the viscous destruction with the formation of densely spaced microtight takes place in the area of crack initiation, and in the area of the fatigue crack growth, its development similar to a cleavage with the formation of the developed “venous pattern” and the densely spaced shear bands formed when fatigue cracks stop occurs. The pop-in magnitude is 0.2–0.5 μm . In the break area, the crack propagates viscously, irregularly, with the formation of localized plasticity areas at the stops. For the samples, Weller curves are plotted and the fatigue limits are defined.

The authors carried out the investigations of the aggressive environments influence and the pulsed electric current preliminary impact on the fatigue properties of the amorphous metal alloys. It is determined that the samples, after the action of a pulsed current or an aggressive environment, are destroyed during fewer loading cycles relating to the initial samples. It is noted that the Co content in the samples under the study slightly influences the fatigue properties.