

УДК 539.3

DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-6-2152-2157

## ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ ОБЪЕМНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТЕКОЛ НА ОСНОВЕ ЦИРКОНИЯ И ПАЛЛАДИЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© В.А. Федоров, А.В. Яковлев, Т.Н. Плужникова,  
А.А. Шлыкова, П.М. Кузнецов, С.В. Васильева

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

Исследованы морфологические особенности зон воздействия лазерного излучения, формируемых на поверхности объемных металлических стекол. Методом наноиндентирования оценено изменение свойств сплавов, вызванное импульсным нагревом при облучении.

*Ключевые слова:* объемное металлическое стекло; лазерное излучение; зона воздействия; рельеф; нанотвердость; модуль Юнга; наноиндентирование

В течение последнего десятилетия идут интенсивные исследования [1–6] нового класса аморфных материалов – т. н. объемных аморфных металлических сплавов (АМС), или металлических стекол (МС). Среди объемных МС [7–8] особенный интерес представляют сплавы на основе Zr, т. к. они имеют очень широкую область переохлажденной жидкости, которая для ряда сплавов превышает 100 К. Эти сплавы интересны в связи с возможностью получения в них при термической обработке нанокристаллической структуры [9]. Сплавы на основе палладия обладают высокой стойкостью к повреждениям, сочетают твердость, присущую стеклам, с характерной для металлов устойчивостью к образованию трещин. Широкому применению этих стекол в технике мешает высокая стоимость палладия [10].

Комплексное исследование закономерностей эволюции структуры и механических свойств, объемных МС, подвергнутых термической обработке, является актуальным направлением прикладных и фундаментальных исследований. Оценка механических свойств МС в зонах локального воздействия, в частности, импульсов когерентного излучения, является практически значимой задачей в связи с тем, что лазерное излучение является одним из способов термической обработки.

Цель работы: установление механических свойств объемных МС на основе Pd и Zr, а также исследование морфологических особенностей зон, формируемых в результате воздействия лазерного излучения.

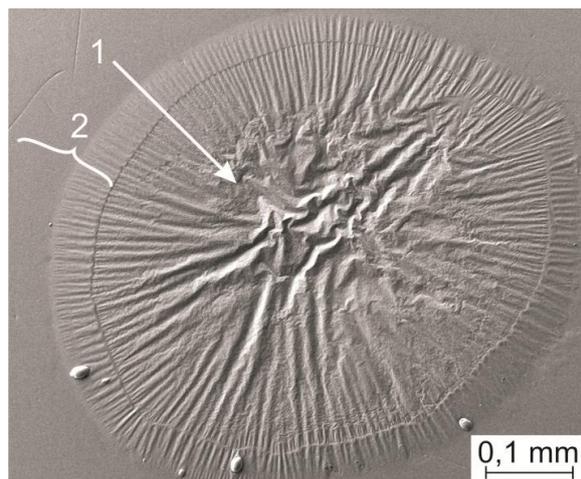
Исследования проводили на объемных МС на основе циркония и палладия. В экспериментах использовали образцы с размерами 2×5×4 мм системы Zr–Ti–Cu–Ni–Al (52,5% Zr) и системы Pd–Cu–Ni–P (40 % Pd).

В качестве источника лазерного излучения использовали установку «ЛТА-4-1» с активным элементом на основе иттрий-алюминиевого граната, легированного неодимом (Nd:YAG), с длиной волны излучения  $\lambda = 1064$  нм, позволяющей получать импульсы различ-

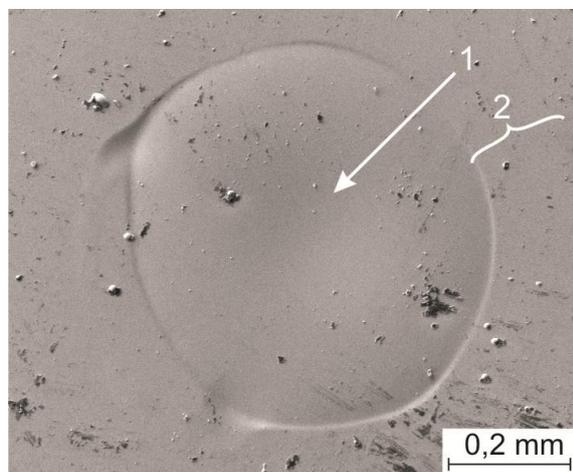
ных форм и энергий. Энергию и время воздействия лазерного импульса определяли при помощи измерителя энергии и мощности ИЭМ-4-1. Длительность импульсов ~ 2–4 мс. Использовали импульсы с энергией 0,6 Дж/мм<sup>2</sup>. Воздействие излучения на поверхность аморфных сплавов осуществляли в смеси аргона и воздуха. Рабочая поверхность образцов была приготовлена как металлографический шлиф. Изменение свойств материала после воздействия лазерного излучения определяли путем измерения нанотвердости на установке Nano Indenter G200 алмазным индентором Берковича с радиусом притупления вершины  $R = 20$  нм в режиме нагружения с постоянной скоростью относительной деформации  $0,1 \text{ с}^{-1}$ . Амплитуда (2 нм) и частота (45 Гц) гармонической составляющей нагрузки поддерживались постоянными. Морфологические особенности поверхностей и элементный состав исследовали на растровом ионно-электронном микроскопе Quanta 200 3D. В результате воздействия сфокусированного импульсного лазерного излучения на поверхности объемных МС формируются локальные зоны облученного материала (рис. 1), имеющие для каждого из образцов характерные морфологические особенности.

В объемных АМС на основе Zr зона воздействия представляет собой «розетку», состоящую из радиально растущих кристаллов, образовавшихся в центральной области оплавления.

Размеры зон воздействия изменяются в зависимости от энергии импульса и лежат в интервале от 0,4 до 0,6 мм. Выделяются зона оплавления и зона термического влияния. За границей зоны оплавления наблюдается кристаллизация, не связанная с расплавлением материала (рис. 1а). Температура поверхности в центре зоны воздействия излучения не ниже температуры плавления (~ 1855° С). Область, расположенная за границей оплавления, прогревается не ниже температуры кристаллизации, которая составляет, по данным ДСК исследований, 450° С.



а)



б)

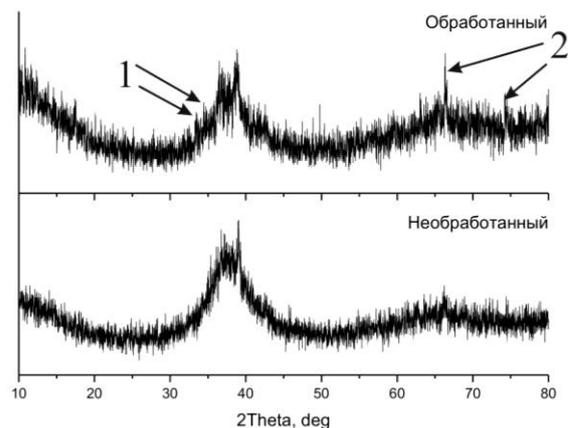
**Рис. 1.** Морфология зон воздействия лазерного излучения: а) МС на основе Zr; б) МС на основе Pd. 1 – зона оплавления; 2 – зона термического влияния

Рельеф, формируемый на поверхности, связан с объемным эффектом при кристаллизации. Это подтверждается дилатометрическими исследованиями. Проведенные дилатометрические исследования показали, что кристаллизация образца сплава на основе Zr происходит в две стадии. Объемный эффект, соответствующий второй стадии превращения, больше объемного эффекта на первой стадии. Полный объемный эффект кристаллизации составляет около 2 %, что является типичной величиной для кристаллизации металлических стекол [11].

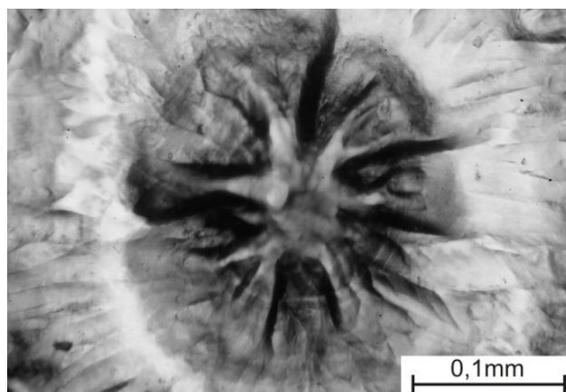
Наличие кристаллизации в зоне воздействия лазерного излучения наблюдали в работе [12] и подтверждено рентгенографическими исследованиями. Результаты исследований представлены на рис. 2.

Аналогичный вид кристаллизации наблюдается в зонах лазерного воздействия на монокристаллах циркония (рис. 3).

В центре области воздействия излучения в сплаве на основе Pd структурных изменений не наблюдается



**Рис. 2.** Дифрактограммы поверхности сплава на основе Zr: в зоне воздействия лазерного излучения – обработанный и на поверхности, не подверженной воздействию, – необработанный. Стрелками 1 показаны пики, связанные с кристаллизацией, 2 – пики, связанные с образованием окислов циркония



**Рис. 3.** Морфология зоны воздействия лазерного излучения в монокристалле Zr

(рис. 1б). Зона воздействия представляет собой вид «лунного кратера». Зона термического влияния металлографически не выявляется. При увеличении количества импульсов в сплавах на основе Zr наблюдается рост кристаллов, в сплаве на основе Pd зона воздействия практически не изменяется.

В разных точках зон воздействия излучения был определен элементный состав, который показывает, что в центре зоны воздействия в сплаве на основе Zr увеличивается содержание кислорода ~ в 4 раза в сравнении с исходным материалом. В сплавах на основе Pd изменение элементного состава практически не происходит.

Для исследования механических свойств в зоне воздействия лазерного излучения, образующейся на поверхности объемных МС, в сравнении со свойствами поверхности, находящейся в исходном состоянии, был использован метод наноиндентирования.

В результате была получена диаграмма  $P-h$  для сплава на основе Zr до облучения. На диаграмме можно выделить ряд характерных участков: монотонного роста  $h$  с увеличением нагрузки и ползучести. Диаграмма, полученная внутри зоны воздействия излучения,

Механические характеристики сплавов в зонах воздействия и в исходном состоянии

Сплав		$H$ , ГПа	$E$ , ГПа	$\frac{H_{out}}{H_{in}}$	$\frac{E_{out}}{E_{in}}$
МС на основе Zr	Внутри зоны воздействия	$4,3 \pm 0,5$	$90,2 \pm 5$	1,8	1,08
	Исходный материал	$7,8 \pm 0,5$	$98 \pm 5$		
МС на основе Pd	Внутри зоны воздействия	6	96,5	1,1	1,05
	Исходный материал	6,7	101		

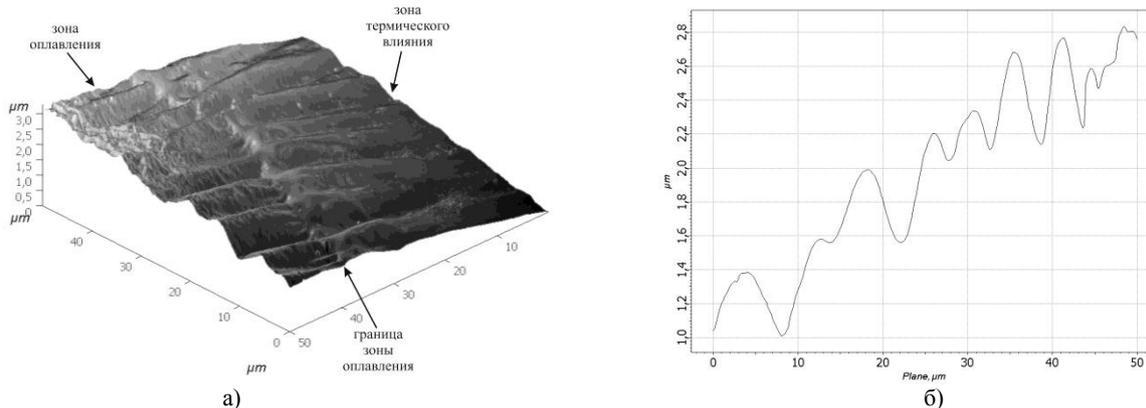


Рис. 4. Кристаллизация на поверхности зоны термического влияния (а) и ее профилограмма в направлении, поперечном к направлению роста кристаллов (б)

ния, отличается от  $P-h$  диаграммы для исходного материала как по величине  $P$ , так и по  $h$ . Кроме того, в локальных участках зоны облучения имеют место диаграммы  $P-h$ , сопровождающиеся скачками деформации при вдавливании индентора. Значения  $P$  и  $h$  при этом близки к значениям  $P$  и  $h$  исходного материала.

В ходе экспериментов были получены диаграммы  $P-h$  для сплава на основе Pd внутри зоны и за ее пределами, которые практически подобны. Можно также выделить ряд характерных участков: монотонного роста  $h$  с увеличением нагрузки, скачкообразного приращения  $h$ .

По результатам экспериментов для исследуемых сплавов были рассчитаны нанотвердость ( $H$ ) и модуль Юнга ( $E$ ) внутри зоны и в исходном состоянии (табл. 1).

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты можно интерпретировать следующим образом.

В сплаве на основе Zr изменение нанотвердости и модуля Юнга связано со структурным превращением металлическое стекло  $\rightarrow$  ГПУ кристалл. Рост ГПУ кристаллов Zr идет преимущественно вдоль оси  $c$ , которая ориентирована параллельно плоскости наблюдения. В связи с этим деформация кристаллов осуществляется по плоскости базиса (0001) – плоскости легкого скольжения. Этим могут быть обусловлены пониженные значения нанотвердости и модуля Юнга. Согласно данным об элементном составе сплава на основе Zr в зоне воздействия увеличивается содержание кислорода, с которым цирконий активно реагирует, образуя

труднорастворимые окислы, последние выступают в роли центров кристаллизации и являются причиной роста кристаллов в зоне термического влияния.

Исследования зоны воздействия лазерного излучения, проведенные с помощью зондового микроскопа (рис. 4), позволили определить линейную плотность центров кристаллизации вдоль границы оплавления, которая лежит в пределах от 900 до 2100  $\text{см}^{-1}$ .

Одна из полученных диаграмм  $P-h$  соответствует включению  $ZrO_2$ , что подтверждает его наличие внутри зоны воздействия излучения.

Наблюдаемые скачки деформации на диаграмме связаны с образованием микротрещин. Значения модуля Юнга и нанотвердости, рассчитанные для этой диаграммы, близки к соответствующим значениям циркониевой керамики [13].

В сплаве на основе палладия в зоне воздействия лазерного излучения идут процессы вторичного стеклования. Это обусловлено высокими значениями коэффициента вязкости сплава на основе Pd и коэффициента теплопроводности [14]. Первый затрудняет рост кристаллов, второй – обеспечивает быстрое рассеяние тепловой энергии в образце. Снижение характеристик  $E$  и  $H$  на 5 и 10 % соответственно может быть связано с уменьшением исходных закалочных напряжений в зоне воздействия излучения.

Таким образом, установлено, что вследствие действия лазерного импульса, приводящего к локальному нагреву материала, имеет место изменение механических характеристик в зоне воздействия. Вид зон воздействия излучения в этих случаях различен, что обусловлено различием тепловых свойств материалов. В центре зоны воздействия на поверхности сплава на

основе циркония идет направленная кристаллизация, кристаллы растут от центра к периферии, зона воздействия на поверхности сплава на основе палладия представляет собой вид «лунного кратера», отсутствует зона термического влияния, что обусловлено высокой вязкостью сплава, препятствующей процессам кристаллизации. Морфология зон воздействия на поверхности циркониевого сплава зависит от формы и количества импульсов лазерного воздействия. Рельеф, формируемый в результате лазерного воздействия на поверхности палладиевого сплава, от формы и количества лазерных импульсов не зависит.

Методом нанондентирования показано, что в зоне воздействия лазерного излучения происходит изменение величин нанотвердости и модуля упругости объемных МС на основе циркония и палладия по сравнению с исходным материалом. В сплаве на основе Zr уменьшение нанотвердости и модуля Юнга связано со структурным превращением металлическое стекло → ГПУ кристалл. В сплаве на основе палладия это уменьшение связано с процессами вторичного стеклования, идущими на поверхности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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. Тамбов, 2003. Т. 8. Вып. 4. С. 522-524.
2. 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  $Pd_{40}Cu_{30}Ni_{10}P_{20}$  // ФТТ. 2005. Т. 47. № 3. С. 395-399.
3. Кобелев Н.П., Колыванов Е.Л., Хоник В.А. Временные и амплитудные зависимости затухания и модуля сдвига при необратимой структурной релаксации объемного металлического стекла  $Zr-Cu-Ni-Al-Ti$  // ФТТ. 2005. Т. 47. Вып. 3. С. 400-403.
4. Федоров В.А., Яковлев А.В., Плужникова Т.Н., Капустин А.Н. Влияние лазерного воздействия на механические свойства объемных и ленточных сплавов // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2009. Т. 6. № 2. С. 87-91.
5. Яковлев А.В., Чернова И.В., Федоров В.А., Барышев Г.А. Влияние лазерного излучения на механические свойства объемных аморф-

- ных металлических сплавов // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. Тамбов, 2009. Т. 14. Вып. 1. С. 211-213.
6. Яковлев А.В., Плужникова Т.Н., Черемисина Ю.В., Федоров В.А., Тарасова И.Д. Исследование тепловых свойств ленточных и объемных металлических стекол // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. Тамбов, 2010. Т. 15. Вып. 3. С. 1105-1107.
  7. Ковнеристый Ю.К. Объемно-аморфизирующиеся металлические сплавы. М.: Наука, 1999. 80 с.
  8. Глезер А.М., Пермякова И.Е., Громов В.Е., Коваленко В.В. Механическое поведение аморфных сплавов. Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2006. 416 с.
  9. Абросимова Г.Е., Аронин А.С., Матвеев Д.В., Молоканов В.В. Образование и структура нанокристаллов в массивном металлическом стекле  $Zr_{50}Ti_{16}Cu_{15}Ni_{19}$  // ФТТ. 2004. Т. 46. Вып. 12. С. 2119-2123.
  10. Demetriou M.D., Launey M.E., Garrett G., Schramm J.P., Hofmann D.C., Johnson W.L., Ritchie R.O. A damage-tolerant glass // Nature Materials. 2011. doi:10.1038/nmat2930.
  11. Бакай А.С., Бакай С.А., Михайловский И.М., Неклюдов И.М., Стоев П.И., Махт М.П. О природе эффекта Кайзера в металлических стеклах // Письма в ЖЭТФ. Т. 76. Вып. 4. С. 254-257.
  12. Hongking Sun, Katharine M. Flores. Spherulitic crystallization mechanism of a Zr-based bulk metallic glass during laser processing // Intermetallics. 2013. V. 43. P. 53-59.
  13. Рутман Д.С., Торопов Ю.С., Плинер С.Ю., Неуймин А.Д., Полежаев Ю.М. Высокоогнеупорные материалы из диоксида циркония. М.: Металлургия, 1985. 136 с.
  14. Таблицы физических величин. Справочник / под ред. И.К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.

#### БЛАГОДАРНОСТИ:

1. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 15-42-03206).
2. Образцы МС предоставлены профессором В.А. Хоником.
3. Исследования проведены с использованием оборудования Центра коллективного пользования научным оборудованием БелГУ «Диагностика структуры и свойств наноматериалов» и учебно-инновационного центра «Нанотехнологии и наноматериалы» ТГУ им. Г.Р. Державина.

Поступила в редакцию 24 мая 2016 г.

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, 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 методики преподавания естественнонаучных дисциплин, 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: pluzhnik@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

Кузнецов Петр Михайлович, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация, кандидат физико-математических наук, ассистент кафедры теоретической и экспериментальной физики, e-mail: kuznetsovpm@list.ru

Васильева Светлана Васильевна, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация, зав. лабораторией кафедры теоретической и экспериментальной физики, e-mail: feodorov@tsu.tmb.ru

UDC 539.3

DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-6-2152-2157

## CHANGE OF PROPERTIES IN BULK METALLIC GLASSES BASED ON ZIRCONIUM AND PALLADIUM UNDER INFLUENCE OF LASER IRRADIATION

© V.A. Fedorov, A.V. Yakovlev, T.N. Pluzhnikova,  
A.A. Shlikova, P.M. Kuznetsov, S.V. Vasileva

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

The study examined morphological characteristics of zones of laser irradiation formed on the surface of bulk metallic glasses. The method of nanoindentation is estimated to change the properties of alloys caused by pulse heating under irradiation.

*Key words:* bulk metallic glass; laser irradiation; treatment area; topography; nanohardness; Young's modulus; nanoindentation

### REFERENCES

- Berlev A.E., Ota M., Khonik V.A. Polzuchest' massivnogo metallicheskogo stekla  $Zr_{52,5}Ti_5Cu_{17,9}Ni_{14,6}Al_{10}$  [Creep of bulk  $Zr_{52,5}Ti_5Cu_{17,9}Ni_{14,6}Al_{10}$  metallic glass below the glass transition temperature have been presented]. *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).
- Kobelev N.P., Kolyvanov E.L., Khonik V.A. Nelineynye uprugie kharakteristiki ob'emnykh metallicheskiikh stekol  $Zr_{52,5}Ti_5Cu_{17,9}Ni_{14,6}Al_{10}$  i  $Rd_{40}Cu_{30}Ni_{10}P_{20}$  [Nonlinear elastic characteristics of volumetric metallic glasses  $Zr_{52,5}Ti_5Cu_{17,9}Ni_{14,6}Al_{10}$  and  $Pd_{40}Cu_{30}Ni_{10}P_{20}$ ]. *Fizika tverdogo tela – Physics of the Solid State*, 2005, vol. 47, no. 3, pp. 395-399. (In Russian).
- Kobelev N.P., Kolyvanov E.L., Khonik V.A. Vremennye i amplitudnye zavisimosti zatukhaniya i modulya sdviga pri neobratimoy strukturnoy relaksatsii ob'emnogo metallicheskogo stekla Zr-Cu-Ni-Al-Ti [Temporary and amplitude characteristic curve of dissipation and shear modulus at inconvertible structure relaxation of volumetric metallic glass Zr-Cu-Ni-Al-Ti]. *Fizika tverdogo tela – Physics of the Solid State*, 2005, vol. 47, no. 3, pp. 400-403. (In Russian).
- Fedorov V.A., Yakovlev A.V., Pluzhnikova T.N., Kapustin A.N. Vliyanie lazernogo vozdeystviya na mekhanicheskie svoystva ob'emnykh i lentochnykh splavov [Influence of laser irradiation on mechanic properties of volumetric and stripe alloys]. *Fundamental'nye problemy sovremenno materialovedeniya – Basic Problems of Material Science*, 2009, vol. 6, no. 2, pp. 87-91. (In Russian).
- Yakovlev A.V., Chernova I.V., Fedorov V.A., Baryshev G.A. Vliyanie lazernogo izlucheniya na mekhanicheskie svoystva ob'emnykh amorfnykh metallicheskiikh splavov [Influence of laser radiation on mechanical properties of volumetric amorphous metal alloys]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya Estestvennye i tekhnicheskie nauki – Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences*, 2009, vol. 14, no. 1, pp. 211-213. (In Russian).
- Yakovlev A.V., Pluzhnikova T.N., Cheremisina Yu.V., Fedorov V.A., Tarasova I.D. Issledovanie teplovykh svoystv lentochnykh i ob'emnykh metallicheskiikh stekol [The research of thermal properties of tape and volumetric metallic glasses]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya Estestvennye i tekhnicheskie nauki – Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences*, 2010, vol. 15, no. 3, pp. 1105-1107. (In Russian).
- Kovneristy Yu.K. *Ob'emno-amorfizuyushchiesya metallicheskie splavy* [Volumetric-amorphized metallic alloys]. Moscow, Nauka Publ., 1999. 80 p. (In Russian).
- 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).
- Abrosimova G.E., Aronin A.S., Matveev D.V., Molokanov V.V. Obrazovanie i struktura nanokristallov v massivnom metallicheskom stekle  $Zr_{50}Ti_{16}Cu_{15}Ni_{19}$  [Formation and structure of nanocrystals in massive metallic glass  $Zr_{50}Ti_{16}Cu_{15}Ni_{19}$ ]. *Fizika tverdogo tela – Physics of the Solid State*, 2004, vol. 46, no. 12, pp. 2119-2123. (In Russian).
- Demetriou M.D., Launey M.E., Garrett G., Schramm J.P., Hofmann D.C., Johnson W.L., Ritchie R.O. A damage-tolerant glass. *Nature Materials*, 2011. doi:10.1038/nmat2930.
- Bakay A.S., Bakay S.A., Mikhaylovskiy I.M., Neklyudov I.M., Stoev P.I., Makht M.P. O prirode efekta Kayzera v metallicheskiikh steklakh [About the nature of Kaiser effect in metallic glasses]. *Pis'ma v Zhurnal jeksperimental'noj i teoreticheskoy fiziki – JETP Letters*, vol. 76, no. 4, pp. 254-257. (In Russian).
- Hongking Sun, Katharine M. Flores. Sperulitic crystallization mechanism of a Zr-based bulk metallic glass during laser processing. *Intermetallics*, 2013, vol. 43, pp. 53-59.
- Rutman D.S., Toropov Yu.S., Pliner S.Yu., Neuymin A.D., Polezhaev Yu.M. *Vysokoogneupornye materialy iz dioksida tsirkoniya*. [High-refractory materials of zirconium dioxide]. Moscow, Metallurgy Publ., 1985. 136 p. (In Russian).

14. *Tablitsy fizicheskikh velichin. Spravochnik* [Physical quantities tables. A guide book], ed. I.K. Kikoin. Moscow, Atomizdat Publ., 1976. 1008 p. (In Russian).

**GRATITUDE:**

1. The work is fulfilled under financial support of RFFR (grant no. 15-42-03206).
2. The specimens of metallic glasses are provided by professor V.A. Khonik.
3. The research is carried out with the use of equipment of Collective Use Centre of Scientific Equipment of Belgorod State University "Structure diagnosis and nanometrials properties" and educational-innovative centre "nanotechnologies and nanomaterials" of Tambov State University named after G.R. Derzhavin.

Received 24 May 2016

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, 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: pluzhnik@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

Kuznetsov Petr Mikhaylovich, Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Tambov, Russian Federation, Candidate of Physics and Mathematics, Assistant of Theoretical and Experimental Physics Department, e-mail: kuznetsovpm@list.ru

Vasileva Svetlana Vasilevna, Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Tambov, Russian Federation, Head of Theoretical and Experimental Physics Laboratory, e-mail: feodorov@tsutmb.ru

**Информация для цитирования:**

*Федоров В.А., Яковлев А.В., Плужникова Т.Н., Шлыкова А.А., Кузнецов П.М., Васильева С.В.* Изменение свойств объемных металлических стекол на основе циркония и палладия под действием лазерного излучения // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. Тамбов, 2016. Т. 21. Вып. 6. С. 2152-2157. DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-6-2152-2157

Fedorov V.A., Yakovlev A.V., Pluzhnikova T.N., Shlikova A.A., Kuznetsov P.M., Vasileva S.V. *Izmenenie svoystv ob'emnykh metallicheskih stekol na osnove tsirkoniya i palladiya pod deystviem lazernogo izlucheniya* [Change of properties in bulk metallic glasses based on zirconium and palladium under influence of laser irradiation]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya Estestvennye i tekhnicheskie nauki – Tambov University Review. Series: Natural and Technical Sciences*, 2016, vol. 21, no. 6, pp. 2152-2157. DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-6-2152-2157 (In Russian).