

Научная статья

УДК 669.2

Влияние добавки железа на прохождение фазового расслоения  
в аморфных сплавах системы Zr–Cu–Al (–Fe)  
под действием термо- и деформационной обработок

**Марк Сергеевич Пархоменко<sup>1</sup>, Андрей Игоревич Базлов<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup> Национальный исследовательский технологический  
университет «МИСиС», Москва, Россия

<sup>1</sup> parkhomenko.m@misis.ru

**Аннотация.** В работе проанализировано влияние добавки железа в аморфные металлические сплавы системы Zr–Cu–Al (–Fe) на процесс фазового расслоения при термомеханической обработке. Сплавы были получены методом сверхбыстрой закалки на вращающийся медный диск. Показано, что добавка железа вызывает образование наноструктурированных областей химической неоднородности после холодной прокатки и отжига ниже температуры расстеклования.

**Ключевые слова:** аморфные металлы, деформация, термомеханическая обработка, фазовое расслоение, цирконий, железо

Original article

Influence of Iron Addition on the Passage of Phase Separation  
in Amorphous Alloys of the Zr–Cu–Al (–Fe) System  
under the Action of Thermal and Deformation Treatments

**Mark S. Parkhomenko<sup>1</sup>, Andrey I. Bazlov<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup> National Research Technological University “MISIS”, Moscow, Russia

<sup>1</sup> parkhomenko.m@misis.ru

**Abstract.** The study analyzes the effect of the addition of iron in the Zr–Cu–Al (–Fe) system metallic glassy alloys on the phase separation process during thermo-mechanical treatment. Alloys obtained by ultrafast hardening on a rotating copper disk. The addition of Fe causes formation of nanostructured regions of chemical inhomogeneity after cold rolling and annealing below the glass transition temperature.

**Keywords:** amorphous metals, deformation, thermomechanical treatment, phase separation, zirconium, iron

Аморфные сплавы обладают широким спектром уникальных особенностей, которые открывают для них почти безграничные возможности применения [1–3]. Однако данная группа сплавов имеет один существенный недостаток, который оказывает негативное влияние на эксплуатационные свойства, — почти полное отсутствие пластичности. Благодаря низким значениям пластичности изделие из аморфного сплава может разрушиться во время эксплуатации даже под действием незначительных нагрузок. Низкая пластичность аморфных металлов приводит к повышенной хрупкости, пониженной вязкости разрушения (как сопротивление распространению трещин) и пониженной ударной вязкости (как сопротивление динамическим нагрузкам). Эта проблема существенно ограничивает возможные области применения данных сплавов в качестве конструкционных материалов и над ее решением работают множество научных коллективов со всего мира, о чем свидетельствует большое количество статей в актуальных научных журналах [4–6]. Комбинация методов термической и механической обработок, а также добавление Fe в систему Zr–Cu–Al, вызывающую дисперсное расслоение в аморфной фазе, может существенно повысить пластичность данных сплавов за счет увеличения объемной доли полос сдвига, а также затруднение их распространения дисперсными наноразмерными выделениями.

В работе исследовались сплавы настоящих составов:  $Zr_{45}Cu_{45}Al_{10}$ ,  $Zr_{55}Cu_{35}Al_{10}$ ,  $Zr_{65}Cu_{25}Al_{10}$ ,  $Zr_{42,5}Cu_{42,5}Al_{10}Fe_5$ ,  $Zr_{52,5}Cu_{32,5}Al_{10}Fe_5$ ,  $Zr_{62,5}Cu_{22,5}Al_{10}Fe_5$ .

Плавка проходила в вакуумной аргонодуговой печи в атмосфере аргона чистотой 99,9995 %. после предварительного вакуумирования до давления  $10^{-3}$  Па. Полученные слитки подвергались разливке в вакуумной машине спиннингования расплава, скорость вращения диска составляла 35 м/с. Образцы получены в виде ленты шириной ~1 мм и толщиной 30 мкм.

Определение характеристических температур сплавов проводилось методом дифференциальной сканирующей калориметрии. Структура образцов до и после термической обработки анализировалась с использованием рентгеновской дифрактометрии. Отжиг проводился в трубчатой печи сопротивления с точностью поддержания температуры 2 °С. Аморфные ленты подвергались холодной деформации путем пакетной прокатки на вальцах ЮМО В-6 с регулировкой скорости прокатки. Микротвердость измерялась на микротвердомере *Wilson Micro Vickers 402MVD* с нагрузкой 100 мкН, индентор по Викерсу. Ленты подвергались интенсивной пластической деформации кручением на 0,5 оборота с давлением 6 ГПа на плоских бойках диаметром 20 мм при комнатной температуре. Часть лент была подвергнута последующему ИПДК на 2,5 оборота с давлением 6 ГПа на плоских бойках диаметром 10 мм. Другая часть лент была подвергнута последующему ИПДК на 5 оборотов с давлением 6 ГПа на плоских бойках диаметром 10 мм так же при комнатной температуре.

Рентгенографические исследования до и после термомеханической обработки показали полностью аморфную структуру. Термомеханическая обработка аморфных сплавов приводит к образованию наноразмерных аморфных областей, вероятно, по бимодальному механизму. Холодная прокатка в сочетании с добавкой железа к сплавам системы Zr–Cu–Al значительно облегчает прохождение фазового расслоения во время отжига несмотря на то, что в литом состоянии добавка железа термически стабилизирует аморфную фазу. Образующиеся неоднородности имеют некоторое сходство с зонами Гинье — Престона в кристаллических сплавах и действуют как упрочняющие частицы аморфной матрицы. В некоторых случаях они также являются местами гетерогенного зарождения кристаллических фаз. Затрудняя распространение полос сдвига, они увеличивают микротвердость исследуемых аморфных образцов до 20 %. В то же время в тройных сплавах без железа термомеханическая обработка не влияет на механические свойства сплавов, что косвенно подтверждает неизменность структуры.

### Список источников / References

1. Greer A. L. *Metallic Glasses // Physical Metallurgy*. 2014. P. 305–385.
2. *Advanced ultra-light multifunctional metallic-glass wave springs / N. T. Panagiotopoulos, K. Georgarakis, A. M. Jorge Jr. [et al.] // Materials & Design*. 2020. Vol. 192.

3. Application of Zr and Ti-based bulk metallic glasses for orthopaedic and dental device materials / K. Imai [et al.] // *Metals*. 2020. Vol. 10. 203 p.
4. Enhanced the glass forming ability and plasticity of Ti–Cu–Be bulk metallic glasses by addition of Zr / J. L. Cheng [et al.] // *Results Materials*. 2020. Vol. 5.
5. Enhancing the plasticity of a Ti-based bulk metallic glass composite by cryogenic cycling treatments / Y. Du [et al.] // *Journal of Alloys and Compounds*. 2020. Vol. 835.
6. Ultrasonic excitation induced nanocrystallization and toughening of Zr<sub>46.75</sub>Cu<sub>46.75</sub>Al<sub>6.5</sub> bulk metallic glass / W. Zhai [et al.] // *Journal of Materials Science & Technology*. 2020. Vol. 45. P. 157–161.