

## *Термофізичні та пружні властивості аморфного сплаву на основі цирконію після високочастотної механічної обробки*

О. А. Щерецький, доктор технічних наук

С. О. Бакай\*, кандидат технічних наук

В. Л. Лахненко, кандидат технічних наук

В. О. Абрамов, К. С. Бакай\*

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

\*ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України, Харків

*Методами синхронного термічного та динамічного механічного аналізів досліджено процес кристалізації аморфного сплаву  $Zr_{46,8}Ti_{8,2}Cu_{7,5}Ni_{10}Be_{27,5}$ . Встановлені особливості впливу попередньої ультразвукової обробки на структуроутворення, термофізичні та пружні властивості.*

Після відкриття в 1990 році об'ємного металевого скла (ОМС) область застосування аморфних сплавів значно розширилась, з'явилась можливість використання ОМС як конструкційних матеріалів у різних галузях сучасної науки та техніки [1 – 4].

Важливою характеристикою ОМС є їх стійкість в умовах низькочастотних та високочастотних вібрацій та навантажень, що можуть призвести до незворотніх структурних змін та руйнування матеріалу. Протягом останнього десятиліття в світі виконано важливі дослідження втоми та руйнування ОМС під дією низькочастотних (менш, ніж 100 Гц) процесів, але зовсім немає досліджень впливу високочастотних (близько  $10^4$  Гц) процесів. Таким чином метою даної роботи було дослідження впливу високочастотних навантажень на фізико-механічні властивості ОМС.

Як відомо, механічні властивості сплавів є структурно-чутливими, тому в даній роботі особливу увагу приділяли дослідженням із застосуванням методу динамічного механічного аналізу (ДМА), який дозволяє досліджувати зміну пружних властивостей та внутрішнього тертя матеріалу залежно від температури, навантажень та частоти вимушених коливань. Для проведення досліджень методом ДМА використовували термоаналізатор DMA 242 С фірми NETZSCH (Німеччина). Особливості дослідження аморфних сплавів методом ДМА описано в роботі [5].

Досліджували зразки аморфного сплаву  $Zr_{46,8}Ti_{8,2}Cu_{7,5}Ni_{10}Be_{27,5}$  товщиною 0,05 мм та шириною 3 мм, оброблені ультразвуком за однакових умов (частота – 20 кГц, амплітуда – 14 мм, навантаження – 150 кг), але протягом різного проміжку часу: 40 с, 60 с, 80 с. Вимірювання проводили

методом розтягування при статичному навантаженні 0,5 Н та динамічному навантаженні 5 Н, максимальній амплітуді 50 мкм та частотах 1, 5, 10 Гц в інтервалі температур 30 – 600 °С при швидкості нагріву та охолодження 2 °С/хв в середовищі високочистого азоту.

Перед та після проведення ДМА випробувань всі зразки досліджували за допомогою синхронного термічного аналізу на приладі STA 449F1 фірми NETZSCH. Особливості дослідження аморфних сплавів методом диференціальної скануючої калориметрії (ДСК) описано в роботі [6]. На рис. 1 наведено термограми вихідного аморфного сплаву (без ультразвукової обробки) при швидкості нагрівання 2 і 20 °С/хв. При швидкості нагрівання 20 °С/хв вдається визначити температуру склування ( $T_g = 379,0\text{ °C}$ ) та температуру кристалізації сплаву ( $T_x = 453,8\text{ °C}$ ). Так як для ДМА аналізатора оптимальною швидкістю нагріву є 2 °С/хв, ДСК дослідження проводили і при швидкості нагріву 2 °С/хв. При даній швидкості нагріву не має можливості визначити температуру склування, а температура кристалізації дорівнює 397,8 °С. Ультразвукова обробка аморфного сплаву протягом 40 та 60 с практично не вплинула на температури склування та кристалізації вихідного сплаву, теплота кристалізації також залишилась без змін. Зразки, оброблені ультразвуком протягом 80 с, мали дещо вищу температуру кристалізації та значно меншу теплоту кристалізації в порівнянні з вихідним сплавом (рис. 2), що пов'язано з частковою кристалізацією сплаву.

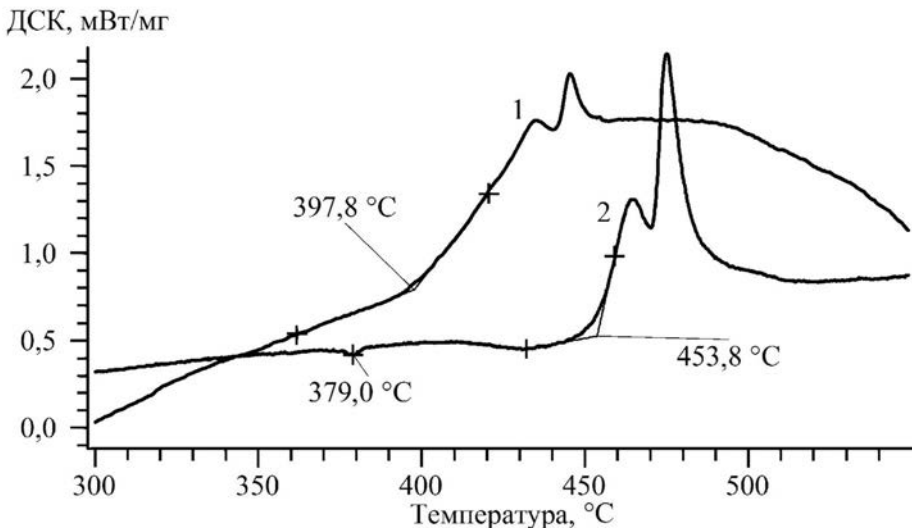


Рис. 1. Термограма ДСК вихідного аморфного сплаву  $Zr_{46,8}Ti_{8,2}Cu_{7,5}Ni_{10}Be_{27,5}$ . 1 – швидкість нагріву 2 °С/хв, 2 – швидкість нагріву 20 °С/хв.

Результати дослідження зміни модуля Юнга ( $E_1$ ) від температури для вихідного та обробленого ультразвуком зразків наведено на рис. 3.

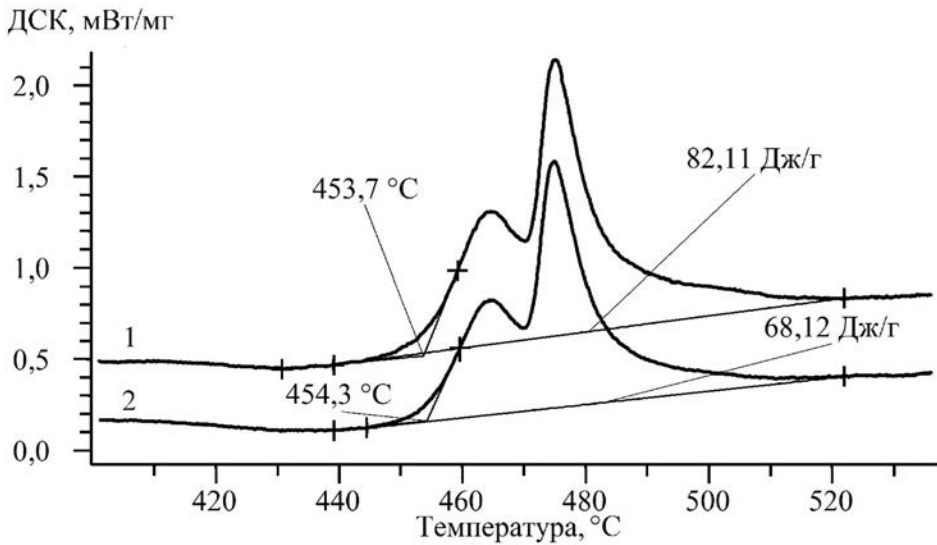


Рис. 2. Термограма ДСК аморфного сплаву  $Zr_{46,8}Ti_{8,2}Cu_{7,5}Ni_{10}Be_{27,5}$ . 1 – вихідний сплав, 2 – оброблений ультразвуком 80 с.

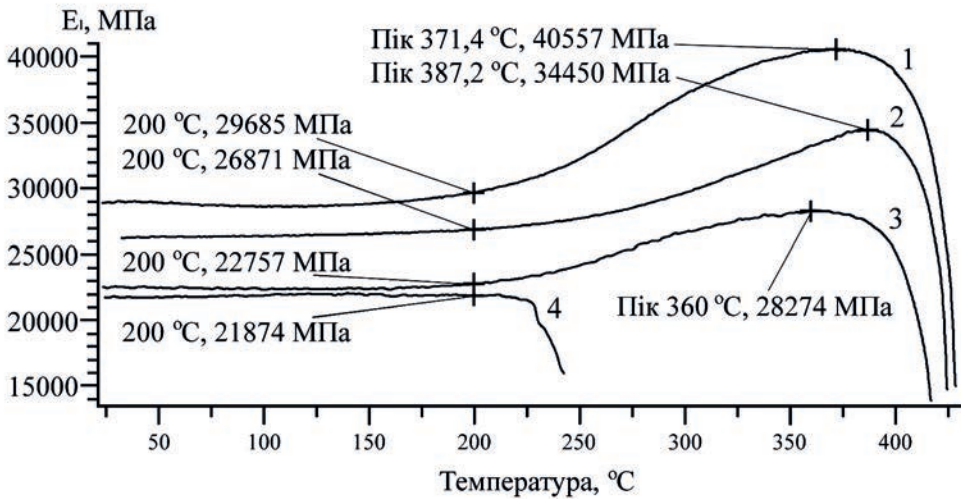


Рис. 3. Залежність модуля Юнга від температури для аморфного сплаву  $Zr_{46,8}Ti_{8,2}Cu_{7,5}Ni_{10}Be_{27,5}$ . 1 – ультразвукова обробка 60 с, 2 – ультразвукова обробка 40 с, 3 – вихідний сплав, 4 – ультразвукова обробка 80 с.

Як видно з рис. 3, зі збільшенням часу ультразвукової обробки аморфного сплаву до 60 с модуль Юнга зростає, що вказує на підвищення пружних властивостей матеріалу. Ультразвукова обробка протягом 80 с призводить до зменшення модуля Юнга та зниження пружних властивостей.

Досліджено залежність модуля втрат  $E_{pp}$  від температури (рис. 4). Модуль втрат характеризує перетворення механічної енергії в інші види енергії, наприклад в тепло, являється мірою неповерненої, втраченої енергії коливань. Як видно з рис. 4, максимальне значення модуля втрат різне для

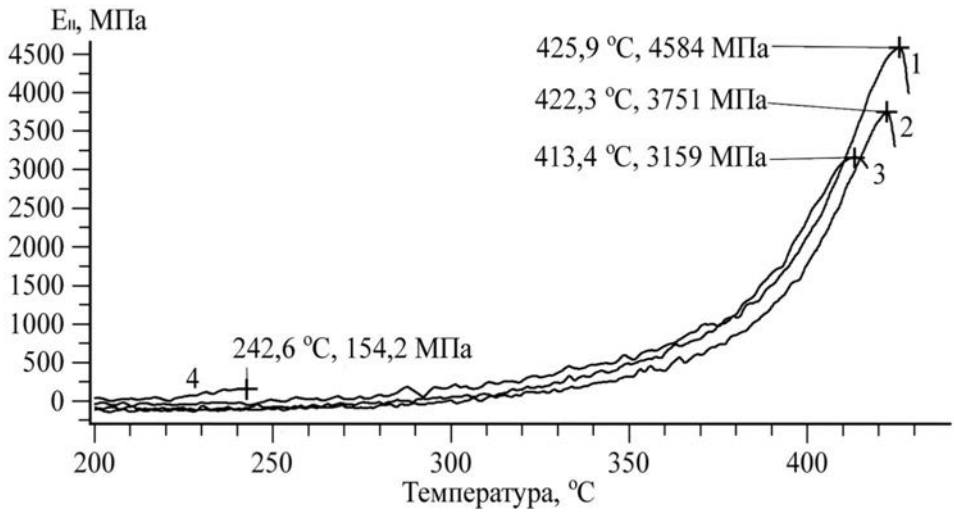


Рис. 4. Залежність модуля втрат від температури для аморфного сплаву  $Zr_{46,8}Ti_{8,2}Cu_{7,5}Ni_{10}Be_{27,5}$ . 1 – ультразвукова обробка 60 с, 2 – ультразвукова обробка 40 с, 3 – вихідний сплав, 4 – ультразвукова обробка 80 с.

вихідного та оброблених ультразвуком зразків і закономірно зростає зі збільшенням часу ультразвукової обробки від 3,2 ГПа для вихідного зразка до 4,6 ГПа для зразка, обробленого ультразвуком протягом 60 с. Температура, при якій спостерігається максимум модуля втрат, також закономірно зростає: для вихідного зразка – 413 °С, для зразка, обробленого ультразвуком протягом 40 с – 422,3 °С, для зразка, обробленого ультразвуком протягом 60 с – 425,9 °С.

На кривих залежності внутрішнього тертя від температури (рис. 5) спостерігається незначний мінімум при 200 °С, температура якого

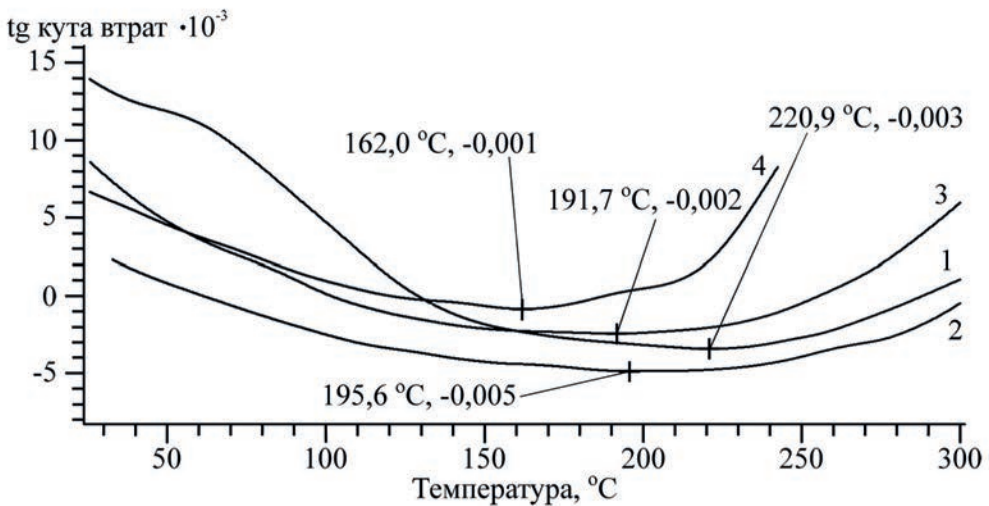


Рис. 5. Залежність внутрішнього тертя від температури для аморфного сплаву  $Zr_{46,8}Ti_{8,2}Cu_{7,5}Ni_{10}Be_{27,5}$ . 1 – ультразвукова обробка 60 с, 2 – ультразвукова обробка 40 с, 3 – вихідний сплав, 4 – ультразвукова обробка 80 с.

закономірно підвищується зі збільшенням часу ультразвукової обробки від 191,7 °С для вихідного зразка до 220,9 °С для зразка, обробленого ультразвуком протягом 60 с, за виключенням зразка, обробленого ультразвуком протягом 80 с, для якого ця температура значно нижча та складає 162 °С. Збільшення температури випробувань вище 300 °С приводить до різкого зростання величини внутрішнього тертя всіх досліджених зразків, причому характер зміни внутрішнього тертя від температури однаковий, як для вихідного, так і для оброблених ультразвуком зразків. Максимальні значення температури та величини внутрішнього тертя, при яких відбувся розрив зразків, вищі для сплавів, що піддавали ультразвуковій обробці (рис. 5).

Таким чином встановлено, що високочастотну механічну обробку можливо використовувати для цілеспрямованого підвищення пружних властивостей аморфних сплавів. Встановлені оптимальні режими механічної обробки для сплаву  $Zr_{46,8}Ti_{8,2}Cu_{7,5}Ni_{10}Be_{27,5}$ , які дозволяють підвищити пружні властивості на 30 %.

Високочастотна механічна обробка при цьому практично не впливає на температури склування, кристалізації та теплоту кристалізації аморфного сплаву, що вказує на те, що ступінь аморфізації сплаву не змінюється.

Збільшення часу обробки більше оптимального призводить до підвищення температури кристалізації порівняно з вихідним сплавом та значно зменшує теплоту кристалізації, що вказує на часткову кристалізацію дослідженого сплаву та веде до зниження його пружних властивостей.

## Література

1. Ковнеристый Ю.К. Объемно-аморфизирующиеся металлические сплавы. – М.: Наука, 1999. – 80 с.
2. Ковнеристый Ю.К. Объемно-аморфизирующиеся металлические сплавы и наноструктурные материалы на их основе // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2005. – 7. – С. 14 – 16.
3. Abe T., Onodera H., Shimono M., Thermodynamic Modeling of the Undercooled Liquid in the Ni-Zr System // *Materials Transactions.* – 2005. – 46, 12. – P. 2838 – 2843.
4. Yamasaki T., Maeda S., Yokoyama Y. Viscosity Measurements of  $Zr_{55}Cu_{30}Al_{10}Ni_5$  and  $Pd_{40}Cu_{30}Ni_{10}P_{20}$  Supercooled Liquid Alloys by Using a Penetration Viscometer // *Materials Transactions.* – 2005. – 46, 12. – P. 2746 – 2750.
5. Щерецький О. А. Дослідження термічної стабільності аморфних сплавів методом динамічного механічного аналізу // *Металознавство та обробка металів.* – 2009. – 4. – С. 41 – 44.
6. Лахненко В. Л. Применение синхронного термического анализа для исследования процессов перехода сплавов из аморфного в кристаллическое состояние // *Процессы литья.* – 2009. – 5. – С. 50 – 56.

Одержано 13.02.14

А. А. Щерецкий, С. А. Бакай, В. Л. Лахненко, В. А. Абрамов,  
К. С. Бакай

**Термофизические и упругие свойства аморфного сплава на основе циркония после высокочастотной механической обработки**

**Резюме**

Методами синхронного термического и динамического механического анализа исследован процесс кристаллизации аморфного сплава  $Zr_{46.8}Ti_{8.2}Cu_{7.5}Ni_{10}Be_{27.5}$ . Установлены особенности влияния предварительной ультразвуковой обработки на структурообразование, термофизические и упругие свойства.

O. A. Shcheretskyi, S. O. Bakai, V. L. Lakhnenko, V. O. Abramov, K. S. Bakai

**Thermophysical and elastic properties of an Zr based amorphous alloy after high-frequency processing**

**Summary**

Crystallization process of amorphous alloy  $Zr_{46.8}Ti_{8.2}Cu_{7.5}Ni_{10}Be_{27.5}$  was researched by the methods of simultaneous thermal and dynamic mechanical analysis. The features of influence of ultrasound processing on structure, thermophysical and elastic properties were identified.

***Шановні колеги!***

**Триває передплата на науково-технічний журнал «Металознавство та обробка металів» на 2015 р.**  
Для регулярного одержання журналу потрібно перерахувати вартість заказаних номерів на розрахунковий рахунок Фізико-технологічного інституту металів та сплавів НАН України.  
Вартість одного номера журналу – 30 грн., передплата на рік – 120 грн.

Ціна архівних номерів 1995 – 2014 рр. – 10 грн.

**Розрахунковий рахунок для передплатників, спонсорів і рекламодавців:**

банк ГУДКСУ в м. Києві, р/р 31257201112215, код банку 820019.

Отримувач – ФТІМС НАН України, ЗКПО 05417153,

з посиланням на журнал "ММ".

Копію документа передплати та відомості про передплатника просимо надсилати до редакції, вказавши номер і дату платіжного документа.