

## СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВЕРХУПРУГИХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ TI-ZR

Конопацкий А.С.<sup>1</sup>, Шереметьев В.А.<sup>1</sup>, Дубинский С.М., Жукова Ю.С.,  
Филонов М.Р., Браиловский В.<sup>2</sup>, Прокошкин С.Д.<sup>1</sup>

*1 Национальный Исследовательский Технологический Университет «МИСиС»,  
Москва, Россия, konopatskiy@isis.ru*

*2 Высшая Технологическая Школа, Монреаль, Канада*

**Аннотация.** Сплавы Ti-18Zr-15Nb, Ti-41Zr-8Nb ат.% были получены методом вакуумно-дугового переплава. Изучение структуры сплавов проводили после термомеханической обработки, включавшей холодную прокатку со степенью истинной деформации  $\epsilon = 0,3$  и последующий отжиг при температуре 550°C в течение 30 мин, с закалкой в воде. Установлено, что сплав с более высоким содержанием циркония обладает более высоким кристаллографическим ресурсом обратимой деформации. Функциональные усталостные испытания выявили несовершенство сверхупругого поведения сплава Ti-41Zr-8Nb, связанное с его неоптимальным фазовым составом, по сравнению со сплавом Ti-18Zr-15Nb.

### **Введение**

Сплавы с памятью формы (СПФ) привлекают большое внимание научного сообщества в течение длительного времени. Подобный интерес во многом вызван большими перспективами применения данных сплавов для решения практических задач, находящихся на стыке материаловедения и медицины. Среди множества различных химических композиций сплавов данного класса можно выделить никелид титана TiNi, демонстрирующий как выраженный эффект памяти формы, так и сверхупругое поведение [1-4]. Также большое развитие получили СПФ, состоящие только из безопасных компонентов, таких как Ti, Nb, Zr, Ta. Развитие данных материалов обусловлено их более высокой биосовместимостью с организмом человека [5-8]. В то же время данные сплавы демонстрировали менее выраженное сверхупругое поведение и, в целом, более низкие функциональные свойства по сравнению с TiNi. По этой причине одним из наиболее перспективных направлений в данной области является поиск оптимальных химических составов и схем термомеханической обработки (ТМО), обеспечивающих безникелевым сплавам высокий комплекс функциональных свойств [9, 10].

### **Материалы и методы**

Сплавы Ti-18Zr-15Nb (18-15) и Ti-41Zr-8Nb (41-8) ат.% были получены методом вакуумно-дугового переплава (в скобках приведены условные обозначения сплавов). Схема ТМО состояла в холодной прокатке со степенью истинной деформации  $\epsilon = 0,3$  и последующем отжиге при температуре 550°C в течение 30 мин, с закалкой образцов в воде. Рентгенографические исследования проводили на установке PANalitical X'Pert PRO, излучение  $Cu_{K\alpha}$ . Механические испытания проводили на установке MTS Minibionix. В использованной схеме циклических механических испытаний на растяжение образец нагружали до величины деформации 2% после чего нагрузку снимали и цикл повторяли снова. Испытания проводили до разрушения образца.

### **Результаты и обсуждение**

Результаты рентгенографического анализа приведены на рисунке 1. После ТМО в сплаве 18-15 не наблюдалось достаточное содержание мартенситной фазы, поэтому она была сформирована за счет дополнительной пластической деформации (5-7%) образца [11]. Полученный таким образом образец обозначен как 18-15CR.

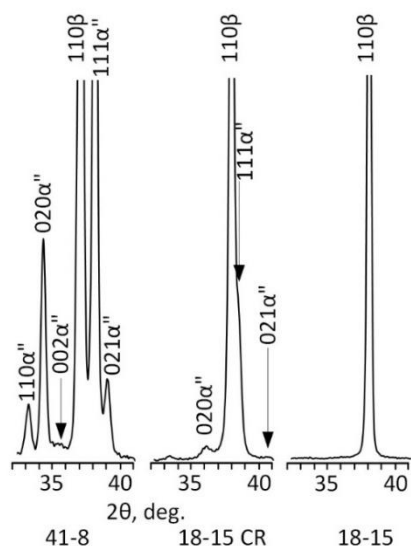


Рисунок 1 – Рентгенограммы образцов 18-15, 18-15 CR и 41-8.

Из рисунка 1 видно, что после ТМО сплав 41-8 содержит значительное количество мартенситной фазы, что может повлечь за собой несовершенное сверхупругое поведение материала, а также указывает на недостаточное содержание компонентов сплава, стабилизирующих высокотемпературную исходную фазу. Результаты расчета показали, что кристаллографический ресурс обратимой деформации (КРД) у сплава 18-15 составляет примерно 5,5%, в то время как у 41-8 – около 8%.

Результаты механических испытаний приведены на рисунке 2.

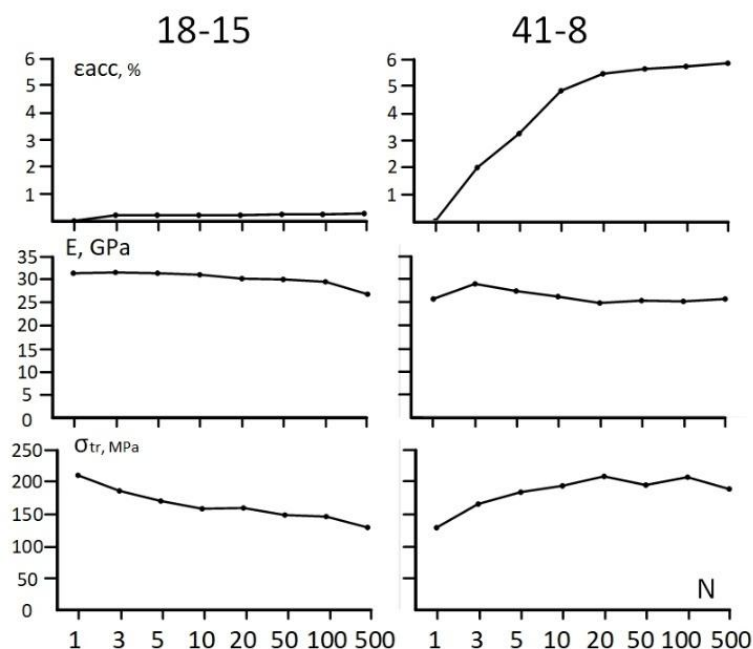


Рисунок 2 – Изменение функциональных свойств в ходе механических испытаний сплавов 18-15 и 41-8.

Как видно из рисунка 2, оба сплава демонстрируют достаточно низкие величины модуля Юнга  $E$  и фазового предела текучести  $\sigma_{tr}$ . Наибольшее различие наблюдается в величине накопленной деформации  $\epsilon_{acc}$  0,1-0,2% у сплава 18-15 против 6% у сплава 41-8. Высокое значение накопленной деформации говорит о значительной остаточной деформации в каждом цикле механических испытаний, вызванной несовершенным сверхупругим поведением материала.

## Выводы

По результатам проделанной работы установлена высокая перспективность сплава Ti-41Zr-8Nb, как материала, проявляющего сверхупругое поведение и обладающего высоким КРД (8% против 5,5% у сплава Ti-18Zr-15Nb). Выявленное несовершенство сверхупругого поведения сплава Ti-41Zr-8Nb обусловлено его неоптимальным фазовым составом и может быть устранено коррекцией химического состава.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант 18-33-00418.*

## Список литературы

- [1] S. Miyazaki, K. Otsuka, C.M. Wayman, The Shape Memory Mechanism Associated with the Martensitic-Transformation in Ti-Ni Alloys .1. Self-Accommodation, Acta Metall. 37 (1989) 1873-1884. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(89\)90072-2](https://doi.org/10.1016/0001-6160(89)90072-2).
- [2] S. Prokoshkin, V. Brailovski, K. Inaekyan, V. Demers, A. Kreitchberg, Nanostructured Ti–Ni Shape Memory Alloys Produced by Thermomechanical Processing, Shape Mem. Superelasticity 1 (2015) 191-203. <https://doi.org/10.1007/s40830-015-0026-z>.
- [3] S. Prokoshkin, V. Brailovski, S. Dubinskiy, K. Inaekyan, A. Kreitchberg, Gradation of Nanostructures in Cold-Rolled and Annealed Ti–Ni Shape Memory Alloys, Shape Mem. Superelasticity 2 (2016) 12-17. <https://doi.org/10.1007/s40830-016-0056-1>.
- [4] E.P. Ryklina, I.Y. Khmelevskaya, S.D. Prokoshkin, R.V. Ipatkin, V.Y. Turilina, K.E. Inaekyan, The nickel-titanium device with SME for emergency interruption of blood flow, Mater. Sci. Eng. A 378 (2004) 519-522. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.12.050>.
- [5] L. W. Ma, C. Y. Chung, Y. X. Tong and Y. F. Zheng, Properties of porous TiNbZr shape memory alloy fabricated by mechanical alloying and hot isostatic pressing, J. Mater. Eng. Perform. 20 (2011) 783-786. <https://doi.org/10.1007/s11665-011-9913-4>.
- [6] M. Tahara, N. Okano, T. Inamura and H. Hosoda, Plastic deformation behaviour of singlecrystalline martensite of Ti-Nb shape memory alloy, Sci. Rep. 7 (2017) 1-11. <https://doi.org/10.1038/s41598-016-0028-x>.
- [7] H.Y. Kim, S. Miyazaki, Martensitic Transformation and Superelastic Properties of Ti Nb Base Alloys, Mater. Trans. 56 (2015) 625-634. <https://doi.org/10.2320/matertrans.M2014454>.
- [8] N. Sakaguchi, M. Niinomi, T. Akahori, J. Takeda, H. Toda, Effect of Ta content on mechanical properties of Ti-30Nb-XTa-5Zr, Mater. Sci. Eng. C, 25 (2005) 370-376. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2005.04.003>.
- [9] H.Y. Kim, T. Sasaki, J.I. Kim, T. Inamura, H. Hosoda, S. Miyazaki, Texture and shape memory behavior of Ti-22Nb-6Ta alloy, Acta Mater. 54 (2006) 423-433. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2005.09.014>.
- [10] H.Y. Kim, J. Fu, H. Tobe, J. Il Kim, S. Miyazaki, Crystal Structure, Transformation Strain, and Superelastic Property of Ti–Nb–Zr and Ti–Nb–Ta Alloys, Shape Mem. Superelasticity 1 (2015) 107-116. <https://doi.org/10.1007/s40830-015-0022-3>.
- [11] A.S. Konopatsky, S.M. Dubinskiy, Yu.S. Zhukova, V. Sheremetyev, V. Brailovski, S.D. Prokoshkin, M. R. Filonov, Ternary Ti-Zr-Nb and quaternary Ti-Zr-Nb-Ta shape memory alloys for biomedical applications: Structural features and cyclic mechanical properties, Mater. Sci. Eng. A 702 (2017) 301-311. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.07.046>.