

**Виктор Павлович Кузнецов<sup>1\*</sup>, Роман Дмитриевич Карелин<sup>2</sup>, Галымжан Жанатович Муканов<sup>1</sup>, Аркадий Юрьевич Жиляков<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup> Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук, г. Москва, Россия

\*v.p.kuznetcov@urfu.ru.

## ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Ti-Nb-Zr НА ИЗМЕНЕНИЕ МОДУЛЯ ЮНГА И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРИ НАГРЕВЕ ПОСЛЕ ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ МЕТОДОМ РКУП

В представленной работе рассматривалось влияние химического состава горячекатанных прутков сплавов системы Ti-Nb-Zr на изменение модуля Юнга после термомеханической обработки равноканальным угловым прессованием (РКУП). Описано проведение равноканального углового прессования прутков в оболочке из технически чистого «Армко-железа» и основные геометрические параметры установки. Исследованы три сплава с различным содержанием легирующих элементов, ниобия и циркония. Были подготовлены образцы для динамического механического анализа (ДМА), определения температуропроводности, удельной теплоемкости при разной температуре. Проведено сравнение полученных результатов исследования и сформулированы выводы по влиянию химического состава на модуль Юнга и теплофизические свойства рассматриваемых образцов после обработки РКУП.

*Ключевые слова:* титановые сплавы, РКУП, ДМА, модуль Юнга, тепловые свойства.

**Viktor P. Kuznetsov<sup>1</sup>, Roman D. Karelin<sup>2</sup>, Galymzhan Zh. Mukanov<sup>1</sup>, Arkadiy Yu. Zhilyakov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

<sup>2</sup> A.A. Baykov Institute of Metallurgy and Materials Science of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

## INFLUENCE OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF THE Ti-Nb-Zr ALLOYS ON THE CHANGE IN YOUNG'S MODULE AND THERMAL PHYSICAL PROPERTIES DURING HEATING AFTER THERMAL DEFORMATION TREATMENT BY ECAP METHOD

In the presented work, the influence of the chemical composition of hot-rolled rods made of Ti-Nb-Zr system alloys on the change in Young's modulus after thermal deformation treatment by equal channel angular pressing (ECAP) was observed. The carrying out of equal channel angular pressing of rods enclosed in technical pure "Armco iron" and the main geometric parameters of the installation

are described. Three alloys with different changes in the alloying elements, niobium and zirconium, were studied. Samples were prepared for dynamic mechanical analysis (DMA), determination of thermal diffusivity, individual heat capacity at different temperatures. The results of the study were compared and conclusions were drawn on the influence of the chemical composition on the Young's modulus and the thermophysical properties of the studied samples under consideration after ECAP treatment.

*Key words:* titanium alloys, ECAP, DMA, Young's modulus, thermal properties.

Титановые сплавы привлекают внимание как перспективные материалы для медицинских имплантатов [1, 2]. Однако, для ортопедического применения важно достичь уровня модуля Юнга костной ткани [3].

Данный вопрос частично решается путём добавления в титановые сплавы ряда легирующих элементов и термообработки [4]. Однако при достижении модулем Юнга имплантатов из сплавов системы Ti-Nb-Zr значения, близкого модулю Юнга кости, важно обеспечить высокий уровень прочностных свойств. С этой целью в сплавах формируют ультрамелкозернистую структуру методами термомеханической обработки. В частности, используется равноканальное угловое прессование [5, 6]. В этом же контексте важным является определение закономерностей изменения тепловых свойств титановых сплавов [7].

Цель данного исследования определить влияние химического состава сплавов системы Ti-Nb-Zr на изменение модуля Юнга и тепловых свойств после термомеханической обработки методом РКУП.

Материалами исследования являются сплавы системы Ti-Nb-Zr, полученные методом вакуумно-дугового переплава на ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» с последующей горячей прокаткой. Химический состав сплавов указан в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав исследуемых сплавов, %:

№ плавки	Ti	Nb	Zr	Fe	B	Cr
92	55,302	39,5	5,23	0,029	0,027	0,012
95	53,209	39,6	7,12	0,028	0,033	0,01
96	52,155	38,8	8,96	0,043	0,029	0,013

В рамках данного исследования проводилось равноканальное угловое прессование (РКУП) прутков плавов 92, 95, 96 диаметром 11,5 мм и длиной 80 мм, которые помещали в оболочку из технически чистого железа («Армко-железо»). Размер оболочки: диаметр 19,8 мм, длина 90 мм. После помещения заготовки в оболочку производили заваривание крышки. Длина оболочки перед прессованием составляла 95 мм.

Перед проведением РКУП образцы предварительно нагревались до температуры 450 °С в течение 30 минут. Для снижения трения применялась смазка суспензией графита в масле.

Схема РКУП состоит из двух каналов с углом пересечения  $\varphi = 110^\circ$  и углом сопряжения –  $\psi = 25^\circ$  (рис. 1). Было выполнено 4 цикла прессования без разрушения оболочки или заготовки. Усилие прессования задавалось давлением в гидросистеме пресса и не превышало 70 бар. Истинная деформация образцов составила  $e = 3,2$ .



Рис. 1. Схема каналов в установке РКУП при прессовании прутков сплавов системы Ti-Nb-Zr

Фото оболочки и образца после РКУП приведены на рисунке 2.



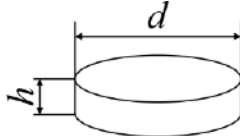

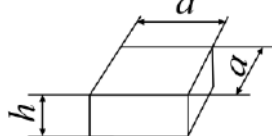

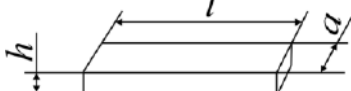

Рис.2. Фото оболочки и образца после проведения РКУП

После проведения равноканального углового прессования были подготовлены образцы для определения изменения модуля Юнга методом ДМА и теплофизических свойств методами лазерной вспышки и синхронного термического анализа от температуры нагрева. Образцы были вырезаны с

помощью проволочного электроэрозионного станка Ecosut. Эскизы образцов приведены в таблице 2.

Таблица 2

Методы исследования свойств, размеры и вид образцов

Метод исследования/ определяемое свойство	Размеры	Вид изготовленного образца	Изображение образца
Синхронный термический анализ/теплоёмкость $c$	$d = 5$ мм $h = 1$ мм		
Метод лазерной вспышки/ температуропровод- ность $a$	$a = 10$ мм $h = 1$ м		
Динамический механический анализ/модуль Юнга $E$	$a = 2$ мм $l = 40$ мм $h = 1$ мм		

Результаты измерения модуля Юнга  $E$ , удельной теплоемкости  $c$ , температуропроводности  $a$  для исследуемых образцов в зависимости от температуры нагрева приведены на рисунке 3.

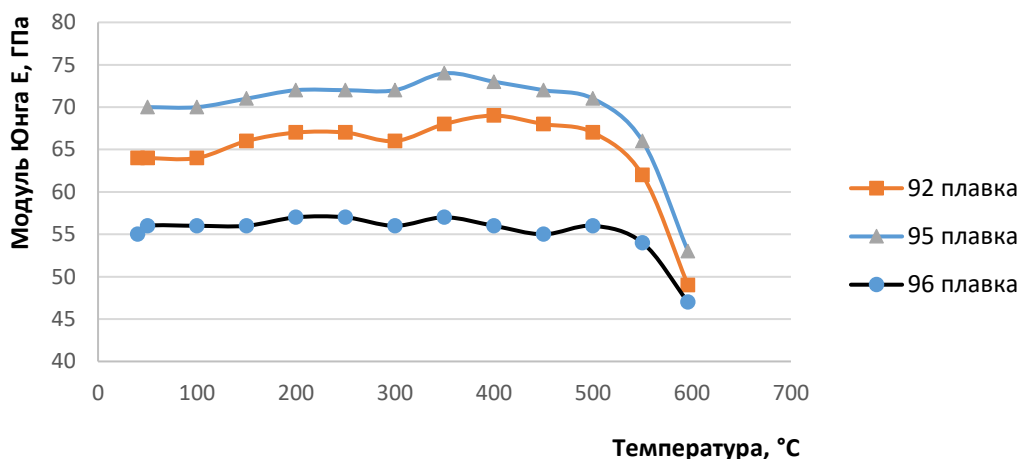


Рис. 3. Изменение модуля Юнга образцов плавки 92, 95 и 96 сплавов Ti-Nb-Zr в зависимости от температуры нагрева

Изменение температуропроводности и удельной теплоемкости образцов в зависимости от температуры нагрева приведено на рисунке 4.

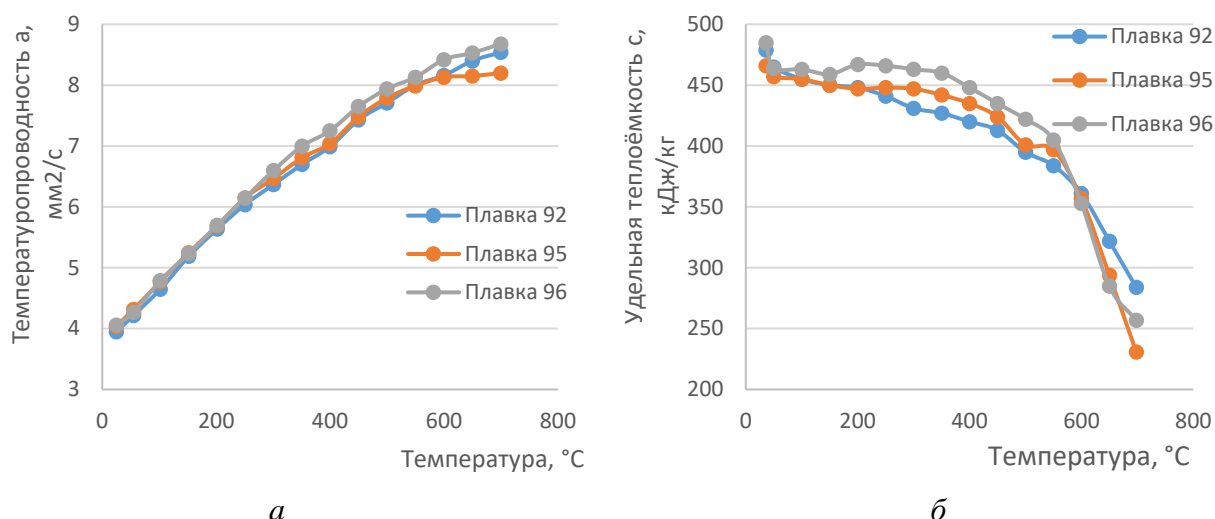


Рис. 4. Изменение температуропроводности (а) и удельной теплоемкости (б) образцов плавков 92, 95 и 96 сплавов Ti-Nb-Zr в зависимости от температуры нагрева

**Заключение.** Исследуемые термдеформируемые прутки сплавов Ti-Nb-Zr сохраняют значение модуля Юнга при изменении температуры нагрева от комнатной до 500 °C и при дальнейшем повышении до 600 °C значение модуля Юнга существенно снижается. Сплав с содержанием Zr 7% имеет максимальное значение модуля Юнга  $E=75$  ГПа, в то время как сплав с содержанием циркония Zr 9% имеет минимальное значение  $E=55$  ГПа, что, безусловно, необходимо для медицинских имплантатов. Температуропроводность всех сплавов линейно растет при нагреве до температуры 550 °C. Максимальное значение температуропроводности у сплава с содержанием Zr 9%. Значения удельной теплоёмкости  $c$  снижаются при повышении температуры по параболическому закону. Максимальное значение теплоемкости у сплава с содержанием Zr 9% имеет место при нагреве до температуры 300 °C.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Программы развития Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина в соответствии с программой стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».*

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Arabnejad S. High-strength porous biomaterials for bone replacement: A strategy to assess the interplay between cell morphology, mechanical properties, bone ingrowth and manufacturing constraints / Johnston R.B., Pura J.A. // Acta Biomater. 2016. 30. 345–356.
2. Manmeet Kaur, K. Singh Review on titanium and titanium based alloys as biomaterials for orthopaedic applications // Materials Science & Engineering C 102 (2019) 844–862.

3. Yuhua Li, Chao Yang, Haidong Zhao, Shengguan Qu, Xiaoqiang Li, Yuanyan Li. New developments of Ti-Based alloys for Biomedical Applications // *Materials*. 2014. V. 7. № 3. P. 1709-1800.
4. A.G. Illarionov, S.V. Grib, S.M. Illarionova, A.A. Popov Relationship between structure, phase composition and physicomechanical properties in quenched Ti-Nb alloys// *Physics of Metals and Metallography*, 120(2) (2019) 156-162.
5. Koujalagi M.B., Siddesha H.S. ECAP of titanium alloy by sever plastic deformation: A review // *Materials Today: Proceedings*. – 2020. – Vol. 45(1). – P. 71–77.
6. Koujalagi M.B., Siddesha H.S. ECAP of titanium alloy by sever plastic deformation: A review // *Materials Today: Proceedings*. – 2020. – Vol. 45(1). – P. 71–77.
7. Zháňal P., Beran P., Hansen T., Šmilauerová J., Stráský J., Janeček M., Hrcuba P. Thermal expansion evolution of metastable b Ti-15Mo alloy durong linear heating // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 461 (2019) 012094.