

4. Крипякевич П. И. Структурные типы интерметаллических соединений. М., 1977.
5. Металлы и сплавы: справочник / под ред. Ю. П. Солнцева.
6. Измельчение зерна алюминиевых сплавов путем введения модифицирующих добавок / А. Грир [и др.] // Перспективные и конструкционные материалы. 2003. № 5. С. 1–17.
7. Мондольфо П. Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов : пер. с англ. / под ред. Ф. И. Квасова, Г. Б. Строганова, И. Н. Фридляндера. М. : Металлургия. 1979. 639 с.
8. Золоторевский В. С. Строение и свойства литых алюминиевых сплавов. М. : Металлургия. 1981. 192 с.
9. Бочвар О. С. Структура и свойства сплавов // Труды МАТИ. Вып. 30. М. : Оборонгиз, 1956. С. 60–73.

УДК 669.295

А. Г. Нежданов*, С. И. Степанов

Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург

**annezhdanoff@gmail.com*

Научный руководитель — доц., канд. техн. наук С. И. Степанов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Методами растровой электронной микроскопии, испытаний на растяжение, динамического механического анализа (ДМА) и микроиндентирования изучена взаимосвязь между структурой и физико-механическими свойствами биосовместимых титановых сплавов Ti–10Zr–1,2Nb–1,5Al, Ti–6Al–4V ELI, Ti–15Mo, Ti–36,1Nb–3,8Zr–2,4Ta–1,9Sn в горячедеформированном состоянии. На примере исследованных сплавов показана сопоставимость в пределах погрешности 3–7% значений модуля упругости, полученных с использованием трех различных методов (испытание на растяжение, ДМА, микроиндентирование).

Ключевые слова: модуль упругости, биосовместимые титановые сплавы, фазовый состав, испытание на растяжение, динамический механический анализ, микроиндентирование

A. G. Nezhdanov, S. I. Stepanov

ELASTIC MODULUS MEASUREMENT OF TITANIUM ALLOYS FOR BIOMEDICAL APPLICATION

Structure-properties relationships of biocompatible titanium alloys Ti–10Zr–1,2Nb–1,5Al, Ti–6Al–4V ELI, Ti–15Mo, Ti–36,1Nb–3,8Zr–2,4Ta–1,9Sn in the hot deformed state were studied using the methods of scanning electron microscopy, tensile tests, dynamic mechanical analysis (DMA) and microindentation. It is shown that the value of the elastic modulus differs by 3–7% depending on the measurement method. The resulting interval is within the margin of error.

Key words: elastic modulus, biocompatible titanium alloys, phase composition, tensile test, dynamic mechanical analysis, microindentation

Титан и его сплавы благодаря сочетанию биосовместимости и высокой удельной прочности являются наиболее широко используемыми конструкционными металлическими материалами для изготовления медицинских имплантатов [1].

На практике модуль упругости (E) титановых сплавов определяется различными методами, в частности, по результатам анализа кривых растяжения при механических испытаниях, по данным динамического механического анализа (ДМА) и при микроиндентировании по кривой разгрузки [2]. Различные методики измерения модуля упругости могут не всегда давать одинаковые величины E , и работ, связанных с анализом сопоставимости значений модуля упругости, получаемых различными методами, в частности для биосовместимых титановых сплавов, практически нет.

Исследовались горячедеформированные прутки диаметром 23...27 мм из сплавов Ti–6–4 ELI, TNZA, Ti–15Mo и ковкая заготовка из сплава TNZS (квадрат 25 мм), имеющие следующий химический состав (масс. %): Ti–6Al–4V–0,17Fe–0,1 O (Ti–6–4 ELI), Ti–10Zr–1,2Nb–1,5Al–0,5Fe–0,3Si–0,3 O (TNZA), Ti–13,5Mo–0,41Al–0,022Fe–0,1Si–0,132 O (Ti–15Mo), Ti–36,1Nb–3,8Zr–2,4Ta–1,9Sn–0,05 O (TNZS). Окончательная деформация сплавов Ti–6Al–4V ELI, TNZA, Ti–15Mo осуществлялась в двухфазной ($\alpha+\beta$)–области, а сплава TNZS — в однофазной β –области с последующим охлаждением на воздухе.

Анализ микроструктуры сплавов осуществлялся на растровом электронном микроскопе JEOL JSM-6490 LV (рис.).

В целом характер зеренной структуры сплавов определяется тем, в какой области проводили окончательную деформацию. Деформированные в двухфазной ($\alpha+\beta$)–области сплавы TNZA, Ti–6Al–4V ELI, Ti–15Mo частично сохраняют направленность зеренной структуры, связанной с направлением течения металла при деформации, а деформированный в однофазной β –области сплав TNZS за счет протекания рекристаллизации имеет равноосную полиэдрическую β –зеренную структуру.

Для механических испытаний на растяжение плоских образцов, вырезанных вдоль направления прокатки, использовали машину Instron 3382 с экстензометром базой 50 мм. ДМА осуществляли на образцах размерами 25×4×1 мм (длинная часть параллельна направлению прокатки) по схеме трехточечного изгиба на установке NETZSCH DMA

242 С. Микроиндентирование на поперечных образцах на приборе CSM ConScan применялось для определения упругих свойств по методу Оливера-Фарра. На каждом образце проводилось по 12 измерений.

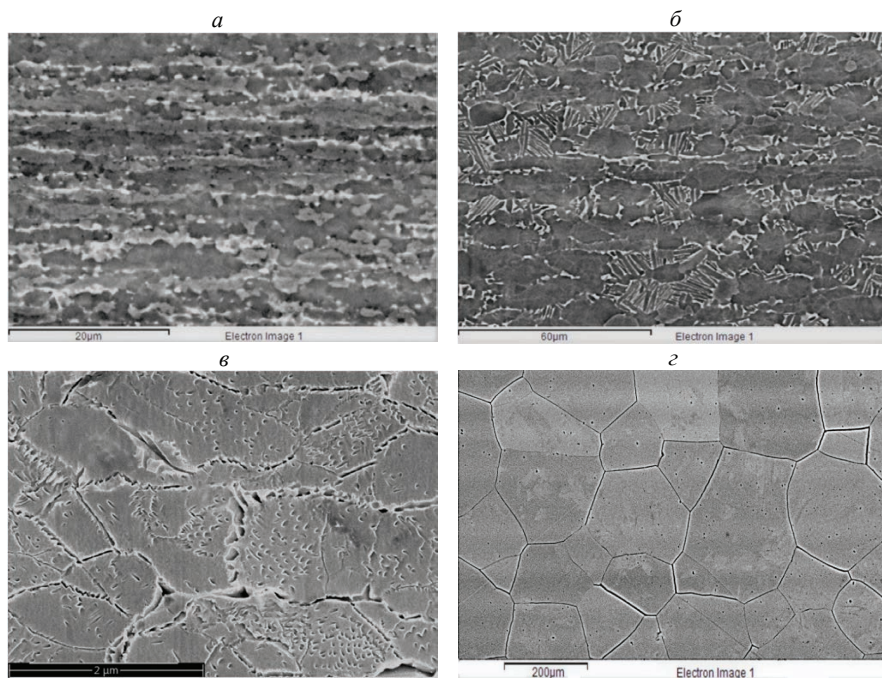


Рис. Микроструктура сплавов в состоянии поставки:

а — сплав TZNA, *б* — сплав Ti-6–4 ELI, *в* — сплав Ti-15Mo, *г* — сплав TNTZS

Полученные в ходе работы данные по значениям модуля упругости, измеренного тремя различными методами (в ходе испытаний на растяжение, при микроиндентировании и ДМА), представлены в табл.

Таблица

Модули упругости (ГПа) сплавов,
полученные различными методиками

Метод исследования	Сплавы			
	TZNA	Ti-6–4 ELI	Ti-15Mo	TNTZS
Растяжение (E)	109	116	87	63
ДМА (E)	114	114	81	63,4
Микроиндентирование (E _r)	111±1	111±4	81±2	62±3

Сравнение полученных по трем различным методикам значений модуля упругости показало, что их можно сопоставлять между собой, так как разница для одного и того же сплава не превышает 2–6 ГПа и находится в пределах погрешности измерений 3–7 % для исследуемых сплавов. Исходя из этого, по нашему мнению, можно проводить сравнение величин модуля упругости, измеренных как с использованием диаграмм растяжения, так и методами динамического механического анализа и микроиндентирования.

Литература

1. Niinomi M. Mechanical properties of biomedical titanium alloys // *Materials Science and Engineering: A*. 1998. V. 243, № 1–2. P. 231–236.
2. Wouters K., Gijssenbergh P., Puers R. Comparison of methods for the mechanical characterization of polymers for MEMS applications // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2011. V. 21, № 115027.