

**ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА  
СВЕРХУПРУГОГО СПЛАВА Ti-Zr-Nb ДЛЯ МЕДИЦИНСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ**

**Шереметьев В.А.<sup>1</sup>, Кудряшова А.А.<sup>1</sup>, Андреев В.А.<sup>2,3</sup>, Галкин С.П.<sup>1</sup>,  
Прокошкин С.Д.<sup>1</sup>, Браиловский В.<sup>4</sup>**

*НИТУ «МИСиС» (Москва, Россия)*

<sup>2</sup>*Промышленный центр «МАТЕК-СПФ» (Москва, Россия)*

<sup>3</sup>*ИМЕТ РАН (Москва, Россия)*

<sup>4</sup>*Ecole de Technologie superieure (Монреаль, Канада)*

*sheremetyev@misis.ru*

За последнее десятилетие интерес ученых к исследованию метастабильных безникелевых сплавов с памятью формы (СПФ) на основе системы Ti-Zr-Nb для биомедицинских применений значительно возрос. Благодаря уникальной комбинации низкого модуля Юнга (40-60 ГПа), сверхупругого поведения, близкого к поведению кости, и наличию в химическом составе только нетоксичных компонентов эти сплавы рассматриваются как наиболее перспективные материалы для изготовления костных имплантатов [1-3].

Термомеханическая обработка (ТМО) является эффективным инструментом для управления структурно-фазовым состоянием СПФ [4]. С помощью ТМО можно одновременно достигать двух целей: а) получение требуемых заготовок для изготовления имплантатов и б) обеспечение наилучшей комбинации механических и функциональных свойств этих заготовок путем формирования структуры материала. Высокотемпературная ТМО, сочетающая радиально-сдвиговую прокатку (РСП) и ротационную ковку (РК), эффективна для получения высококачественных длинномерных прутков круглого сечения из СПФ на основе Ti-Zr-Nb [5, 6]. Применение РСП позволяет преобразовать слиток в пруток диаметром до 10-12 мм наряду с измельчением структуры и уплотнением металла по всему сечению проката [7]. С помощью последующей РК можно получать прутки диаметром 3-8 мм (что соответствует размерному ряду прутков необходимых при производстве имплантатов) с дополнительным выравниванием структуры металла по поперечному сечению.

В данной работе слиток сплава Ti-18Zr-14Nb (в ат. %) (TZN) диаметром 50 мм, длиной 660 мм и массой около 10 кг был выплавлен методом вакуумной индукционной плавки в компании «Flowserve Corporation» (США). Полученный слиток подвергся горячему изостатическому прессованию при температуре 900 °С и давлении 100 МПа в течении 2 часов. После обработки в газостате проводилась обточка слитка до  $\varnothing$  44,9 мм. Горячая радиально-сдвиговая прокатка слитков  $\varnothing$  44,9 мм до прутка  $\varnothing$  12,7 мм осуществлялась в условиях НПЦ ОМД НИТУ «МИСиС» на мини-станах 14-40 и 10-30 при температуре 900 °С. Полученные прутки подвергались ротационной ковке до  $\varnothing$  7,2 мм при температуре 800 °С.

Изменения фазового состава, микроструктуры, кристаллографической текстуры, механических свойств и особенностей функционального усталостного поведения изготовленных прутков изучали после каждого технологического шага. Теоретический предел обратимой деформации был рассчитан с учетом данных кристаллографической текстуры.

Радиально-сдвиговая прокатка приводит к образованию неоднородной микроструктуры вдоль поперечного сечения деформированного прутка. Динамически рекристаллизованная структура ( $d \approx 25$  мкм) с текстурой  $\langle 111 \rangle$  в направлении вытяжки формируется в крайней зоне прутка. По мере приближения к центральной области, размер зерна увеличивается до  $d \approx 130$  мкм, динамически рекристаллизованная структура заменяется динамически полигонизированной субструктурой, а кристаллографическая текстура становится смешанной. В этом структурном состоянии сплав показывает самую высокую пластичность ( $\delta = 27-37\%$ ), что свидетельствует о его хорошей деформируемости.

В результате последующей ротационнойковки в сплаве формируется смешанная динамически полигонизированная и рекристаллизованная структура  $\beta$ -фазы и более однородное распределение размера зерна ( $d \approx 34-43$  мкм) в поперечном сечении.

Определяется слабая текстура с максимальной интенсивностью в направлении [212]<sub>β</sub>. В этом структурном состоянии сплав демонстрирует высокий теоретический предел обратной деформации, около 5% и лучшую комбинацию механических свойств для имплантатов: низкий модуль Юнга ( $E=41$  ГПа), высокую упругую деформацию (1,51 %), превосходное функциональное усталостное поведение и низкий уровень накопленной деформации.

*Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект No 18-79-00247).*

Список использованных источников

- [1] M. Geetha, A.K. Singh, R. Asokamani, A.K. Gogia, Progress in Materials science, 54(3) (2009) 397-425.
- [2] A. Biesiekierski, J. Lin, K. Munir, S. Ozan, Y. Li, C. Wen, Scientific Reports 8(1) (2018)
- [3] Hee Young Kim, Jie Fu, Hirobumi Tobe, Jae Il Kim, Shuichi Miyazaki, Crystal structure, transformation strain, and Superelastic property of Ti-Nb-Zr and Ti-Nb-Ta alloys, Shape Memory and Superelasticity, 2015, v.1, issue 2, pp. 107-116.
- [4] V. Sheremetyev, V. Brailovski, S. Prokoshkin, K. Inaekyan, S. Dubinskiy, Mater. Sci. Eng. C 58 (2016) 935-944.
- [5] V. Sheremetyev, A. Kudryashova, S. Dubinskiy, S. Galkin, S. Prokoshkin, V. Brailovski, Journal of Alloys and Compounds, 737 (2018) 678-683.
- [6] Шереметьев В.А., Кудряшова А.А., Суан Та Динь, Галкин С.П., Прокошкин С.Д., Браиловский В. Перспективная технология получения прутков из сверхупругого сплава Ti-Zr-Nb медицинского назначения на основе сочетания радиально-сдвиговой прокатки и ротационнойковки. *Металлург*, 2019, №1, 45-52.
- [7] S.P. Galkin, B.A. Romantsev, E.A. Kharitonov, CIS Iron Steel Rev. 9 (2014) 35-39.