

**ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ РОТАЦИОННОЙ КОВКИ В СХЕМЕ
ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СПЛАВА
Ti-18Zr-14Nb (В АТ. %)**

**Кудряшова А.А.¹, Шереметьев В.А.¹, Лукашевич К.Е.¹, Галкин С.П.¹,
Прокошкин С.Д.¹, Браиловский В.²**

¹НИТУ «МИСиС» (Москва, Россия)

²Ecole de Technologie superieure (Монреаль, Канада)
kudryashova@misis.ru

Получение высококачественных длинномерных прутковых заготовок для изготовления ортопедических имплантатов является актуальной задачей медицинского металловедения. К материалу имплантата предъявляются требования по биохимической и биомеханической совместимости с костной тканью. Входящие в сплав компоненты не должны вызывать отрицательной реакции организма человека. Необходима близость механических характеристик материала имплантата к характеристикам костной ткани, а также желательно подобие их поведения во время деформации. Металлический материал, проявляющий низкое значением модуля Юнга (40 – 60 ГПа) и сверхупругое поведение, близкое к поведению костной ткани, будет обладать повышенной биомеханической совместимостью. Безникелевые сплавы с памятью формы (СПФ) на основе системы Ti-Zr-Nb демонстрируют сочетание вышеперечисленных характеристик [1].

Методами термомеханической обработки (ТМО) возможно эффективное управление структурой и функциональными свойствами СПФ. Радиально-сдвиговая прокатка (РСП), как один из инструментов ТМО, эффективна при производстве круглого сортового проката, прутков и заготовок, преимущественно из легированных металлов и сплавов. Применение РСП способствует формированию уникального структурного строения металла путем глубокой проработки его структуры в длинномерных объемах [2]. В результате последующей ротационной ковки (РК) возможно получение прутков диаметром 3...8 мм (что соответствует размерному ряду прутков, необходимых при производстве имплантатов) с дополнительным выравниваем структуры по размеру зерна металла по поперечному сечению [3]. Благодаря наличию в обжимных машинах двух и более кривошипно-шатунных механизмов, равномерно расположенных по периферии механизма обжатия, заготовка обрабатывается одновременно со всех сторон [4].

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 и охлаждения на воздухе, проводилась обточка слитка до \varnothing 44,9 мм. 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. Полученные прутки подвергались ротационной ковке до \varnothing 7,2 мм.

В работе [3] показано, что сочетание методов высокотемпературной термомеханической обработки способствует формированию структуры прутка с однородным по сечению размером зерна.

Для оценки влияния температуры горячей ковки на структуру и свойства материала, проведена дополнительная ТМО по четырем схемам:

1. РК при температуре 600 °С (РК600). Ротационная ковка прутка производилась до \varnothing 2,4 мм за 13 проходов. После каждого прохода пруток помещался в печь с температурой 600 °С для замены бойков под очередное обжатие.

2. РК при температуре 600 °С с последующей РК при комнатной температуре и последеформационный отжиг при температурах от 500 до 700 °С (РК600+ХРК+ПДО500-700). Ротационная ковка прутка производилась до \varnothing 3,2 мм за 8 проходов при температуре 600 °С, затем до \varnothing 2,5 мм за 5 проходов при комнатной температуре.

3. РК при температуре 800 °С (РК800). Ротационная ковка прутка производилась до \varnothing 2,4 мм за 11 проходов. После каждого прохода прутки помещались в печь с температурой 800 °С для замены бойков под очередное обжатие.

4. РК при температуре 800 °С с последующей РК при комнатной температуре (РК800+ХРК+ПДО500-700) и последеформационный отжиг при температурах от 500 до 700 °С. Ротационная ковка прутка производилась до \varnothing 3,3 мм за 8 проходов при температуре 800 °С, затем до \varnothing 2,5 мм за 3 прохода при комнатной температуре.

Структуру полученных прутков исследовали методами световой микроскопии и рентгеноструктурного анализа. Статические испытания на растяжение проводили на образцах прямоугольного сечения размерами 1×1,5×80 мм с длиной рабочей части 50 мм при комнатной температуре на испытательной машине «MTS MiniBionix 858» по схеме «деформация растяжением до разрушения». Функциональные испытания на сверхупругость проводили по схеме «нагружение образца до 0,5% деформации в первом цикле с увеличением нагрузки в каждом последующем цикле на 0,5% до величины деформации 6%».

После горячей РК зеренная структура однородна по сечению прутка. Она представляет собой смесь равноосных зерен со средним размером 8 мкм после РК600 (рисунок 1а) и 24 мкм после РК800 (рисунок 1в). Последующая холодная РК способствует тому, что зерна вытягиваются в направлении прокатки. Средний размер зерна в двух измерениях (в направлении прокатки и перпендикулярно направлению прокатки) составляет 11×7 мкм после РК600+ХРК (рисунок 1б) и 56×33 мкм после РК800+ХРК (рисунок 1г).

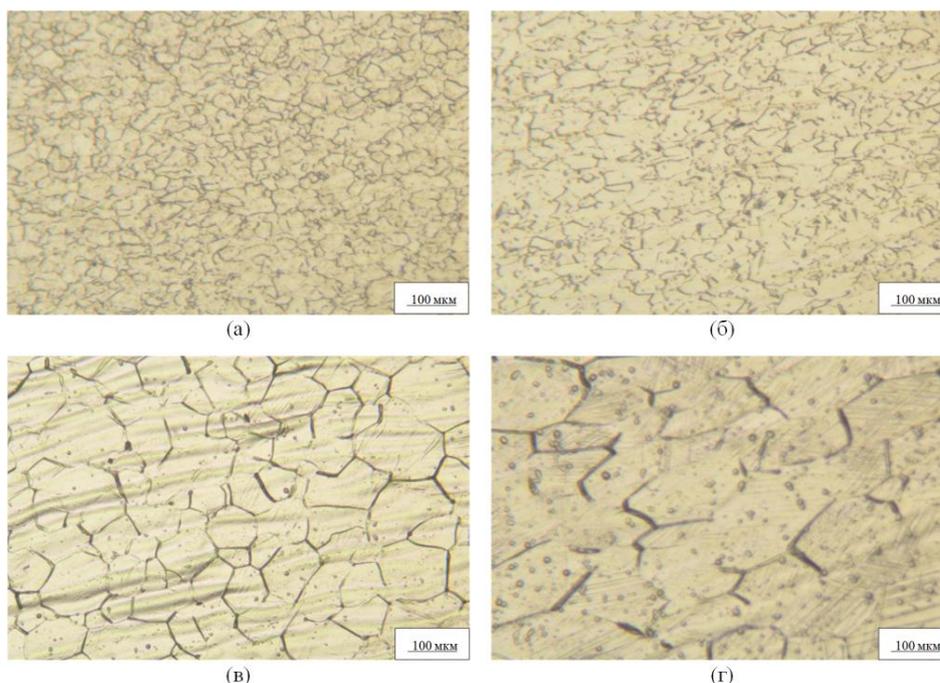


Рисунок 1 - Структура прутка после РК800 (а), РК800+ХРК (б), РК800 (в) и РК800+ХРК (г)

По полученным диаграммам деформации растяжением до разрушения определили условный модуль Юнга E , удлинение до разрыва δ , предел текучести $\sigma_{0,2}$ и предел прочности σ_b (табл.1). Статические испытания на растяжение до разрушения показали, что после РК при 600 °С сплав Ti-Nb-Zr находится в наиболее упроченном состоянии ($\sigma_b=738$ МПа). Минимальной величиной модуля Юнга и максимальной пластичностью ($E=31$ ГПа, $\delta=11\%$) отличается образец сплава после РК800+ХРК+ПДО525. Минимальные пластичность и прочность, а также максимальную величину модуля Юнга ($\delta=4\%$, $\sigma_b=582$ МПа, $E=45$ ГПа) сплав проявляет после РК при 800 °С. При РК800+ХРК+ПДО500 уровень предела текучести выше, чем при других обработках. Для количественной оценки сверхупругости по диаграммам деформации,

полученным в результате функциональных испытаний, была измерена величина обратимой деформации деформация (ε_r^{max}) в каждом цикле [5]. Максимальное значение ε_r^{max} наблюдали после РК600+ХРК+ПДО525.

Таблица 1 - Механические свойства сплава Ti-Zr-Nb после различных режимов термообработки

Режим обработки	E , ГПа	δ , %	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	ε_r^{max} , %
РК600	45	7	442	738	1,0
РК600+ХРК+ ПДО500	41	6	440	722	2,9
РК600+ХРК+ПДО525	37	10	279	636	4,1
РК600+ХРК+ПДО550	40	9	405	675	3,7
РК800	45	4	393	582	2,5
РК800+ХРК+ПДО500	41	8	458	733	2,8
РК800+ХРК+ПДО525	31	11	367	735	3,5
РК800+ХРК+ПДО550	38	8	429	668	3,4
РК800+ХРК+ПДО600	33	7	286	598	3,4

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-38-00470 мол_а).

Список использованных источников

[1] 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.

[2] Реализация инновационного потенциала универсального способа радиально-сдвиговой прокатки / С. П. Галкин, Б. А. Романцев, Е. А. Харитонов. – Черные металлы №1, 2015.

[3] 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.

[4] Ротационная ковка. Обработка деталей на ротационно- и радиально-обжимных машинах / Ю.С. Радюченко. – Москва: Машгиз, 1962.

[5] Muhammad Farzik Ijaz, Hee Young Kim, Hideki Hosoda, Shuichi Miyazaki, Superelastic properties of biomedical (Ti-Zr)-Mo-Sn alloys, *Materials Science and Engineering C*, 2015, v. 48, pp.11-20.