

ВЛИЯНИЕ ТАНТАЛА НА СОДЕРЖАНИЕ ω -ФАЗЫ В СВЕРХУПРУГИХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВАХ

Конопацкий А.С., Жукова Ю.С., Филонов М.Р., Прокошкин С.Д.
НИТУ «МИСис», г. Москва, Россия, E-mail: konopatskiy@misis.ru

Аннотация: проведено исследование влияния легирования сверхупругих титановых сплавов на основе Ti-18Zr-14Nb танталом на содержание в них мелкодисперсной ω -фазы. Установлено, что даже небольшие добавки тантала (до 3%), за счет снижения содержания ниобия приводит к полному подавлению образования атермической ω_{ath} -фазы и существенному снижению содержания изотермической ω_{iso} -фазы.

Введение

В последние годы большое внимание привлекли безникелевые сверхупругие титановые сплавы медицинского назначения, к наиболее перспективным из которых относят сплавы системы Ti-Nb [1-5]. В основе свойства сверхупругости сплавов данной системы лежит обратимое мартенситное превращение высокотемпературной β -фазы в низкотемпературную α'' -фазу. Критерием оценки сверхупругого поведения сплава можно считать кристаллографический ресурс обратимой деформации, показывающий максимально возможную деформацию решетки β -фазы при мартенситном превращении. Было показано, что в сплавах этой системы с повышенным содержанием циркония достигаются высокие значения величины обратимой деформации [6]. К особенностям сплавов системы Ti-Nb является образование в них вторичной мелкодисперсной ω -фазы, способной приводить к нежелательному охрупчиванию материала [8, 9]. По этой причине контроль образования этой фазы является важной практической задачей.

Материалы и методы

Для исследования были выбраны следующие сплавы: Ti-18Zr-14Nb (18-14), Ti-18Zr-14Nb-1Ta (18-14-1), Ti-18Zr-13Nb-1Ta (18-13-1), Ti-18Zr-13Nb-2Ta (18-13-2), Ti-18Zr-12Nb-2Ta (18-12-2) и Ti-18Zr-11Nb-3Ta (18-11-3). В качестве сплава сравнения был выбран хорошо изученный ранее Ti-22Nb-6Zr (22-6) (здесь и далее состав приведен в ат. %, в скобках приведены условные обозначения сплавов по легирующим элементам). Слитки были получены методом вакуумно-дугового переплава с нерасходуемым вольфрамовым электродом. Масса каждого слитка составила около 40 г.

Термомеханическую обработку (ТМО) проводили с использованием лабораторных печей *СНОЛ-16251/11-ИЗ* и *Borel KN 1050-320*. В качестве режимов ТМО были выбраны: отжиг при температуре 600 °С в течение 30 мин и старение при температуре 300 °С в течение 10 часов.

Рентгенографические исследования проводили на дифрактометре *PANalitical X'Pert PRO* в $CuK\alpha$ -излучении при комнатной температуре, а также в температурной камере *ТТК 450* при минус 160 °С.

Результаты и обсуждение

Согласно рентгенограммам, полученным при комнатной температуре и -160 °С на образцах сплавов, подвергнутых отжигу при 600 °С в течение 30 мин, глубокое охлаждение ведет к формированию атермической ω_{ath} -фазы, которая растворяется при нагреве до комнатной температуры, как это показано на рисунке 1 (I), (II).

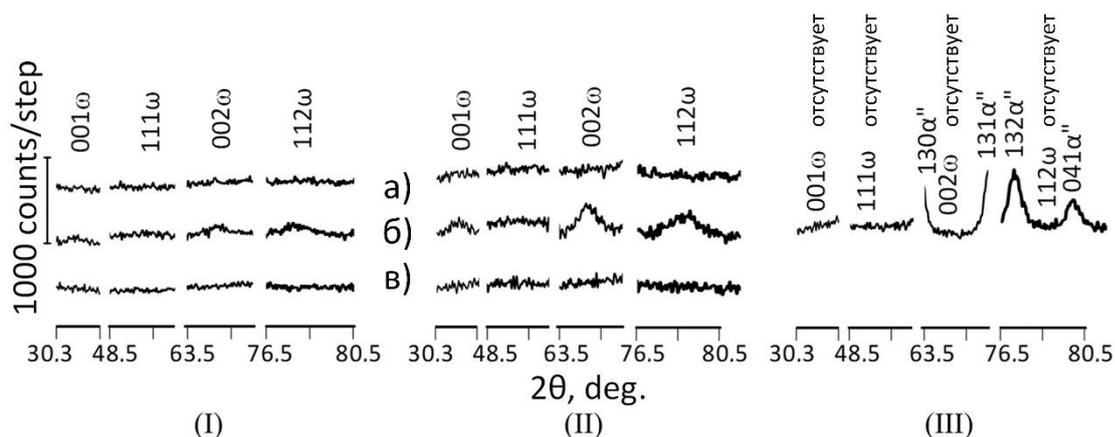


Рисунок 1 – Фрагменты рентгенограмм, демонстрирующих образование атермической ω_{ath} -фазы в условиях глубокого охлаждения и ее растворение при нагреве до комнатной температуры. (I) – 18-14, (II) – 18-14-1, (III) – 18-11-3; а) при комнатной температуре, б) при -160°C , в) при комнатной температуре после отогрева от -160°C

Согласно рисунку 1, на котором представлены фрагменты рентгенограмм, полученных при -160°C , повышение концентрации тантала ведет к снижению склонности сплавов к выделению атермической ω_{ath} -фазы, причем в сплаве 18-11-3 она не образуется вовсе.

Рентгенографические данные, полученные на образцах сплавов, подвергнутых старению при 300°C в течение 10 часов, позволили построить зависимость отношения суммарной интегральной интенсивности ω_{iso} и β -фаз от концентрации тантала в различных сплавах (рис.2).

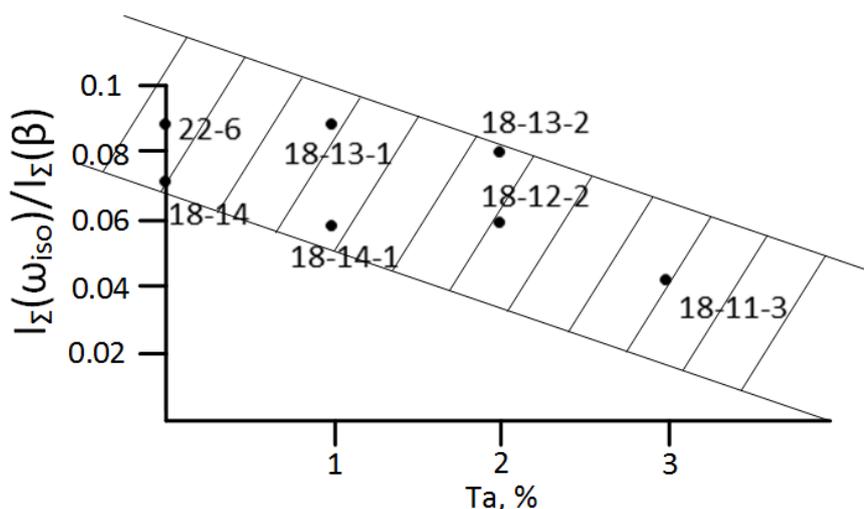


Рисунок 2 – Зависимость отношения относительной суммарной интенсивности ω_{iso} - и β -фаз $I_{\Sigma}(\omega_{iso})/I_{\Sigma}(\beta)$ соответственно от концентрации Ta в сплавах

Из приведенной зависимости видно, что образование изотермической ω_{iso} -фазы заметно подавляется с ростом содержания в сплавах тантала. Таким образом добавки тантала приводят к подавлению образования ω -фазы как по изотермическому так и по атермическому механизму. Данный эффект может являться прямым следствием того, что тантал замедляет процессы диффузии в титановых сплавах, снижая подвижность атомов и препятствуя релаксации микронапряжений. Однако данное предположение неприменимо к вопросу образования атермической ω_{ath} , образующейся в условиях глубокого охлаждения, когда в целом диффузией можно пренебречь. Таким образом механизм влияния тантала на подавление атермической ω_{ath} требует дополнительного исследования.

Расчет параметров решетки гексагональной ω_{ath} - и ω_{iso} фаз подтвердил, что в пределах ошибки они обладают одинаковым характеристическим параметром

$c/a=0.613\pm 0.003$. Полученные результаты подтверждают, что ω_{ath} и ω_{iso} представляют собой одну и ту же фазу, имеющую различную кинетику процессов релаксации.

Заключение

Показано, что легирование сверхупругих сплавов системы Ti-Nb-Zr танталом ведет к подавлению образования как атермической, так и изотермической ω -фазы. Установлено, что ω_{ath} и ω_{iso} представляют собой одну и ту же фазу.

Список литературы:

1. P.J.S. Buenconsejo, H.Y. Kim, H. Hosoda, S. Miyazaki, Shape memory behavior of Ti-Ta and its potential as a high-temperature shape memory alloy, *Acta Mater.* 57 (4) (2009) 1068–1077.
2. J. Fu, H.Y. Kim, S. Miyazaki, Effect of annealing temperature on microstructure and superelastic properties of a Ti-18Zr-4.5Nb-3Sn-2Mo alloy, *J. Mech. Behav. Biomed.* 65 (1) (2017) 716–723.
3. I.Yu. Khmelevskaya, I.B. Trubitsyna, S.D. Prokoshkin, S.V. Dobatkin, V.V. Stolyarov, E.A. Prokofjev, Thermomechanical treatment of Ti-Ni-based shape memory alloys using severe plastic deformation, *Mat. S. Forum* 426–432 (3) (2003), 2765–2770.
4. S.D. Prokoshkin, I.Yu. Khmelevskaya, S.V. Dobatkin, I.B. Trubitsyna, E.V. Tatyandin, V.V. Stolyarov, E.A. Prokofiev, Alloy composition, deformation temperature, pressure and post-deformation annealing effects in severely deformed Ti-Ni based shape memory alloys, *Acta Mater.* 53 (9) (2005) 2703–2714.
5. V. Brailovski, S.D. Prokoshkin, I.Yu. Khmelevskaya, K. Inaekyan, V. Demers, S.V. Dobatkin, E.V. Tatyandin, Structure and properties of the Ti50.0at%Ni alloy after strain hardening and nanocrystallizing processing, *Thermomechanical Mat. Trans.* 47 (2006) 795–804.
6. S.D. Prokoshkin, V. Brailovski, K. Inaekyan, V. Demers, I.Yu. Khmelevskaya, S.V. Dobatkin, E.V. Tatyandin, Structure and properties of severely cold-rolled and annealed Ti-Ni shape memory alloys, *Mat. Sci. Eng. A* 481–482 (2008) 114–118.
7. H.Y. Kim, J.F., H. Tobe, J.I. Kim, S. Miyazaki, Crystal structure, transformation strain, and superelastic property of Ti-Nb-Zr and Ti-Nb-Ta alloys, *Shape Memory Superelasticity* 1 (2015) 107–116.
8. K. Inaekyan, V. Brailovski, S. Prokoshkin, V. Pushin, S. Dubinskiy, V. Sheremetyev, Comparative study of structure formation and mechanical behavior of age-hardened Ti-Nb-Zr and Ti-Nb-Ta shape memory alloys, *Mater. Charact.* 103 (2015) 65–74.
9. S.M. Dubinskiy, V. Brailovski, S.D. Prokoshkin, V. G. Pushin, K. Inaekyan, V. Sheremetyev, M.I. Petrzhih, M. Filonov, Structure and Properties of Ti-19.7Nb-5.8Ta Shape Memory Alloy Subjected to Thermomechanical Processing Including Aging, *J. Mater. Eng. Perform.* 22(9) (2013) 2656–2664.