

УДК 669.017

ФОРМИРОВАНИЕ НАНОСТРУКТУРЫ НИКЕЛИДА ТИТАНА В РЕЗУЛЬТАТЕ КВАЗИ-НЕПРЕРЫВНОЙ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ*

*Хмелевская И.Ю.¹, к.т.н., ведущий научный сотрудник кафедры
обработки металлов давлением (khmel@tmo.misis.ru)*

Кавалла Р.², доктор-инженер, профессор, директор института обработки металлов давлением

Комаров В.С.¹, аспирант (komarov@misis.ru)

¹Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
(119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4)

²Технический университет Фрайбергская горная академия (TUBAF)
(09599, Германия, Freiberg, Bernhard-von-Cotta-Str., 4)

Аннотация. Интенсивная пластическая деформация, формирующая ультрамелкозернистую структуру (наносубзеренную или нанокристаллическую), является одним из наиболее эффективных методов повышения функциональных свойств сплавов с памятью формы на основе Ti–Ni. Интенсивная пластическая деформация сплава Ti–50,0 ат. % Ni впервые была выполнена на многоосевом деформационном модуле MaxStrain, входящем в систему Gleeble, при температурах 400, 370, 350, 330 °С. Кинетику мартенситных превращений исследовали методом дифференциальной сканирующей калориметрии, структурные изменения изучали, используя рентгеновский дифрактометр и просвечивающую электронную микроскопию. Понижение температуры деформации с 370 до 330 °С и увеличение накопленной деформации с 4,5 до 9,5 приводит к измельчению элементов структуры и формированию смешанной наносубзеренной и нанокристаллической структур с высокой степенью дислокаций и средним размером зерна/субзерна 85 нм после максимальной деформации при наиболее низкой температуре 330 °С.

Ключевые слова: сплавы с памятью формы, СПФ, никелид титана, термомеханическая обработка, интенсивная пластическая деформация, ИПД, нанокристаллическая структура, MaxStrain, функциональные свойства.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-1-69-71

Структура, формирующаяся в сплавах с памятью формы (СПФ) на основе никелида титана TiNi в результате интенсивной пластической деформации (ИПД), зависит от применяемой схемы деформации и режимов термомеханической обработки (ТМО) [1, 2]. В работах [3, 4] для получения наносубзеренной (НСС), нанокристаллической (НКС) и смешанной (НСС + НКС) структур в СПФ Ti–Ni была использована ТМО, включавшая холодную прокатку с деформацией от 0,3 до 1,9 и последеформационный отжиг при 300–400 °С. В результате формирования НКС с оптимальным размером зерен (65 ± 15 нм) на сплаве Ti–50,0 ат. % Ni удалось достигнуть рекордных значений реактивного напряжения (1420 МПа) и полностью обратимой деформации (8 %). Наиболее высокий комплекс усталостных функциональных свойств в условиях термомеханического и сверхупругого циклирования был получен в случае формирования смешанной НС + НК структуры [5].

Указанные результаты были получены в прокатанной проволоке сечением менее 1 мм². В то же время задача получения объемных наноструктурных СПФ

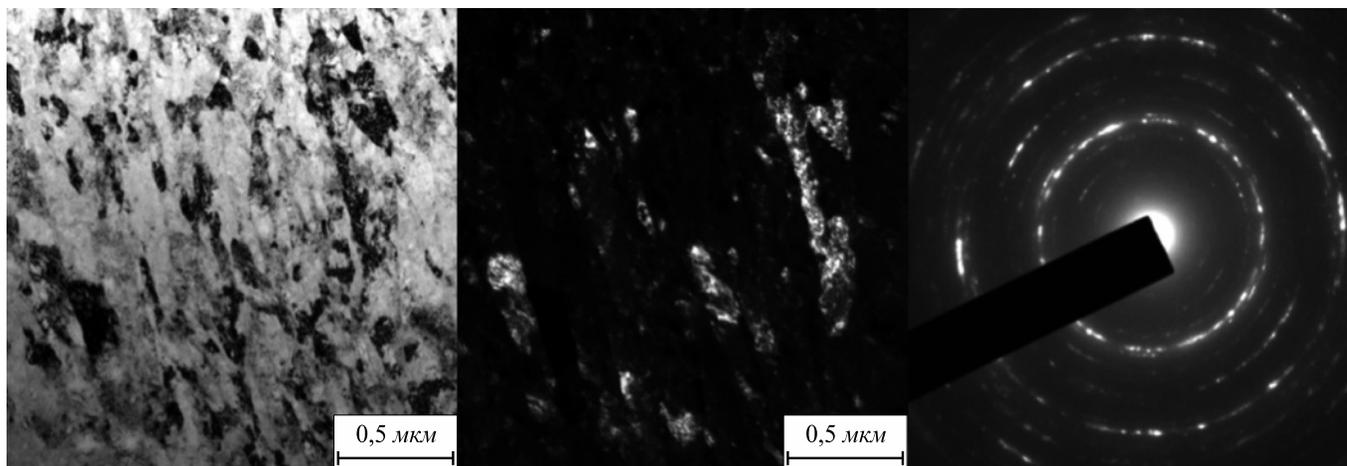
Ti–Ni оставалась нерешенной, поскольку для этого требуется обеспечить непрерывную изотермическую деформацию при 300–400 °С [6].

В настоящей работе с целью получения наноструктуры в объемных образцах СПФ Ti–Ni использовали деформационный модуль MaxStrain (MS) в составе комплекса Gleeble 3500, на котором осуществляли квази-непрерывную многоосевую изотермическую деформацию образцов размером 10×10×10 мм³ в интервале 400–330 °С. Накопленная деформация составляла 4,6–9,5.

Электронномикроскопическое исследование (JEM 2100) выявило после MS по всем режимам смешанную структуру, состоящую из зерен и субзерен, которым отвечают соответственно разбросанные по кольцу точечные рефлексы и дискретные или непрерывные дуговые рефлексы (см. рисунок).

Понижение температуры деформации до 330 °С с одновременным увеличением степени деформации до 9,5 привело к уменьшению размера зерен/субзерен по нормали к плоскости последнего обжатия с 160 до 85 нм. Получение смешанной НК + НС структуры сплава Ti–50,0 % Ni обещает в перспективе существенное повышение комплекса его функциональных свойств в объемных образцах.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (уникальный идентификатор проекта RFMEFI57514X0094).



Структура сплава Ti – 50,0 % Ni, подвергнутого MS-деформации (9,5) при 330 °С.

Просвечивающая электронная микроскопия, слева направо: светлопольное, темнопольное изображения и дифракционная картина

Structure of Ti – 50.0 % Ni alloy after MS-deformation (9.5) at 330 °C.

Transmission electron microscopy, from left to right: bright field, dark-field images and the diffraction pattern

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Shape memory alloys: fundamentals, modeling and applications / V. Brailovski, S. Prokoshkin, P. Terriault, F. Trochu. – Montreal: ETS Publ., 2003. – 851 p.
2. Resnina N., Rubanik V. (Eds). Shape memory alloys: properties, technologies, opportunities. – Zurich: TransTech Publications, 2015. – 640 p.
3. Brailovski V., Prokoshkin S., Khmelevskaya I. etc. Structure and properties of the Ti – 50.0 at. % Ni alloy after strain hardening and nanocrystallizing thermomechanical processing // Materials Transactions. 2006. Vol. 47. P. 795 – 804.
4. Prokoshkin S., Brailovski V., Inaekyan K. etc. Structure and properties of severely cold-rolled and annealed Ti – Ni shape memory alloys // Mater. Sci. Eng.A. 2008. Vol. 481 – 482. P. 114 – 118.
5. Brailovski V., Prokoshkin S., Inaekyan K., Demers V. Functional properties of nanocrystalline, submicrocrystalline and polygonized Ti–Ni alloys processed by cold rolling and post-deformation annealing // Journal of Alloys and Compounds. 2011. Vol. 509. No. 5. P. 2066 – 2075.
6. Prokoshkin S.D., Khmelevskaya I. Yu., Dobatkin S.V. etc. Alloy composition, deformation temperature, pressure and post-deformation annealing effects in severely deformed Ti – Ni based shape memory alloys // Acta Materialia. 2005. Vol. 53. P. 2703 – 2714.

Поступила 12 ноября 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. VOL. 59. NO. 1, pp. 69–71.

FORMATION OF NANOSTRUCTURE IN TITANIUM NICKELIDE AS A RESULT OF QUASI-CONTINUOUS ISOTHERMAL DEFORMATION

I.Yu. Khmelevskaya¹, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher of the Chair “Metal Forming” (khmel@tmo.misis.ru)

R. Kavalla², Director of Metalforming Institute, Dr. Sci. (Eng.), Professor

V.S. Komarov¹, Postgraduate (komarov@misis.ru)

¹ National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS) (4, Leninskii ave., Moscow, 119049, Russia)

² Technische Universität Bergakademie Freiberg (Deutschland, Bernhard-von-Cotta-Str., 4, 09599, Freiberg)

from 4.5 to 9.5 leads to a refinement of the structural elements and formation of mixed nanosubgraine and nanocrystalline structure with high dislocation density and average grain/subgrain size of 85 nm after deformation at the lowest temperature 330 °C with the highest strain.

Keywords: shape memory alloys, SMA, titanium nickelide, thermomechanical treatment, severe plastic deformation, severe plastic deformation (SPD), nanocrystalline structure, MaxStrain, functional properties.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-1-69-71

REFERENCES

1. Brailovski V., Prokoshkin S., Terriault P., Trochu F. *Shape memory alloys: fundamentals, modeling and applications*. ETS Publ., Montreal, 2003, 851 p.
2. Resnina N., Rubanik V. (Eds). *Shape memory alloys: properties, technologies, opportunities*. Trans Tech Publications, Zurich, 2015, 640 p.
3. Brailovski V., Prokoshkin S., Khmelevskaya I. et al. Structure and properties of the Ti – 50.0 at. % Ni alloy after strain hardening and

nanocrystallizing thermomechanical processing. *Materials Transactions*, 2006, vol. 47, pp. 795–804.

4. Prokoshkin S., Brailovski V., Inaekyan K. et al. Structure and properties of severely cold-rolled and annealed Ti–Ni shape memory alloys. *Mater. Sci. Eng. A*, 2008, vol. 481–482, pp. 114–118.
5. Brailovski V., Prokoshkin S., Inaekyan K., Demers V. Functional properties of nanocrystalline, submicrocrystalline and polygonized Ti–Ni alloys processed by cold rolling and post-deformation annealing. *Journal of Alloys and Compounds*, 2011, vol. 509, no. 5, pp. 2066–2075.

6. Prokoshkin S.D., Khmelevskaya I.Yu., Dobatkin S.V. et al. Alloy composition, deformation temperature, pressure and post-deformation annealing effects in severely deformed Ti–Ni based shape memory alloys. *Acta Materialia*, 2005, vol. 53, pp. 2703–2714.

Acknowledgements. The work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (the unique identifier of the project RFMEFI57514X0094).

Received November 12, 2015
