



УДК 669.018.2

ФУНКЦИОНАЛЬНО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО НИКЕЛИДА ТИТАНА

А.Б.Бондарев*, М.А.Хусаинов, В.А.Андреев*, Г.В.Пластинина, А.А.Потапова**

Политехнический институт НовГУ, Mikhail.Khusainov@novsu.ru

* Промышленный центр «МАТЭКС», Москва, andreev.icmateks@gmail.com

** Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, ls3216@yandex.ru

Проведены экспериментальные исследования функциональных свойств и структуры наноструктурированного сплава Ti-Ni с эффектом памяти формы мало изученным методом электропластического деформирования (ЭПД) на прокатном двухвалковом стане. Установлена высокая чувствительность сплава к хрупкому разрушению после ЭПД. Показано, что после отжига при температуре ниже порога рекристаллизации сплав хорошо деформируется, проявляя все присущие ему функциональные свойства в области положительных температур.

Ключевые слова: наноструктурирование, электропластическое деформирование, порог рекристаллизации, функциональные свойства, эффект памяти формы

Experimental researches on functional properties and structure of nanopatterned Ti-Ni shape memory alloy by the poorly studied method of electro-plastic deforming (EPD) are carried out on a two-high rolling mill. The alloy high responsivity to brittle fracture after EPD is found out. It is shown that the alloy deformed well at the temperature below the recrystallization threshold after annealing and exerted its functional properties in the range of positive temperatures.

Keywords: nanopattering, electro-plastic deforming, recrystallization threshold, functional properties, shape memory effect

В настоящее время большой интерес представляют объемные наноструктурированные материалы со средним размером зерен меньше 100 нм [1]. Существует несколько методов деформационного наноструктурирования металлов и сплавов. Одним из наиболее прогрессивных методов является равноканальное прессование [2]. Другой метод реализует условия интенсивной пластической деформации [3]. Развиваются и другие методы наноструктурирования. Одним из них является электропластическое деформирование (ЭПД), которое позволяет измельчить микроструктуру до наноразмерных зерен [4].

Целью данной работы является анализ функционально-механических свойств никелида титана с

эффектом памяти формы, полученного методом электропластической прокатки. В качестве исследуемого материала использовалась проволока диаметром 6 мм из сплава Ti-50,4ат.%Ni, полученная прокаткой на двухвалковом стане при плотности однополярного импульсного тока $I = 90 \pm 5$ А/мм² и длительности импульса $80 \cdot 10^{-6}$ с. Истинная деформация определялась из выражения $e = \ln(d_n^2/d_k^2)$, где d_n и d_k — диаметр прутка до и после прокатки соответственно. Деформация образцов после прокатки соответствовала $e = 0,44$. Исследования микроструктуры и механических свойств проводились на образцах после прокатки и после отжига при температуре 420°C в течение одного часа.

Характерным для всех образцов после ЭПД является чрезвычайно высокая чувствительность к хрупкому разрушению. Фрактографические исследования, выполненные с помощью оптического микроскопа Альтами МЕТ-3, показали, что поверхность излома состоит из многочисленных ступенек скала с отдельными участками вязкого разрушения. После отжига при 420°C, 1 час, сплав становится пластичным. Проявляется как фазовая пластичность, так и дислокационная. Доля упругой деформации достаточно высокая. При величине предварительной деформации 8-10% упругая часть составляет 1,5-2%, а деформация эффекта памяти формы — 6-7%. Температуры мартенситных превращений определялись методом трехточечного изгиба с записью термомеханического гистерезиса на компьютере (рис. 1).

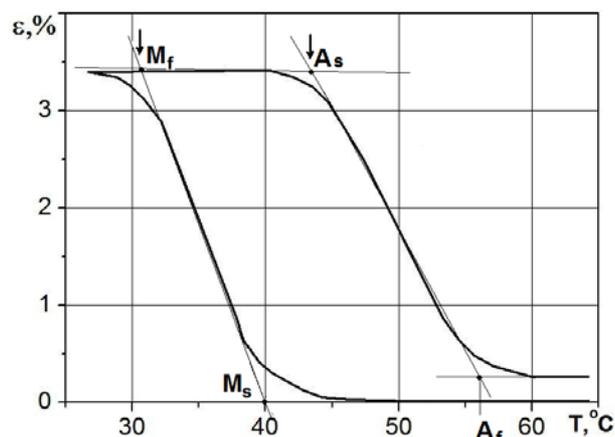


Рис.1. Термомеханический гистерезис мартенситных превращений наноструктурированного сплава Ti-50,4ат.%Ni

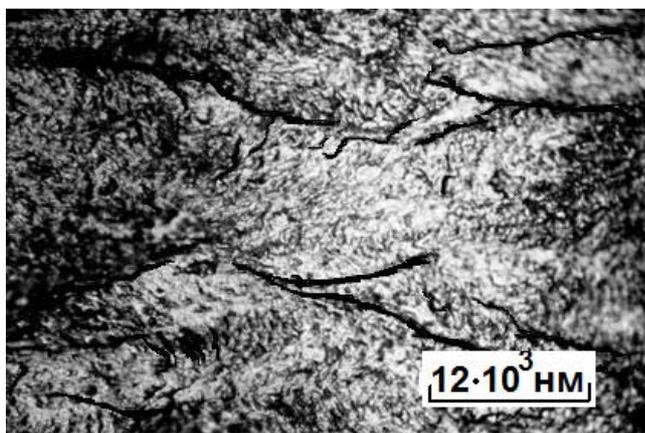


Рис.2. Микроструктура в продольном сечении образца после ЭПД

Отличительным признаком представленной диаграммы является малая ширина петли гистерезиса (18°C), рассчитанная по формуле $\Delta T = ((A_s - M_f) + (A_f - M_s))/2$, по сравнению со сплавами, полученными по традиционной технологии ($\Delta T \approx 40^\circ\text{C}$). Твердость образцов после электропластического деформирования по шкале HRA составляет 70 единиц, а после отжига твердость снижается до уровня HRA62, в то время как микротвердость после отжига возрастает с $390\text{--}400\text{ кг/мм}^2$ до $470\text{--}500\text{ кг/мм}^2$. Снижение макротвердости, надо полагать, обусловлено заметной релаксацией внутренних напряжений в объеме сплава, а некоторое повышение микротвердости после отжига можно связать с неравновесной структурой границ зерен и полями внутренних напряжений, ими создаваемыми [5]. Анализ микроструктуры, выполненный на оптическом микроскопе, показал, что в исходных образцах (после ЭПД) наблюдается полосчатость в направлении прокатки (рис.2).

Деформационные полосы достаточно широкие — $(25\div 55)\cdot 10^3\text{ нм}$, их границы размытые. Это свидетельствует о сильной пластической деформации, созданной прокаткой в электрическом поле. После отжига микроструктура становится зернистой (рис.3). Границы зерен имеют специфическую неравновесную структуру, связанную, как это показано в работе [5], с дислокациями, внесенными в них в процессе пласти-

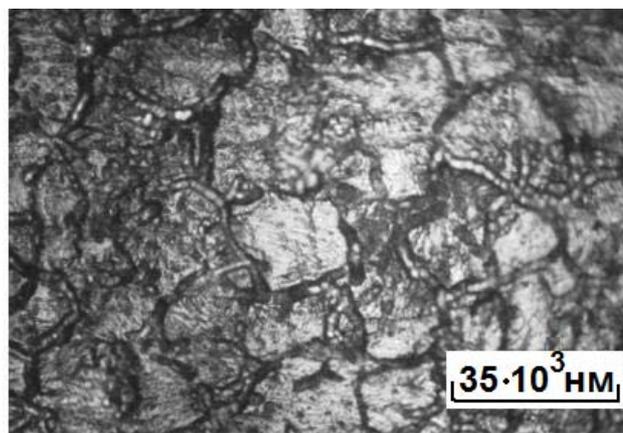


Рис.3. Микроструктура в продольном сечении образца после ЭПД и последующего отжига 420°C , 1 ч

ческой деформации. Средний размер зерен в продольном сечении образца составляет $35\cdot 10^3\text{ нм}$, в поперечном — $15\cdot 10^3\text{ нм}$. Внутри отдельных зерен при $800\text{--}1200$ -кратном увеличении выявляются линии скольжения и полосы темного контраста, предположительно двойникового мартенсита. Сверхструктурные рефлексы, показанные на электронограмме (рис.4), снятой на электронном микроскопе JEM-2100, надо полагать, обусловлены образованием промежуточной фазы *R*-мартенсита. Прямым доказательством этого является приведенная дифрактограмма отожженного образца (рис.5а). Заметное расщепление отражения (110) аустенитной B2-фазы в интервале углов $49\text{--}50$ градусов свидетельствует об образовании промежуточной фазы *R*-мартенсита.

Итак, можно полагать, что видимые в оптическом микроскопе зерна состоят из наноразмерных кристаллитов механического и химического происхождения. Точечные рефлексы на электронограмме (рис.4) отражают сильнофрагментированную структуру сплава с высокой плотностью зернограницных дислокаций и стыковых дисклинаций [6]. Наблюдаемое смещение и уширение линий дифрактограмм (рис.5b) подтверждает тезис о том, что источниками дальнедействующих полей смещения являются дефекты кристаллического строения в виде дислокаций и их скоплений.

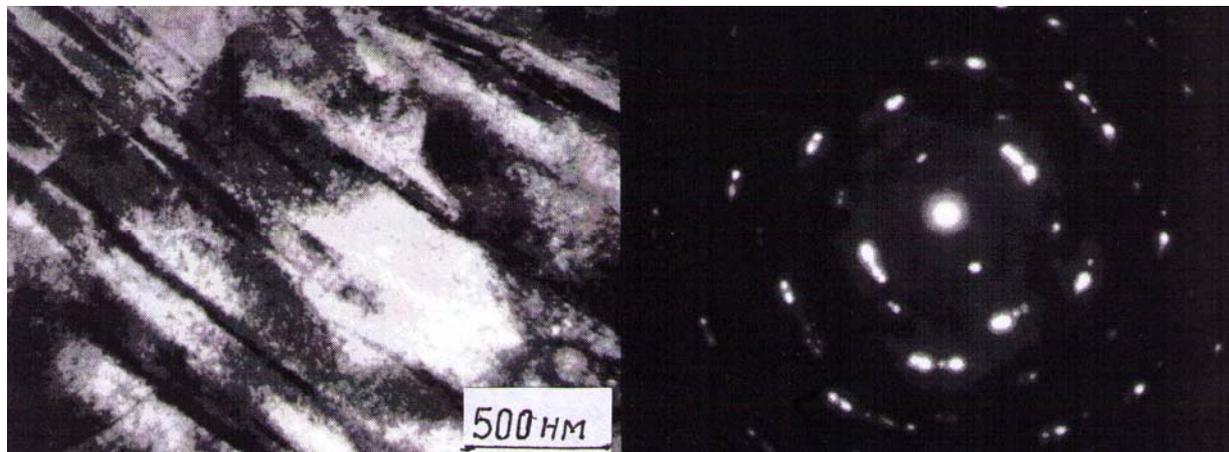


Рис.4. Электронограмма после ЭПД и последующего отжига при 420°C , 1 час

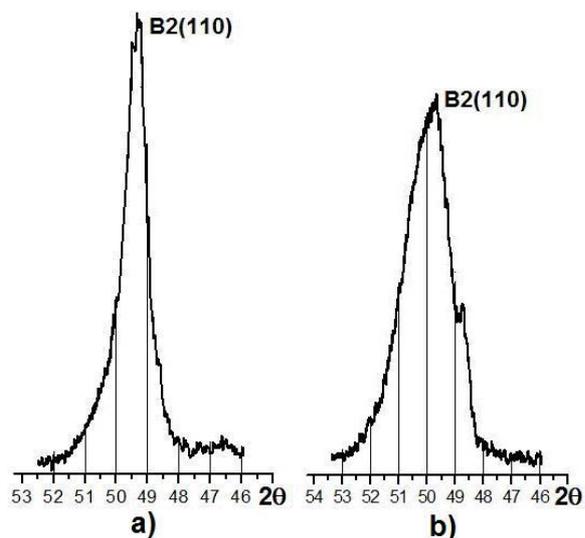


Рис.5. Дифрактограммы сплава Ti-50,4ат.%Ni после ЭПД (а) и отожженного при $T = 420\text{ }^{\circ}\text{C}$, 1 час (б)

Выводы

1. Проведен анализ структурного состояния и функциональных свойств наноструктурированного сплава на основе никелида титана (Ti-50,4ат.%Ni). Показано, что сплав, наноструктурированный путем электропластического деформирования, хрупкий.

Сильная деформация ($e = 0,44$) снижает температуру рекристаллизации на $150\text{-}200\text{ }^{\circ}\text{C}$. В результате отжиг при $420\text{ }^{\circ}\text{C}$, 1 час, приводит к рекристаллизации с формированием однородной структуры.

2. Образцы после ЭПД обладают высокой обратимостью памяти формы (до 7%) и склонностью к формированию двунаправленного эффекта (two-way effect).

3. Узкий гистерезис мартенситного превращения ($25\text{ }^{\circ}\text{C}$) в области положительных температур открывает широкую перспективу для практического использования этих сплавов в технике и медицине.

1. Носкова Н.И., Мулюков Р.Р. Субмикроструктурные и нанокристаллические металлы и сплавы. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. С.279.
2. Валиев Р.З., Корзников А.В., Мулюков Р.Р. Структура и свойства металлических материалов с субмикроструктурной структурой // ФММ. 1992. № 4. С.70-86.
3. Nazarov A.A. and Mulyukov R.R. // Nanoscience, Engineering and Technology Handbook / Eds. Lyshevski S., Brenner D., Iafrate J., Goddard W. CRC Press, 2002. P.22.
4. Stolyarov V., Prokoshkin S. Electroplastic Deformation Effects in Shape Memory TiNi Alloys // Proceedings of the International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies. December 3-5, 2007. Tsukuba, Japan, 2007. P.27-32.
5. Кайбышев О.А., Валиев Р.З. Границы зерен и свойства металлов. М.: Металлургия, 1987. С.213.