

# Влияние электроимпульсной обработки на структуру и механические свойства нанокристаллического сплава TiNi с памятью формы

Столяров В.В.<sup>1,2</sup>

vlstol@mail.ru

<sup>1</sup> Московский государственный индустриальный университет,

<sup>2</sup> Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Россия, Москва

## Effect of electric pulse treatment on the structure and mechanical properties of nanocrystalline TiNi shape memory alloy

V.V. Stolyarov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Moscow State Industrial University

<sup>2</sup> A.A. Blagonravov Institute of Machines Science RAS, Moscow

Исследовано влияние режимов электроимпульсной обработки на структуру, микротвердость и механические характеристики при растяжении наноструктурного сплава с памятью формы  $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$ , полученного электропластической прокаткой. Определены плотность тока и время воздействия, при которых размер зерен в микроструктуре сплава сохраняется в нанометрической области, прочностные характеристики не уменьшаются, а относительное удлинение до разрушения возрастает.

**Ключевые слова:** сплав с памятью формы TiNi, электроимпульсная обработка, наноматериал, пластичность

Influence of regimes of electric pulse treatment on the structure, microhardness and mechanical characteristics during tension of nanostructured  $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$  shape memory alloy obtained by electro-plastic rolling is investigated. Current density and treatment duration were found at which grain size remains in the nanoscale and strength does not reduce, while relative elongation at break increases.

**Keywords:** TiNi shape memory alloy, electric pulse treatment, nanomaterial, plasticity

### 1. Введение

Холодная пластическая деформация приводит к упрочнению, заметному снижению технологической пластичности и деформационной способности материала. Традиционным способом восстановления пластичности между циклами или в конце деформации служит промежуточный или окончательный отжиг в печи [1]. Альтернативным методом отжига является прямое пропускание импульсного тока, часто применяемое для традиционных материалов [2]. Для термически нестабильных ультрамелкозернистых и наноструктурных материалов, полученных интенсивной пластической деформацией (ИПД), выбор условий отжига является особенно важным, чтобы обеспечить сохранение минимального размера зерен. Режим отжига – температура, длительность и внешняя среда, обычно выбираются из соображений получения оптимального сочетания проч-

ности и пластичности. В этой связи в работе исследуется возможность применения импульсного тока вместо термической обработки в печи для наноструктурного сплава TiNi с памятью формы, полученного интенсивной электропластической прокаткой (ЭПП).

### 2. Материал и методы обработки

Объектом исследований служил сплав химического состава  $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$  (ЗАО «Промышленный центр МТЭКС») в виде полосы размером  $0.41 \times 10 \times 50$  мм<sup>3</sup>, полученной методом ЭПП [3] с накопленной степенью деформации  $\epsilon = 1,5-1,8$ . Прокатка проводилась при комнатной температуре со скоростью 3,5 см/сек в пошаговом режиме при регулируемом разовом обжатии по толщине 25 мкм и контролируемых режимах импульсного тока: плотности 120 А/мм<sup>2</sup>, частоте 1000 Гц, длительности 10-1000 мкс. После каждого шага прокатки образцы охлаждались в

воде. Истинная деформация при прокатке  $e$  вычислялась по формуле:

$$e = \ln \delta_0 / \delta_k, \quad (1)$$

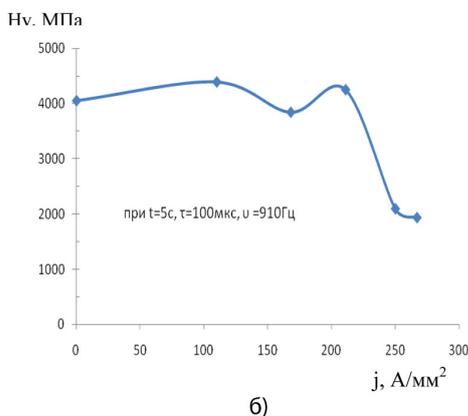
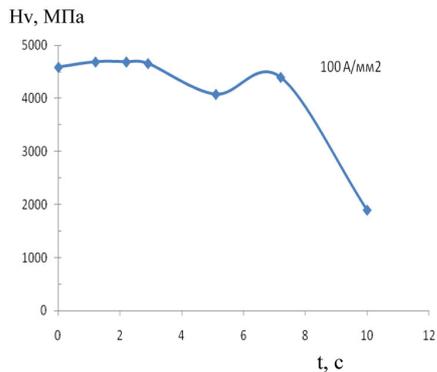
где  $\delta_0$  – начальная толщина образца,  $\delta_k$  – толщина прокатанного образца.

Электроимпульсную обработку выполняли в интервале плотностей тока 0-260 А/мм<sup>2</sup> с длительностью воздействия от 1 до 10 с. Микротвердость определяли на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 100 г. Механические испытания на растяжение проводили по ГОСТ 11701-84 на горизонтальной машине ИМ-5081. Структуру исследовали методом тонких фольг на просвечивающем электронном микроскопе JEM-2000

### 3. Результаты эксперимента и их обсуждение

Полоски деформированного сплава подвергались обработке импульсным током разной плотности и длительности воздействия, после чего проводились исследования микротвердости, микроструктуры и механических свойств.

На рис.1 а, б показаны зависимости микротвердости от длительности воздействия при постоянной плотности тока 100 А/мм<sup>2</sup> и от плотности тока при постоянной длительности 5 с.



**Рис. 1.** Зависимость микротвердости сплава от времени воздействия (а) и плотности тока (б).

Общим для обеих кривых является двукратное снижение исходной микротвердости, вызванное рекристал-

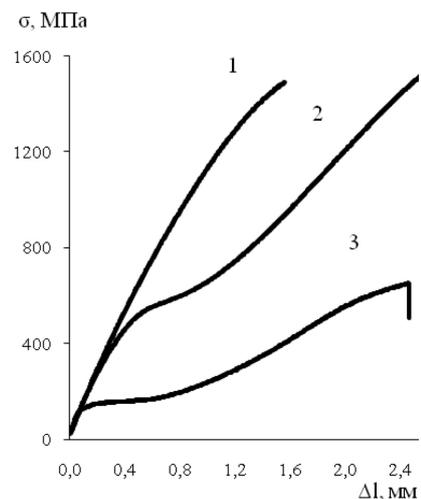
лизационным отжигом, до значения 2000 МПа, которое соответствует недеформированному состоянию. Другой особенностью кривых на рис. 1 является упрочнение, вызванное старением при некоторых режимах ЭИО. Аналогичные эффекты старения в деформированном сплаве этого же состава наблюдались при традиционном отжиге в печи в [4].

Результаты механических испытаний на растяжение (табл. 1) образцов из наноструктурной полосы до и после ЭИО коррелируют с результатами измерения микротвердости (рис.1а). Предел текучести  $\sigma_{0,2}$  и прочность до разрушения  $\sigma_p$  с увеличением плотности тока сначала незначительно растут, а потом резко уменьшаются, при этом удлинение до разрушения  $\delta$  закономерно возрастает. Характер кривых растяжения (рис.2) также меняется с увеличением времени воздействия тока – возникают плато, связанные с фазовым превращением (кривые 2 и 3) и проявлением функциональных свойств.

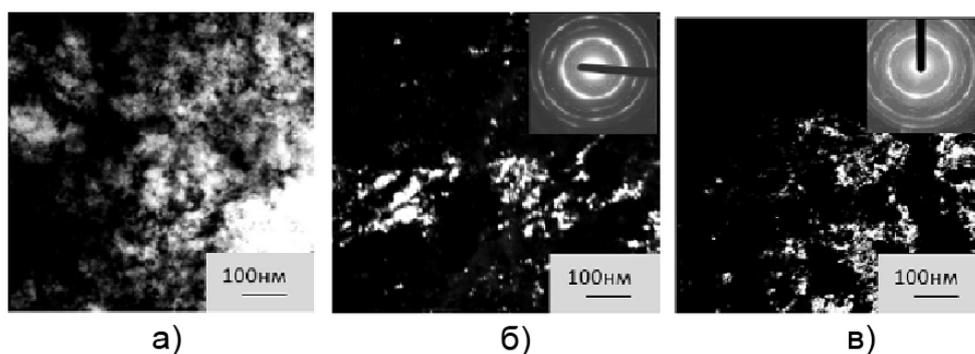
**Таблица 1.** Механические свойства ЭПП сплава до и после ЭИО

№	Состояние/режим ЭИО	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_p$ , МПа	$\delta$ , %
1	ЭПП	1320	1500	5
2	ЭПП+ ЭИО, 100 А/мм <sup>2</sup> , 3 с	1350	1550	10,6
3	ЭПП+ ЭИО, 100 А/мм <sup>2</sup> , 10 с	550	640	18,3
4	ЭПП + отжиг 450 С-1ч	1150	1350	14

Электронно-микроскопическое исследование показало, что после ЭИО ( $t=3$  с,  $j=100$  А/мм<sup>2</sup>) наноструктура в сплаве сохраняется, о чем свидетельствуют кольцевые картины дифракции (вставка на рис.3а) и темное поле (рис. 3б). Сравнение темных полей на рис.3б и 3в подтверждает схожесть микроструктур, полученных ЭИО и традиционным отжигом (450 °С-1 ч).



**Рис. 2.** Диаграммы растяжения в состояниях, указанных в таблице 1



**Рис. 3.** Микроструктуры и электронограммы сплава после ЭИО (а и б) и после отжига при 450 °С-1 час.(в); а – светлое поле; б, в – темное поле.

#### 4. Выводы

1. Определены режимы импульсного тока ( $j = 100 \text{ А/мм}^2$ ,  $t = 3 \text{ с}$ ), позволяющие сохранить наноструктуру, высокую прочность и повысить пластичность при растяжении сплава TiNi, подвергнутого ЭПП.

2. Импульсный ток при определенных режимах ЭИО может быть использован для ускоренной релаксации напряжений на стадиях возврата, полигонизации или рекристаллизации.

3. Удачное сочетание высокой прочности и пластичности в наноструктурном сплаве TiNi, подвергнутом кратковременной ЭИО, позволяет рекомендовать данный метод термического воздействия для замены длительного традиционного отжига в печи.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки, госконтракты №№ 14.740.11.0825, 02.740.11.0128, ПЗ40 и РФФИ, грант №11-08-00327\_а. Автор благодарен участникам проектов - научным сотрудникам Угурчиеву У.Х. и Прошину А.А. за помощь в проведении экспериментов.*

#### Литература

1. Novikov I.I. Theory of thermal treatment for metals. Textbook, issue 3, Moscow: Metallurgy, 1978, 392p.
2. Baranov Yu.V., Troitski O.A., Avraamov Yu.S. Et al. Physical bases of electropulse and electroplastic processes and new materials. Moscow: MSTU, 2001, 844p.
3. Stolyarov V.V., Ugurchiev U.Kh., Trubitsyna I.B. Et al. Severe electroplastic deformation of TiNi alloy, Fizika i tekhnika visokih davlenii, 4, 16 (2006) 48-51.
4. Kamyshova A.N., Investigation of thermal stability of nanostructure TiNi shape memory alloy, Diploma theses, MSIU, 2008, 97 p.