

УДК 539.388

## ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА TiNi С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ

Владимир Владимирович Столяров

<sup>1</sup> Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

<sup>2</sup> Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва,  
[vlstol@mail.ru](mailto:vlstol@mail.ru)

**Аннотация.** Исследовано влияние режимов электроимпульсной обработки на структуру, микротвердость и механические характеристики при растяжении 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:** деформируемость, упрочнение, прокатка, микроструктура

## INFLUENCE OF ELECTROPULSE TREATMENT ON STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES IN SHAPE MEMORY TiNi ALLOY

V.V. Stolyarov

<sup>1</sup> National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

<sup>2</sup> Mechanical Engineering Research Institute, Moscow, Russia

### Abstract

Influence of the modes of electropulse processing on structure, microhardness and mechanical characteristics at tension of shape memory  $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$  alloy processed by electroplastic rolling is investigated. Current density and impact time at which the size of grains in a microstructure of an alloy remains in nanometric area are determined, strength characteristics don't decrease, and elongation to failure increases.

**Key words:** deformability, hardening, rolling, microstructure

### Введение

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 прочности 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).

**Материал и методы обработки**

Объектом исследований служил сплав химического состава  $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$ , (ЗАО «Промышленный центр МАТЭКС») 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  $120 \text{ А/мм}^2$ , частоте 1000 Гц, длительности 10-1000 мкс. После каждого шага прокатки образцы охлаждались в воде. Истинная деформация при прокатке  $\epsilon$  вычислялась по формуле:

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

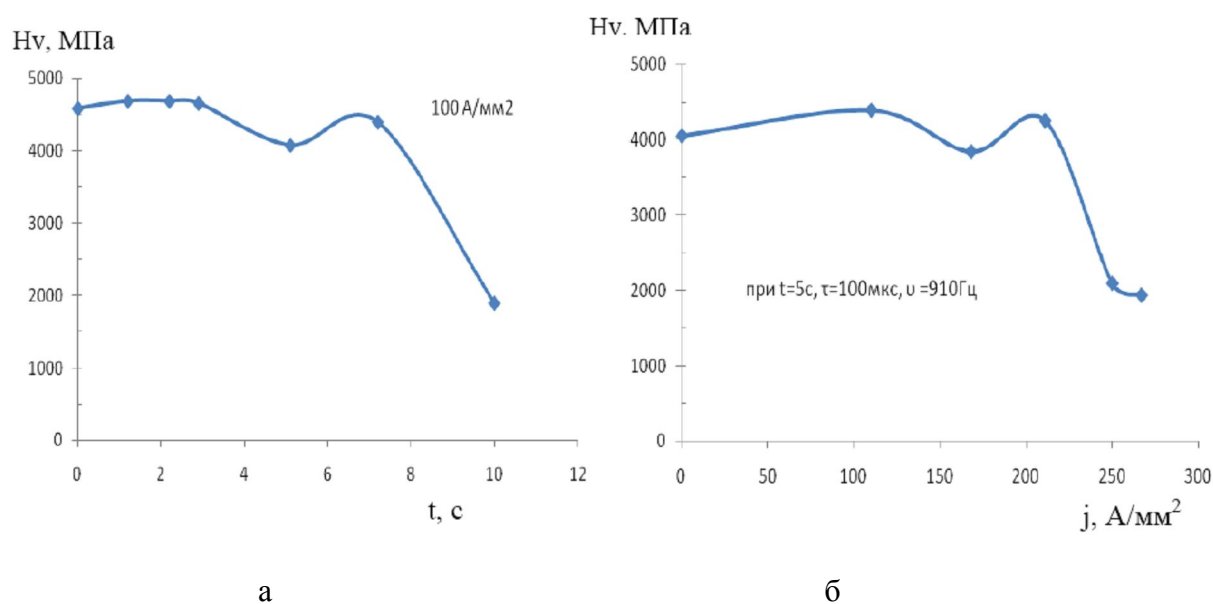
где  $\delta_0$  – начальная толщина образца,  $\delta_k$  – толщина прокатанного образца.

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

**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  $100 \text{ А/мм}^2$  и от плотности тока при постоянной длительности 5 с. Общим для обеих кривых является двукратное снижение исходной микротвердости, вызванное рекристаллизационным 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].

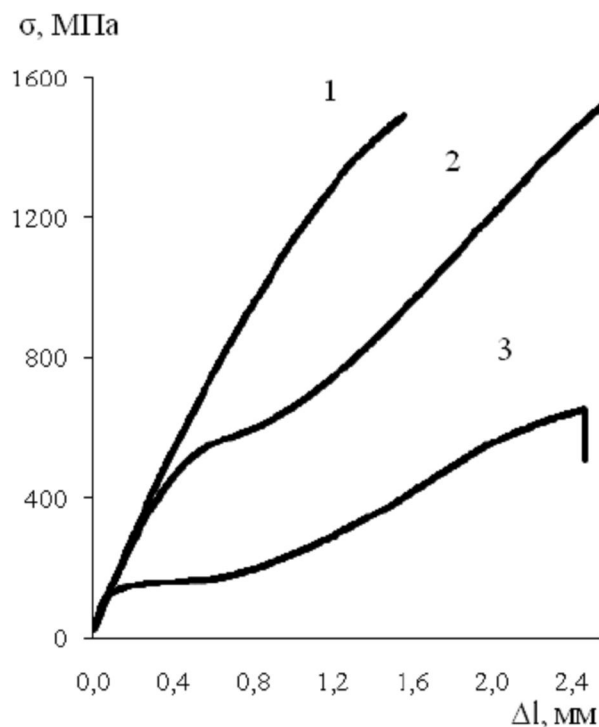


**Рис.1.** Зависимость микротвердости сплава от времени воздействия (а) и плотности тока (б).

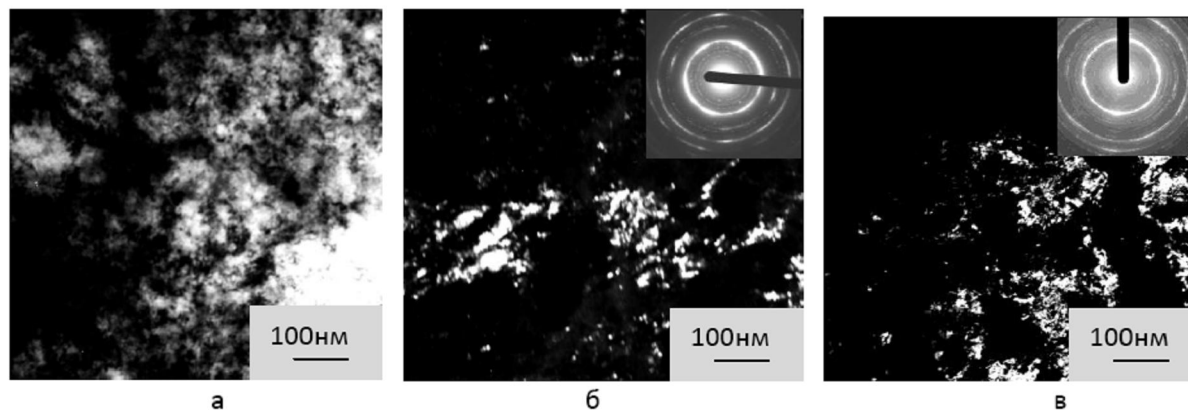
Результаты механических испытаний на растяжение (табл. 1) образцов из наноструктурной полосы до и после ЭИО коррелируют с результатами измерения микротвердости (рис. 1а). Предел текучести  $\sigma_{02}$  и прочность до разрушения  $\sigma_p$  с увеличением плотности тока сначала незначительно растут, 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	$\sigma_{02}$ , 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



**Рис.2.** Диаграммы растяжения в состояниях 1, 2, 3, указанных в таблице 1.



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

Электронно-микроскопическое исследование показало, что после ЭИО ( $t=3\text{с}$ ,  $j=100\text{ А/мм}^2$ ) 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).

#### Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, гранты 13-08-12222 и 15-02-00266

#### 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 ЭИО.
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.

#### Список литературы

1. **Новиков, И.И.** Теория термической обработки металлов, Учебник. Изд.3-е, испр. и доп. М.: Металлургия, 1978, 392 с.
2. **Баранов Ю.В., Троицкий О.А., Авраамов Ю.С., Шляпин А.Д.,** Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы. М.: МГИУ, 2001, 844 с.
3. **Столяров, В.В., Угурчиев, У.Х., Трубицына И.Б.,** и др. Интенсивная электропластическая деформация сплава TiNi // Физика и техника высоких давлений, 4, 16 (2006) 48-51.

4. Камышова А.Н., [www.vntr.ru](http://www.vntr.ru) № 11 (87), 2014 г.  
«Исследование термической стабильности  
сильнодеформированного (наноструктурного) сплава TiNi с памятью формы»,  
Дипломный проект, МГИУ, 2008, 97 с.