
НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ, ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ

УДК 539.388

СРАВНЕНИЕ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ И ОТЖИГА НАНОСТРУКТУРНОГО СПЛАВА С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ

© 2025 г. В. В. Столяров

Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва, Россия
e-mail: vlstol@mail.ru

Поступила в редакцию 09.01.2025 г.

После доработки 24.01.2025 г.

Принята к публикации 20.02.2025 г.

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 оптимальные 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. Показана возможность замены длительного традиционного печного отжига кратковременной электроимпульсной обработкой.

Ключевые слова: сплав с памятью формы, электроимпульсная обработка, микротвердость, наноструктура, прочность, пластичность

DOI: 10.31857/S0235711925030031, **EDN:** GMCOXP

Пластическая деформация любым способом обработки металлов давлением (прокатка, прессование, ковка, волочение), особенно интенсивная, при комнатной температуре приводит к сильному упрочнению, заметному снижению технологической пластичности и деформационной способности материала. Этот факт относится не только к обычным крупнозернистым материалам, но особенно к нанокристаллическим сплавам, полученным деформационными методами.

Традиционным способом восстановления пластичности между циклами или в конце деформации служит промежуточный или окончательный отжиг в печи [1]. Режимы отжига – температура, длительность и внешняя среда – обычно выбираются из соображений получения оптимального сочетания прочности, пластичности и экономических показателей.

Одним из недостатков термического отжига является большая длительность выдержки, которая может составлять десятки часов в зависимости от площади поперечного сечения полуфабрикатов. Альтернативой термическому отжигу в печи является прямое пропускание импульсного тока, часто применяемое для традиционных материалов и называемое электроимпульсной обработкой (ЭИО) [2, 3]. Для термически нестабильных ультрамелкозернистых и наноструктурных материалов, полученных интенсивной пластической деформацией (ИПД), выбор условий ЭИО является особенно важным для сохранения минимального размера зерен и высокой прочности.

В последние годы повышенное внимание уделяется наноструктурным сплавам на основе TiNi, обладающим свойством памяти формы и сверхупругостью [4, 5]. Поскольку наноструктура в них формируется методами ИПД, они требуют последующей термической обработки, которая обычно выполняется традиционным печным отжигом в вакууме.

Избежать многих проблем, возникающих при этом, можно используя более эффективный метод ЭИО. К настоящему времени процесс ЭИО является хорошо апробированным [6, 7], а природа ЭИО установлена и заключается в действии двух основных механизмов – термического теплового эффекта тока [8] и атермического электронного ветра [9]. Эффект ЭИО в основном зависит от частоты, плотности и продолжительности воздействия импульсного тока [10, 11]. Исследования показывают, что ЭИО не только снижает деформационное упрочнение и повышает пластичность, но и улучшает гомогенность микроструктуры, особенно аморфных сплавов после ИПД [12].

Перечисленные работы представляли результаты исследований в сплавах TiNi, полученных методами ИПД (РКУП, абс-прессование, холодной деформации волочением). В работе [13] впервые была успешно получена наноструктура методом электропластической прокатки (ЭПП), в которой прокатка осуществлялась в сопровождении электрического тока. В этой связи в статье описано исследование возможности применения ЭИО вместо термической обработки в печи для наноструктурного сплава TiNi с памятью формы, полученного интенсивной электропластической прокаткой (ЭПП).

Материал и методы эксперимента. Объектом исследований служил застехиометрический сплав $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$, с памятью формы (изготовлен ЗАО “Промышленный центр МАТЭКС”) в виде полосы размером $0.41 \times 10 \times 50$ мм³ (рис. 1а). Наноструктура в полосе была получена при комнатной температуре методом ЭПП со скоростью 3.5 см/с и накопленной степенью истинной деформации $e = 1.5–1.8$.

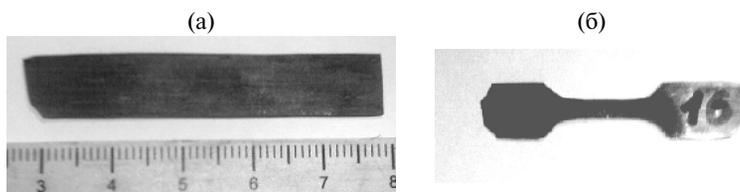


Рис. 1. Форма и размеры исходной полосы (а) и образца для растяжения (б).

Детали метода ЭПП описаны в работе [13]. Прокатка проводилась в пошаговом режиме при контролируемых режимах импульсного тока: плотность $j = 120$ А/мм², частота $\nu = 1000$ Гц, длительность импульса $\tau = 100$ мкс. Электроимпульсную обработку (ЭИО) выполняли током плотностью $j = 100, 150, 200$ и 260 А/мм², длительностью импульса 100 мкс, частотой 1000 Гц и длительности воздействия $t = 1–10$ с. Сквозность импульсного тока была во всех случаях минимальной, равной 10. Микротвердость определяли в центре расчетной длины на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 10 г и длительности выдержки 20 с, не менее, чем на 10 отпечатках для каждого режима ЭИО. Механические испытания на растяжение проводили на лопаточных образцах с расчетной длиной 20 мм (рис. 1б) при скорости испытания 1 мм/мин по ГОСТ 1497-84 на горизонтальной машине ИМ5081. Структуру исследовали методом тонких фольг в просвечивающем электронном микроскопе JEM-2000.

Экспериментальные результаты и обсуждение. Полоски деформированного сплава подвергались обработке импульсным током разной плотности и длительности воздействия, после чего проводились измерения микротвердости, исследование микроструктуры и механических свойств на растяжение.

Микротвердость. Прежде всего отметим, что значения микротвердости, измеренные по длине исходной и обработанной импульсным током полосы, были достаточно равномерными, отклонение от среднего не превышало $\pm 5\%$. Это косвенно свидетельствует об однородности микроструктуры деформированного сплава и подвергнутого ЭИО. По результатам эксперимента были построены зависимости микротвердости от длительности воздействия при постоянной плотности тока 100 А/мм^2 (рис. 2а) и от плотности тока при постоянной длительности 5 с (рис. 2б).

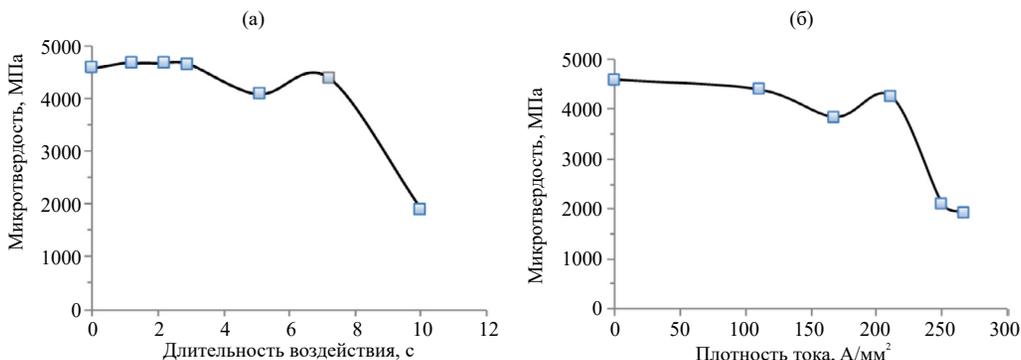


Рис. 2. Зависимость микротвердости сплава от времени воздействия (а) и плотности тока (б) при электроимпульсной обработке: (а) – $j = 100 \text{ А/мм}^2$; (б) – $t = 5 \text{ с}$.

Общим для обеих кривых является двукратное снижение исходной микротвердости, вызванное рекристаллизационным отжигом, до значения 2000 МПа, которое соответствует недеформированному состоянию сплава.

Другой особенностью кривых на рис. 2 является упрочнение, вызванное старением при некоторых режимах ЭИО. Аналогичные эффекты старения в деформированном сплаве этого же состава, связанные с выделением интерметаллидных наноразмерных частиц Ti_3Ni_4 , наблюдались при традиционном отжиге в печи при температуре 400°C в течение 1 ч [13, 14].

Растяжение. Результаты механических испытаний на растяжение (табл. 1) и деформационные кривые образцов из наноструктурной полосы до и после ЭИО коррелируют с результатами измерения микротвердости (рис. 2).

Таблица 1. Механические свойства ЭПП сплава до и после ЭИО/отжига

№	Состояние, режим ЭИО	σ_{02} , МПа	σ_p , МПа	δ , %
1	ЭПП	1320	1500	5
2	ЭПП + ЭИО, 100 А/мм^2 , 3 с	1350	1550	10.6
3	ЭПП + ЭИО, 100 А/мм^2 , 10 с	550	640	18.3
4	ЭПП + отжиг, 450°C , 1 ч	1150	1350	14

Предел текучести σ_{02} и прочность до разрушения σ_p с увеличением времени ЭИО сначала незначительно растут, а потом резко уменьшаются, при этом относительное удлинение до разрушения δ закономерно возрастает. Характер кривых растяжения (рис. 3) также меняется с увеличением времени воздействия тока – возникают плато, связанные с фазовым превращением мартенсита в аустенит (кривые 2 и 3) и проявлением функциональных свойств.

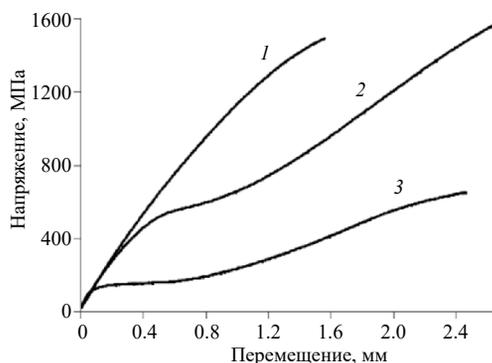


Рис. 3. Кривые напряжение–перемещение в состояниях 1–3, указанных в табл. 1.

Микроструктура. На рис. 4 представлены светлопольные изображения микроструктур и микродифракция, полученные в просвечивающем электронном микроскопе, сплава до (рис. 4а) и после ЭИО разной интенсивности (рис. 4б, в), а также для сравнения приведена микроструктура сплава после традиционного печного отжига (рис. 4г).

Видно, что до ЭИО микроструктура сплава представляет собой вытянутые в направлении прокатки деформационные полосы толщиной 15–20 нм и длиной более

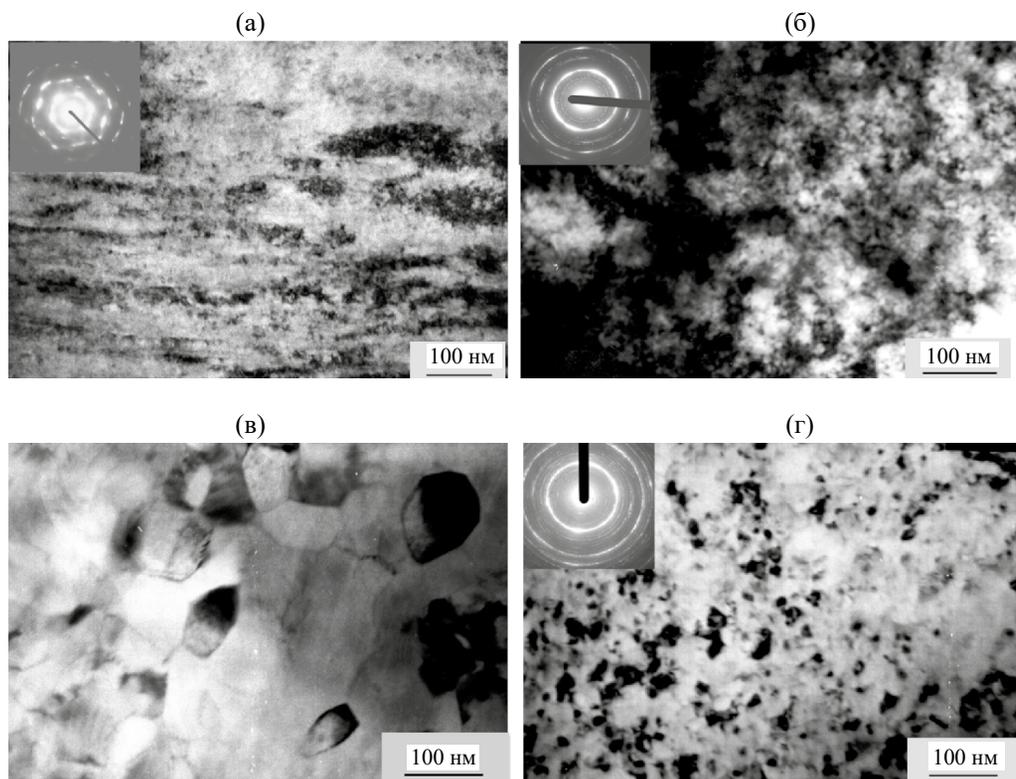


Рис. 4. Микроструктура (светлопольные изображения) и картины микродифракции сплава: (а) – до ЭИО; (б) – после ЭИО, $t = 5$ с, $j = 110$ А/мм²; (в) – после ЭИО, $t = 10$ с, $j = 110$ А/мм²; (г) – после отжига при 400 °С – 1ч.

200 нм (рис. 4а). Внутри полос формируется зеренно-субзеренная В2 аустенитная структура с средним размером зерен не более 10 нм. Сильная кристаллографическая текстура в плоскости прокатки и присутствие аморфных областей подтверждаются картиной микродифракции, на которой видны sdвоенные рефлексy R-мартенсита и аморфное гало.

Диффузное рассеяние электронов свидетельствует о предмартенситных превращениях. Светлопольное изображение и микродифракция на рис. 4б показали, что применение кратковременной ЭИО ($t = 5$ с, $j = 110$ А/мм²) способствует слабому росту зерен (до 20 нм), нанокристаллизации аморфных (темных) областей, формированию преимущественно аустенитного наноструктурного состояния сплава. Двухкратное увеличение длительности ЭИО при той же плотности тока приводит к интенсивной рекристаллизации и росту среднего размера зерен до 100 нм (рис. 4в). Сравнение микроструктур, полученных ЭИО и традиционным отжигом (450 °С, 1 ч) на рис. 4б, 4г, подтверждает их схожесть по размеру зерен и виду картин микродифракции, общим для которых является и наличие рефлексов от наноразмерных частиц Ti₃Ni₄.

Заключение. Подтверждена возможность выполнения ЭИО для снятия внутренних напряжений и сохранения наноструктурного состояния. Определены режимы импульсного тока ($j = 100$ А/мм², $t = 3$ с), позволяющие сохранить высокую прочность и повысить пластичность при растяжении сплава Ti_{49,3}Ni_{50,7}, подвергнутого электропластической прокатке. Импульсный ток при определенных режимах ЭИО можно использовать для ускоренной релаксации напряжений на стадиях возврата, полигонизации или рекристаллизации. Удачное сочетание высокой прочности и пластичности в наноструктурном сплаве Ti_{49,3}Ni_{50,7}, подвергнутом кратковременной ЭИО, позволяет рекомендовать данный метод термического воздействия для замены длительного традиционного отжига в печи.

Финансирование. Работа финансировалась за счет средств бюджета Института машиноведения им. А. А. Благоднравова РАН. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Картонова Л. В. Теория и технология термической обработки: учеб. пособие // Владим. гос. ун-т им. А.Г. и Н. Г. Столетовых. Владимир: ВлГУ, 2020. 128 с.
2. Lu B., Tang K., Wu M., Yang Y., Yang G. Mechanism of electropulsing treatment technology for flow stress of metal material: A Review // Alloys. 2024. V. 3. P. 96–125. <https://doi.org/10.3390/alloys3010006>
3. 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.
4. Lotkov A., Grishkov V., Laptov R., Zhapova D., Girsova N., Gusarenko A. Effect of isochronous annealings on the microstructure and mechanical properties of the Ti_{49,8}Ni_{50,2} (at.%) alloy after abc pressing at 573 K // Metals. 2023. V. 13. P. 1632. <https://doi.org/10.3390/met13101632>
5. Karelin R., Komarov V., Khmelevskaya I., Andreev V., Yusupov V., Prokoshkin S. Structure and properties of TiNi shape memory alloy after low-temperature ECAP in shells // Mater. Sci. Eng. A. 2023. V. 872. P. 144960. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.144960>
6. Ostapenko M. G., Semin V. O., D'Yachenko F.A., Neiman A. A., Meisner L. L. Structure and residual stress distribution in TiNi substrate after fabrication of surface alloy using electron-beam treatments // Acta Mater. 2022. V. 231. P. 117893. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2022.117893>

7. Zhang X., Xiang S., Yi K., Guo J. Controlling the residual stress in metallic solids by pulsed electric current // *Acta Metall. Sin.* 2022. V. 58. P. 581–598.
<https://doi.org/10.11900/0412.1961.2021.00367>
8. Джоуля–Ленца закон. БСЭ (Большая советская энциклопедия в 30 т.). 3-е изд. Т. 8. Дебитор–Евкалипт. М.: Советская энциклопедия, 1972.
9. Kravchenko V. Y. Effect of directed electron beam on moving dislocations // *Sov. Phys. JETP.* 1967. V. 24. P. 1135–1142.
10. Zhu R., Jiang Y., Guan L., Li H., Tang G. Difference in recrystallization between electropulsing-treated and furnace-treated NiTi alloy // *J. Alloys Compd.* 2016. V. 658. P. 548.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.10.239>
11. Chen Y., Tys O., Kaderavek L., Molnarova O., Heller L., Sittner P. Temperature and microstructure dependence of localized tensile deformation of superelastic NiTi wires // *Mater. Des.* 2019. V. 174. 107797.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107797>
12. Malard B., Pilch J., Sittner P., Delville R., Curfs C. In situ investigation of the fast microstructure evolution during electropulse treatment of cold drawn NiTi wires // *Acta Mater.* 2011. V. 59(4). P. 1542–1556.
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2010.11.018>
13. Столяров В. В., Узурчиев У. Х., Трубицына И. Б. и др. Интенсивная электропластическая деформация сплава TiNi // *Физика и техника высоких давлений.* 2006. № 4. 16. С. 48–51.
14. Гирсова С. Л., Полетика Т. М., Биттер С. М., Лотков А. И., Кудряшов А. Н. Мультистадийность мартенситных превращений в нанокристаллическом сплаве Ti-50.9 ат. % Ni // *Известия высших учебных заведений. Физика.* 2021. Т. 64. С. 10.
<https://doi.org/10.17223/00213411/64/10/124>