

**ВЛИЯНИЕ КОМБИНАЦИИ ПРОКАТКИ С ИМПУЛЬСНЫМ ТОКОМ И
УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА**

СПЛАВА $Ti_{49.3}Ni_{50.7}$

^{1,2}Столяров В.В.

¹*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва, Россия*

²*Национальный исследовательский ядерный институт «МИФИ»*

г. Москва, Россия, E-mail: vlstol@mail.ru

Проблема получения наноструктуры (НС) в объемных конструкционных материалах, в частности сплаве $Ti_{49.3}Ni_{50.7}$ с памятью формы, относится к числу приоритетных направлений во всем мире, поскольку это путь создания принципиально нового класса материалов с повышенными физико-механическими и новыми функциональными свойствами. Методы, позволяющие формировать наноструктуру либо в объеме, либо на поверхности материала известны [1]. В настоящее время активно разрабатываются также и комбинированные методы деформационного воздействия, например, сочетание холодной прокатки с импульсным током или волочения с ультразвуковой обработкой (УЗО) [2, 3]. Они основаны на совместном действии пластической деформации и электро/акустопластического эффектов, экспериментальные основы которых были заложены в работе [4]. Особая роль при этом принадлежит градиентной НС, формирующейся в объеме и на поверхности.

Цель настоящей работы – исследование влияния комбинированного метода интенсивной пластической деформации, включающего в себя последовательно прокатку с током и УЗО, на структуру и механические свойства никелида титана.

Материал и методы исследования

Объектом исследования служил крупнозернистый сплав (КЗ) с памятью формы $Ti_{49.3}Ni_{50.7}$ в закаленном состоянии в форме полос размером 2.1 x 8 x 150 мм.

Прокатку проводили при комнатной температуре на двухвалковом стане при плотности однополярного импульсного тока $j=100$ А/мм², длительности импульса 10^{-4} с и скважности 12.5, со скоростью 4 м/мин в пошаговом режиме при регулируемом разовом обжатии по толщине (~25 мкм). Накопленная величина истинной деформации составляла $e=1.9$. Последеформационный отжиг осуществляли при температуре 450°C и длительности 1 час. Толщина образцов после ЭПП составляла 0.3 мм.

Исходный и прокатанный образцы подвергались УЗО, использующей энергию механических колебаний индентора (шар Ø10 мм) с частотой 20 кГц и амплитудой 20 мкм. Энергия в зону обработки вводилась посредством статического усилия прижима инструмента (Рст) 50 Н, 100 Н и 150 Н к поверхности обрабатываемой детали при скорости обработки 0.3 м/мин [5].

Исследование микроструктуры полученных образцов проводилось на просвечивающем электронном микроскопе JEM-2000 на фольгах, полученных механической и ионной полировкой в аргоне для глубин 1 мкм и 14 мкм от поверхности. Картины дифракции получали с области размером ~ 1.2 мкм.

Микротвердость и механические свойства при растяжении определяли, соответственно, на микротвердомере ПМТ-3 и испытательной машине «Instron».

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Результаты показывают, что применение УЗО к исходному КЗ состоянию приводит к фрагментации структуры сплава в приповерхностном слое (рис.1,а). Однако УЗО образцов в НС состоянии, полученном прокаткой с током и последующим отжигом, не только сохраняет НС с размером зерен 40-50 нм в объеме образца (рис.1,б), но и дополнительно ее измельчает до размера зерен 20-30 нм на глубине 1 мкм от обработанной поверхности (рис.1,в). Нанокристаллическая структура представлена точечными дифракционными кольцами (или их частями) на электронограммах.

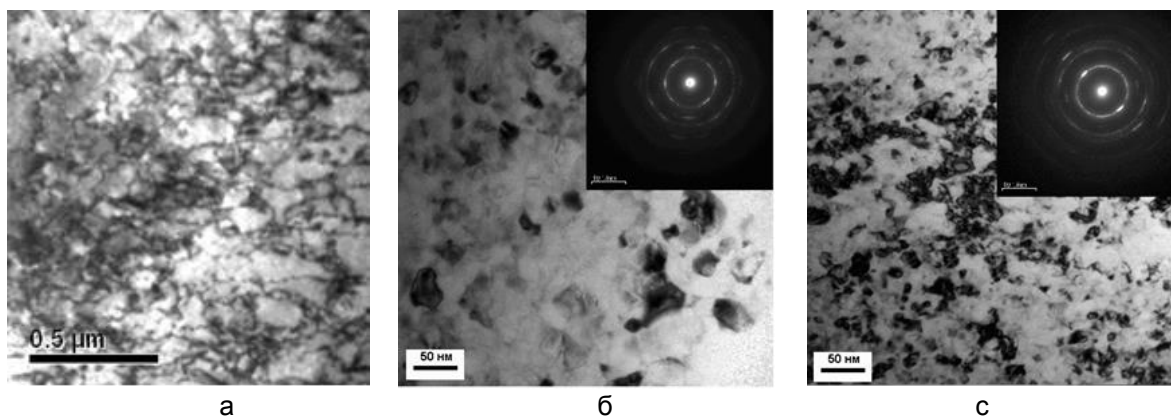


Рисунок 1 – Микроструктура никелида титана: а – исходный + УЗО; б – прокатка с током + УЗО, прокатка с током + УЗО, 14 мкм от поверхности; с – 1 мкм от поверхности

В результате объемного и поверхностного деформирования, соответственно прокаткой с током и методом УЗО никелида титана происходит рост микротвердости поверхности с 1800 до 3300 и 4000 МПа, соответственно. Повышение усилий прижима $P_{ст}$ способствует повышению прочности и микротвердости, снижает шероховатость поверхности [5]. Исходя из того, что УЗО формирует в поверхностном слое конструкционных материалов градиентную структуру, мы можем предполагать, что микротвердость также изменяется градиентно по сечению исследуемого образца.

Результаты исследований показали, что наноструктурирование в объеме прокаткой с током позволяет повысить предел прочности КЗ никелида титана с 660 МПа до 1600 МПа, а применение дополнительной УЗО повышает предел прочности до 1790 МПа. При этом относительное удлинение до разрушения сохраняется достаточным для инженерных применений (до 7%). При сравнении инженерных кривых «напряжение-деформация» исходных крупнозернистых и наноструктурных образцов после комбинированной обработки установлено, что в наноструктурных образцах происходит также двукратный рост критического напряжения мартенситного сдвига до 400 МПа.

Вид кривых «напряжение-деформация» образцов в крупнозернистом и наноструктурном состояниях показал, что они качественно подобны и включают три стадии (рис.2). Первая стадия – упругая деформация аустенита. На второй стадии (псевдотекущести) происходит фазовый переход аустенита в мартенсит. На третьей стадии развиваются процессы пластической деформации сформированной системы деформационных доменов мартенситной фазы, завершающиеся разрушением образцов.

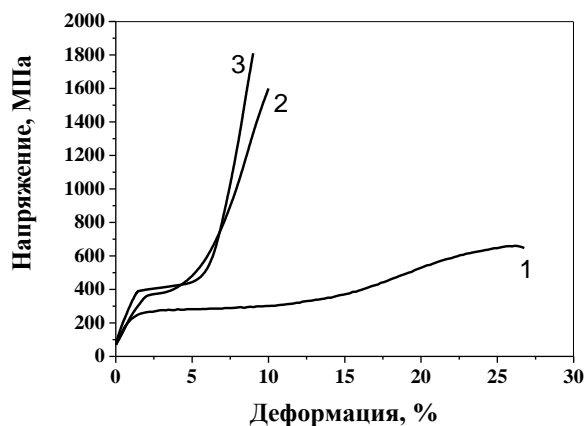


Рисунок 2 – Инженерные кривые «напряжение-деформация»: 1 – КЗ состояние, 2 – НС состояние после прокатки с током, 3 – НС состояние после прокатки с током + УЗО

Таким образом, показана возможность формирования градиентной наноструктуры в объемных полуфабрикатах никелида титана при использовании комбинации методов ЭПП и УЗО. Комбинированная обработка существенно повышает прочностные характеристики никелида титана, что позволяет снизить вес и габариты конструкций. Создание градиентной наноструктуры открывает принципиальную возможность управления функциональными свойствами изделий на основе изменения степени наноструктурирования никелида титана, в частности, за счёт расширения интервала мартенситных превращений.

Работа выполнена при поддержке РФФИ_Бел_а (грант № 16-58-00152), РФФИ_Инд_оми (грант №16-58-48001). Автор выражает благодарность д.т.н. Лесюк Е.А. за помощь в проведении УЗО.

Список литературы:

1. Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства. М.: ИКЦ «Академкнига». 2007. 398 с.
2. Лесюк Е.А., Столяров В.В., Комбинированное воздействие электропластической прокатки и ультразвуковой обработки на сплав TiNi, Технология металлов №11, 2011, 33-38.
3. Rubanik V.V., Rubanik V.V. jr., Dorodeiko V.G., Miliukina S.N., Influence of Ultrasonic Treatment on Shape Memory Effects in Ti-50,4 at.%Ni Alloy, Mater. Sci. Forum, V. 738-739 (2013) 362–366.
4. Kozlov A.V., Mordyuk B.N., Chernyashevsky A.V., On the additivity of acoustoplastic and electroplastic effects, Mater. Sci.&Eng.A190 (1995) 75-79.
5. Лесюк Е.А., Алехин В.П. Формирование нано- и субмикроструктур в инструментальных и конструкционных материалах и обеспечение их термической стабильности: монография. – М.: МГИУ, 2009.–247 с.