

УДК 621.391, 621.396

МАРТЕНСИТНОЕ ФАЗОВОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ И ЭФФЕКТ ПАМЯТИ ФОРМЫ В МИКРОПРОВОЛОКЕ ИЗ СПЛАВА NI-TI

А. В. Петров¹, В.А. Андреев², В. С. Калашников¹, В. В. Коледов¹,
В. Г. Шавров¹, Д. В. Гундеров³

¹ФГБУ Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

²ООО "Промышленный центр МАТЭК-СПФ"

³Институт физики молекул и кристаллов УНЦ РАН

Статья поступила в редакцию 24 декабря 2015 г.

Аннотация. Проведено исследование влияние термической обработки на температуры фазовых превращений в образце микропроволоки диаметром 23 мкм из сплава $Ni_{50,5}Ti_{49,5}$, полученной методом волочения. Продемонстрировано, что при отжиге $450^{\circ}C$ в первоначально аморфной микропроволоке проявляются аномалии температурных зависимостей электросопротивления, характерные для двухстадийного термоупругого мартенситного перехода. Температуры начала и конца мартенситного перехода после отжига находятся в интервале от -100 до $150^{\circ}C$. Отожженные образцы сплава продемонстрировали эффект памяти формы (ЭПФ). Обсуждаются применения микроволокон с ЭПФ в нанотехнологии и в технологии сенсоров и актюаторов.

Ключевые слова: сплавы с эффектом памяти формы, термоупругое мартенситное превращение, микропроволока.

Abstract: A study of the effect of heat treatment on phase transformation temperature of the sample microwire alloy 23 microns in diameter $Ni_{50,5}Ti_{49,5}$ obtained by drawing. It demonstrated that annealing $450^{\circ}C$ in the originally amorphous microwires results in anomaly temperature dependence of the electric conductivity which is characteristic for the two-stage thermoelastic martensitic transition. The martensitic transition in the samples after annealing is observed in the range from -100 to $150^{\circ}C$. The annealed alloy samples showed shape memory effect

(SME). We discuss the use of microwires SME in nanotechnology and technology of sensors and actuators.

Key words: shape memory alloys, thermoelastic martensite transformation, nickel titanium, micro wire.

1. Введение

В настоящее время получению и исследованию микро - и нанообразцов и, в частности, микропроволок на основе сплавов с эффектом памяти формы (ЭПФ) уделяется большое внимание. Исследованию свойств микропроволок сплава Ni-Ti диаметром до 50 мкм посвящено значительное количество работ [1-7]. Микропроволоки столь малых размеров интересны в первую очередь своей способностью быстро нагреваться и остывать, что позволяет повысить скорость срабатывания актюаторов сделанных на их основе, что очень важно для применений в микромеханике и микроробототехнике [8]. Целью данной работы является изучение мартенситного перехода в микропроволоке, полученной методом теплового волочения из сплава Ni_{50,5}Ti_{49,5} в зависимости от отжига, а также демонстрация ЭПФ.

2. Материалы и методы

В работе исследовалась микропроволока из сплава с ЭПФ Ni_{50,5}Ti_{49,5} диаметром 0,023 мм (рис. 1). Она получена методом теплового волочения на линии из двух волочильных шестиходовых станков с промежуточными отжигами и с применением графитовой смазки различных типов на предприятии ООО «Промышленный центр МАТЭК-СПФ» (www.matek-sma.ru). При теплом волочении нагрев проволоки перед обработкой осуществляли в щелевой двузонной электрической печи длиной 1,5-2,0 м до температур 200-500°C. Скорость волочения в зависимости от диаметра и химического состава проволоки регулировали в пределах 0,01-1,3 м/сек.

Для волочения проволоки диаметром 4-0,4 мм использовали волокна из твёрдых сплавов. Для волочения проволоки диаметром 0,4-0,020 мм используют волокна из монокристаллических алмазов.

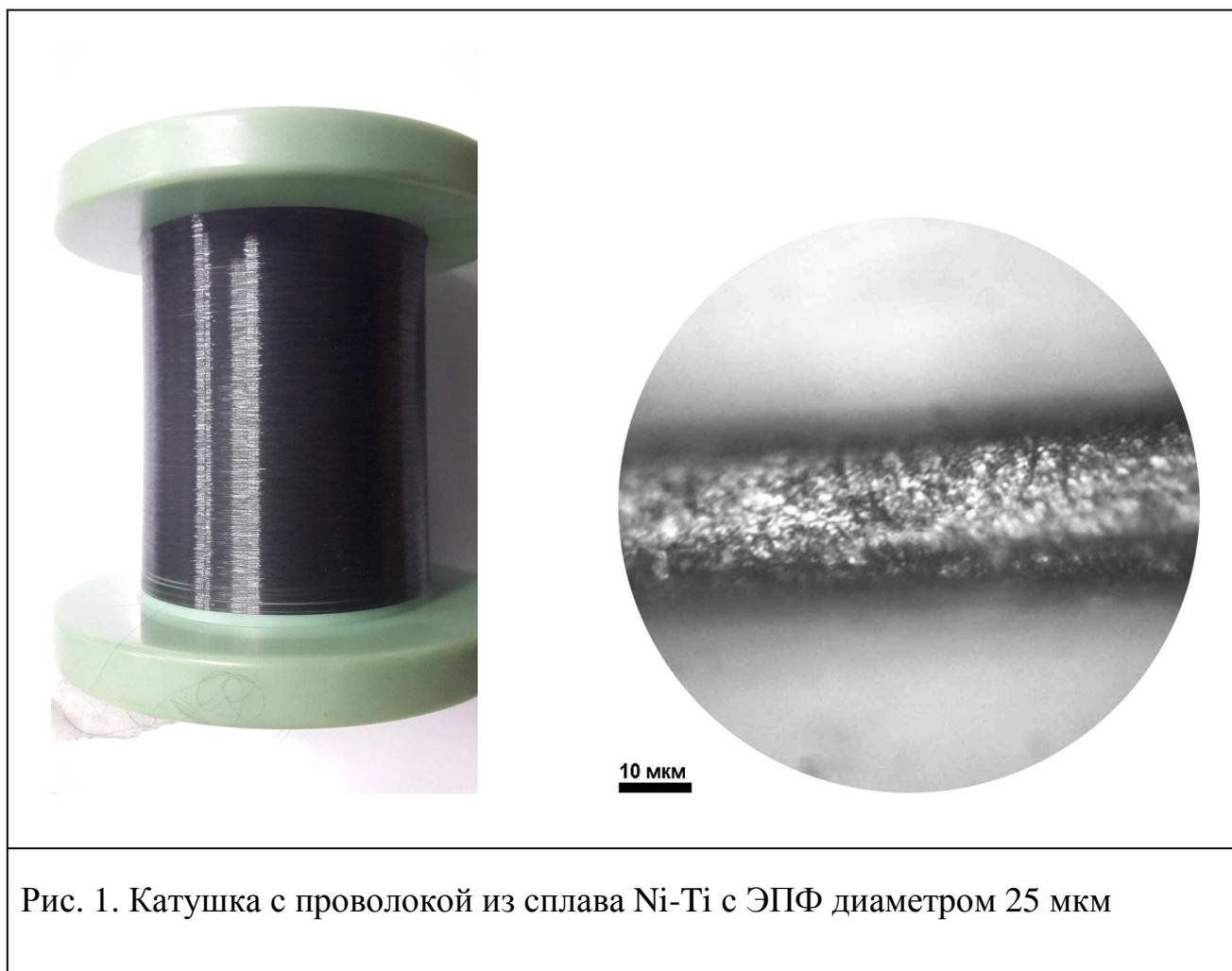


Рис. 1. Катушка с проволокой из сплава Ni-Ti с ЭПФ диаметром 25 мкм

Эта технология позволяет получить тонкую проволоку из сплавов с ЭПФ на основе никелида титана с диаметрами до 0.020 мм. Однако на выходе проволока не имеет эффекта памяти формы из-за сильных внутренних напряжений, которые появились в результате быстрого охлаждения, образования наклепанного и окисленного слоя, или, возможно, аморфного состояния. Это препятствует проявлению ЭПФ.

Для снятия внутренних напряжений был применен отжиг при 450 °С и подготовлены образцы, отожженные по 2 режимам:

1. при $T=450^{\circ}\text{C}$ 40 минут, охлаждение на воздухе,
2. при $T=450^{\circ}\text{C}$ 2 часа, охлаждение на воздухе.

Исследование проявлений ЭПФ в образцах микропроволоки осуществлялось стандартным двухточечным методом измерения зависимости электросопротивления от температуры.

3. Эксперимент

В ходе работы были получены данные о зависимости электросопротивления образцов микропроволок из сплава с эффектом памяти формы $Ni_{50.5}Ti_{49.5}$ диаметром 23 мкм от температуры, представленные на рисунке 2.

Данные на рис. 2 а и б позволяют определить температуры начала и конца прямого и обратного переходов $M_s = 75^\circ C$, $M_f = -100^\circ C$, $A_s = 25^\circ C$, $A_f = 100^\circ C$

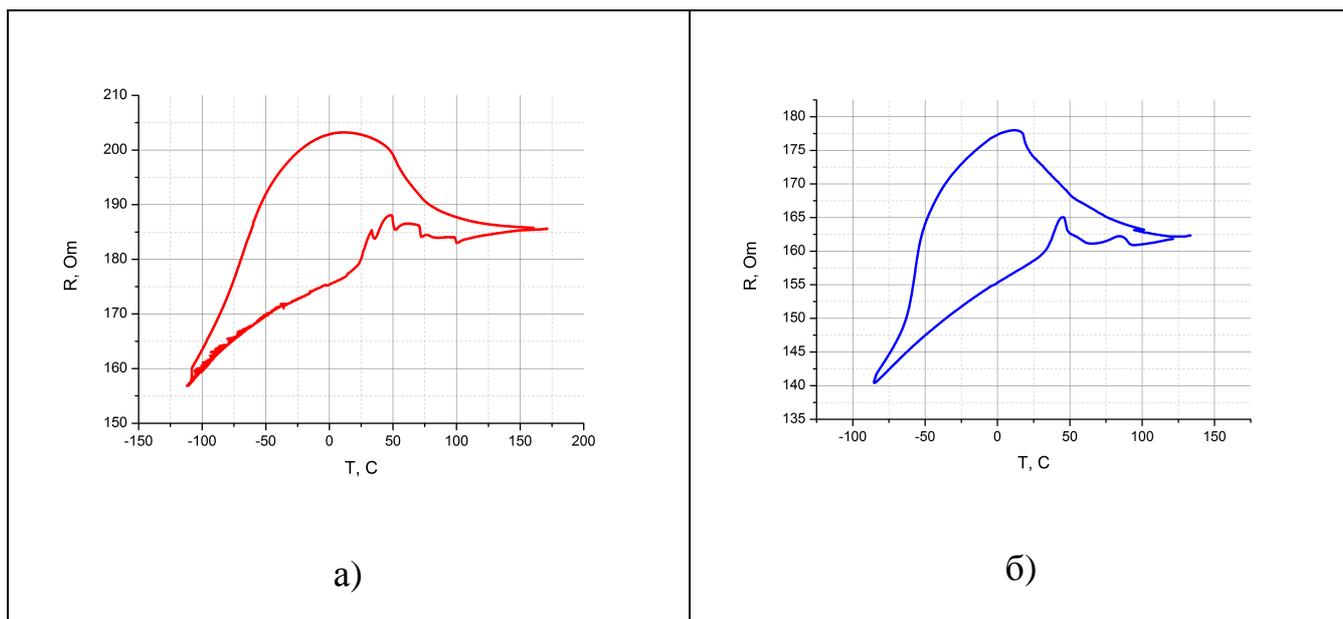


Рис. 2. Зависимость сопротивления микропроволоки от температуры.

а) Образец после отжига при $450^\circ C$ 40 минут, б) образец после отжига при $450^\circ C$ 2 часа.

Полученные кривые показывают, что в образцах присутствует термоупругий мартенситный переход, который проявляется в диапазоне от -100 до $150^\circ C$.

Наличие ЭПФ в отожжённой микропроволоке подтверждается экспериментами при нагреве микропроволоки (Рис. 3). Для демонстрации ЭПФ образец отожжённой микропроволоки на предметном столике оптического микроскопа подвергался локальному нагреву. При комнатной температуре проволока пластична и сохраняет форму приданную экспериментатором. При увеличении температуры до $50-60^\circ C$ микропроволока быстро изменяет свою

форму, изгибаясь по некоторому радиусу R . Величину R можно контролировать изменяя температуру, как показано на Рис. 3 в-г.

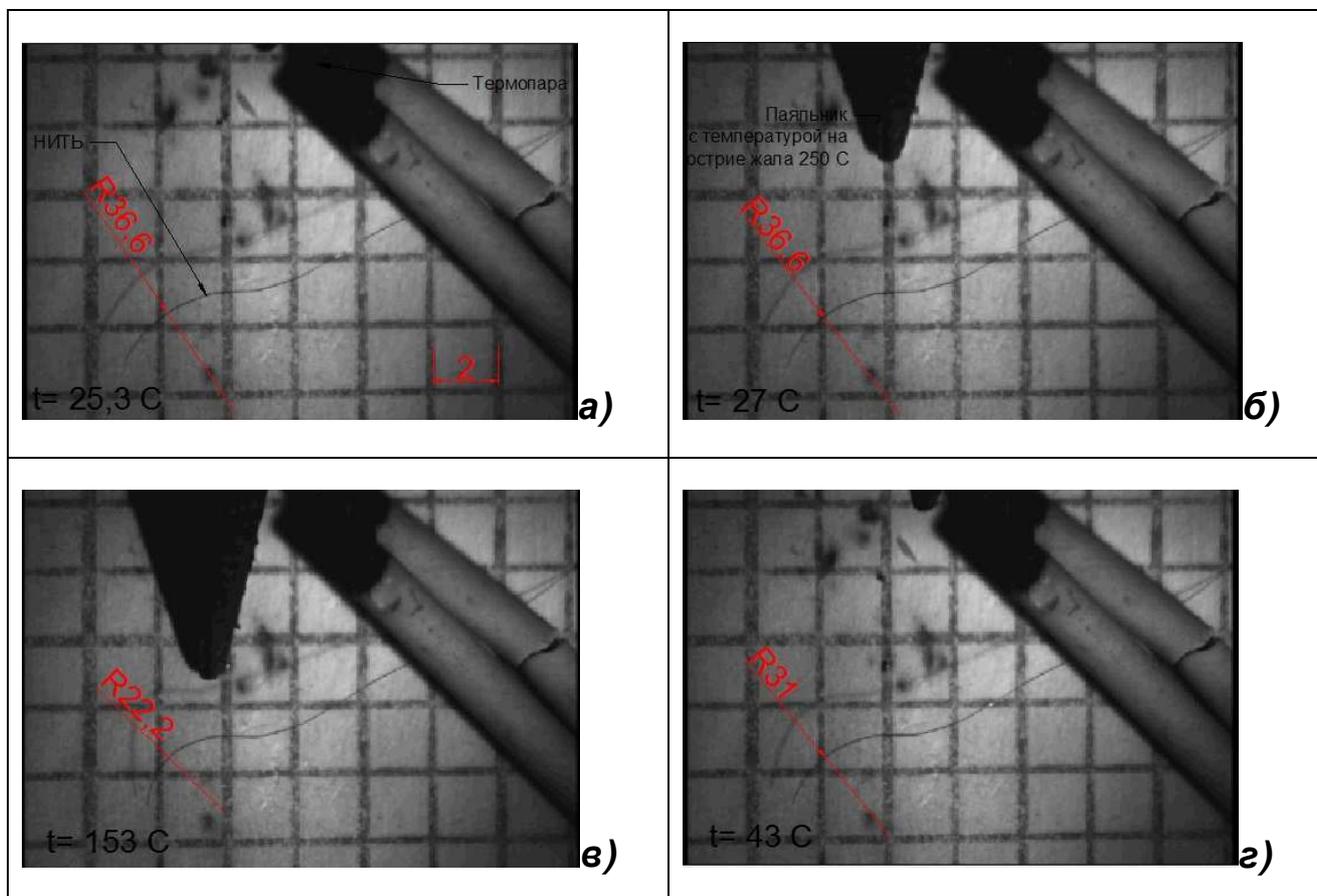


Рисунок 3. Демонстрация эффекта памяти формы в микропроволоке из сплава $Ni_{50.5}Ti_{49.5}$ диаметром 23 мкм, отожженной при 450 C 1,5 часа.

Микропроволока с таким температурным диапазоном может найти применение в различных областях нанотехнологии и медицины. В частности она может служить в качестве иглы для микро и наноманипуляторов используемых в установках ионного травления. В настоящее время в манипуляторах используются тонкие вольфрамовые проволоки, стравленные на конце до десятков нанометров. При неаккуратном обращении такая проволока может погнуться и требует замены. При использовании в качестве иглы микропроволоки из сплава с эффектом памяти формы $Ni_{50.5}Ti_{49.5}$ шибки

использования можно будет исправить нагревом до 100°C. Можно ожидать, что микропроволоки из сплава Ni-Ti найдут также применение в миниатюрных датчиках и исполнительных элементах.

4. Заключение

1. Показано, что после отжига микропроволоки диаметром 23 мкм из сплава Ni_{50.5}Ti_{49.5} в течение 40 минут при температуре 450°C в первоначально аморфной микропроволоке проявляется мартенситный переход. Методом измерения температурной зависимости электросопротивления найдены характерные температуры мартенситного перехода. $M_s = 75^\circ\text{C}$, $M_f = -100^\circ\text{C}$, $A_s = 25^\circ\text{C}$, $A_f = 100^\circ\text{C}$
2. Микропроволоки демонстрируют ЭПФ и свою высокую надежность и могут найти применение в области быстродействующих миниатюрных сенсоров и актюаторов.

Работа поддержана РФФИ, грант № 14-07-00729 А

Литература

1. А. В. Маширов, В. А. Дикан, А. В. Иржак, Д. И. Захаров, П. В. Мазаев, А. М. Жихарев, А. П. Каманцев, В. С. Калашников, В. В. Коледов, А. В. Шеляков, В. Г. Шавров Манипулирование микро- и нанообъектами при помощи эффекта памяти формы. // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2014. N12. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/dec14/17/text.pdf>
2. П. В. Мазаев, А. В. Маширов, В. В. Коледов, Д. В. Колесов, И. В. Яминский, А. В. Иржак, Д. И. Захаров, В. А. Дикан, А. П. Каманцев Исследование силовых характеристик микроактюатора с эффектом памяти формы при помощи сканирующей зондовой микроскопии. // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2014. N12. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/dec14/18/text.pdf>
3. Xu Lei, Wang Rui , Liu Yong. The optimization of annealing and cold-drawing in the manufacture of the Ni-Ti shape memory alloy ultra-thin wire. // The

- International Journal of Advanced Manufacturing Technology August 2011, Volume 55, Issue 9, pp 905-910
4. L. Heller , A. Kujawa, P. Šittner, M. Landa, P. Sedlák, J. Pilch. Quasistatic and dynamic functional properties of thin superelastic NiTi wires. // The European Physical Journal Special Topics May 2008, Volume 158, Issue 1, pp 7-14
 5. Lorenza Petrini, Francesco Migliavacca. Biomedical Applications of Shape Memory Alloys // Journal of Metallurgy. Volume 2011 (2011), Article ID 501483, 15 pages
 6. G.N. Dayananda, M. Subba Rao. Effect of strain rate on properties of superelastic NiTi thin wires. // Materials Science and Engineering: A. Volume 486, Issues 1–2, 15 July 2008, Pages 96–103
 7. Xiaojun Yan and Jan Van Humbeeck. Evolution of Recovery Stress and Recovery Strain in Annealed NiTi Thin Wire during Constrained Thermal Cycling to High Temperature. // Advanced Engineering Materials Volume 16, Issue 1, pages 80–84, January 2014.
 8. I. Doroftei, B. Stirbu Application of Ni-Ti shape memory alloy actuators in a walking micro-robot // Mechanika. 2014 Volume 20(1): 70-79