

05;06

## Гигантские обратимые деформации композитного материала с эффектом памяти формы

© А.В. Иржак, В.С. Калашников, В.В. Коледов, Д.С. Кучин,  
Г.А. Лебедев, П.В. Лега, Н.А. Пихтин, И.С. Тарасов,  
В.Г. Шавров, А.В. Шеляков

Национальный исследовательский технологический университет  
„МИСиС“, Москва

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,  
Москва

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва  
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“, Москва  
E-mail: victor kolediv@mail.ru

Поступило в Редакцию 15 ноября 2009 г.

Предложена и испытана экспериментально новая схема композитного функционального материала на основе сплава с эффектом памяти формы. Эта схема обеспечивает гигантскую обратимую изгибную деформацию при использовании только „одностороннего“ эффекта памяти формы сплава. Схема экспериментально проверена на моделях, изготовленных гальваническим нанесением никеля на предварительно псевдопластически деформированных быстрозакаленных лентах сплава  $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$ . Новая схема особенно перспективна для применений в области микро- и наномеханики. На ее основе изготовлен макет нанопинцета с рекордно малыми габаритными размерами  $12 \times 3 \times 1 \mu m$  и толщиной слоя с эффектом памяти формы — 500 nm. Размер захватываемого объекта — от 10 до 1000 nm. Продемонстрировано управление деформацией при помощи разогрева нанопинцета излучением полупроводникового лазера в вакуумной камере сканирующего ионного микроскопа.

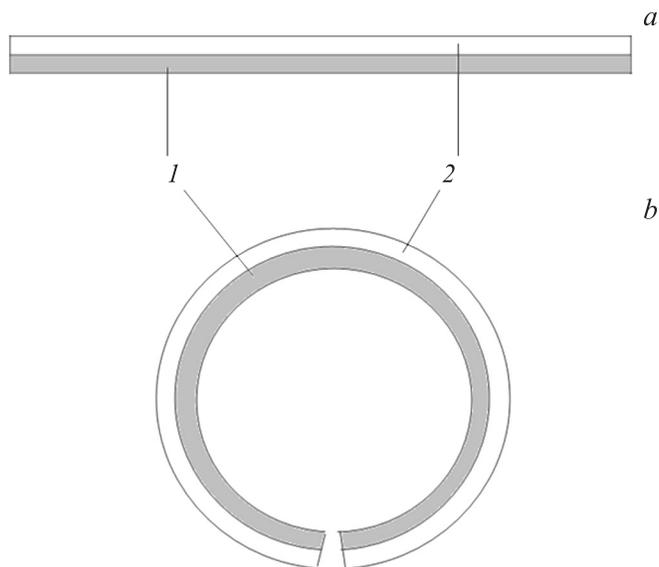
Гигантские деформации сплавов с эффектом памяти формы (ЭПФ) находят широкое применение в электронике, космических технологиях, микромеханике и медицине [1]. Псевдопластические, управляемые деформации сплавов с ЭПФ имеют рекордную величину (до 10%). Однако свойство обратимого деформирования не является внутренне присущим

самому сплаву. Для достижения обратимых управляемых деформаций требуется нетехнологичная операция тренировки сплавов на „двустороннюю“ память, а величина обратимой деформации существенно меньше, чем при „односторонней“ памяти формы, что затрудняет их применение, в частности в области микро- и наномеханики [2]. Биморфные слоистые структуры различных материалов используются во многих работах для достижения обратимой изгибной деформации [3,4]. К сожалению, их контролируемый изгиб сравнительно невелик, так как определяется разностью коэффициентов теплового расширения слоев (не более 0.1%).

Цель настоящей работы — предложить новый композитный функциональный материал на основе сплава с ЭПФ, обеспечивающий значение обратимой изгибной деформации порядка нескольких процентов, а также продемонстрировать возможности его управляемых деформаций на субмикронном масштабе размеров активного элемента.

Композит состоит из сплава с ЭПФ в виде ленты, пленки или пластинки и упругого слоя обычного металла, жестко соединенных между собой (рис. 1). До соединения с упругим слоем слой с ЭПФ подвергается псевдопластической растягивающей деформации. Операция соединения слоев производится при температуре ниже температуры перехода аустенит–мартенсит. В результате композит приобретает способность к гигантским обратимым изгибным деформациям. В основе его работы лежит то, что изгибная деформация композитной пластины есть сжатие на внутренней стороне и растяжение на внешней. При нагреве сплав с ЭПФ переходит в аустенитное состояние и сжимается, деформируя на растяжение упругий слой и изгибая композит. При охлаждении слой с ЭПФ возвращается в мартенситное состояние, при этом упругий слой, сжимаясь, сжимает слой с ЭПФ и возвращает композит к прямолинейной форме.

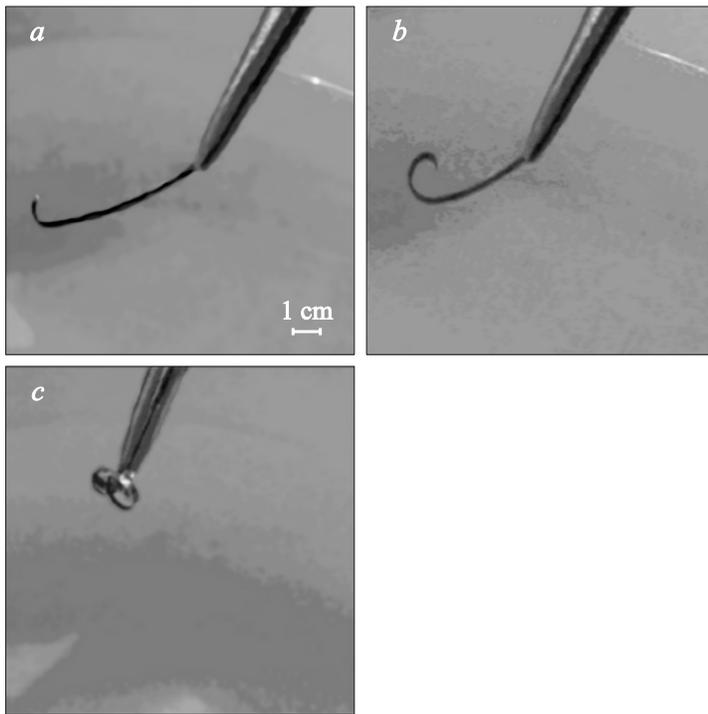
В настоящей работе свойства композита исследованы на модели, полученной гальваническим нанесением никеля на быстрозакаленную ленту сплава  $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$ . Процесс изготовления композита включает 3 этапа. Быстрозакаленная лента сразу после спиннингования получается аморфной [5]. На первом этапе аморфная быстрозакаленная лента сплава  $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$  толщиной 30–40  $\mu m$  отжигалась в течение 300 с при 500°С на воздухе. При этом происходила рекристаллизация и, как следствие, наблюдался ЭПФ. Температуры начала и конца прямого и обратного мартенситного перехода в экспериментах были равны



**Рис. 1.** Схема биморфного композита, обеспечивающего обратимую изгибную деформацию. 1 — слой с ЭПФ, 2 — упругий слой. *a* — слой с ЭПФ в мартенситном состоянии; *b* — в аустенитном состоянии.

соответственно:  $M_s = 42^\circ\text{C}$ ,  $M_f = 39^\circ\text{C}$ ,  $A_s = 50^\circ\text{C}$ ,  $A_f = 52^\circ\text{C}$ . Затем в ленте создавалась псевдопластическая деформация растяжения  $\varepsilon \approx 1\%$ . Для этого ее одним концом закрепляли на подвесе в вертикальном положении, а к другому концу подвешивали груз массой около 1 kg, и нагревали пропусканием электрического тока 1 А. В результате образец сжимался, а после выключения тока — растягивался. На третьем этапе формировался композит методом электролитического осаждения на одну сторону ленты слоя никеля. Весь процесс нанесения слоя никеля производился при комнатной температуре.

Полученные композиты — это отрезки лент толщиной  $50\ \mu\text{m}$ . При нагревании до температуры  $T > A_f$  лента обратимо скручивается до радиуса около 3 mm (рис. 2). Затем при охлаждении до температуры менее  $T < M_f$  композит возвращается в исходное состояние. Испытания на выносливость показали, что композит может выдержать более 2000 термоциклов. С увеличением числа термоциклов его работоспособность



**Рис. 2.** Обратимая изгибная деформация NiTiCu/Ni композитного материала, полученного гальваническим осаждением никеля на быстрозакаленную ленту сплава с ЭПФ при нагреве и охлаждении (*a* — композит в мартенситном состоянии, *b* — композит переходит в аустенитное состояние и испытывает изгиб, *c* — композит при опускании в горячую воду испытывает гигантскую деформацию).

снижается, причем распрямляется он хуже, чем сжимается. Это объясняется тем, что усталость проявляется прежде всего в упругом слое, а слой с ЭПФ сохраняет свои свойства значительно дольше.

Для изучения возможности применения композитной схемы на субмикронном масштабе размеров были изготовлены образцы микроструктур методом фокусированного ионного пучка. Технология включала 4 этапа. На первых двух этапах, как описано выше, аморфная

быстрозакаленная лента  $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$  отжигалась до получения ЭПФ и псевдопластически растягивалась. Формирование композитных микроструктур и исследование в них эффектов гигантских деформаций в условиях нагрева излучением полупроводникового инжекционного лазера проводились на установке фокусированного ионного пучка „Strata FIB 201“ фирмы FEL. Сначала на боковом торце ленты сплава формировали плоскую поверхность и наносили на нее слой платины толщиной  $500\text{ nm}$ , шириной  $1\text{--}2\text{ }\mu\text{m}$  и длиной  $10\text{--}20\text{ }\mu\text{m}$  для создания упругого слоя. Затем вблизи слоя платины формировали прямоугольное отверстие таким образом, чтобы суммарная толщина  $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$  и платины составила  $0.8\text{--}1\text{ }\mu\text{m}$ . В результате образцу придавалась форма консоли с просветом на конце для обеспечения возможности управляемого обратимого прогиба (рис. 3).

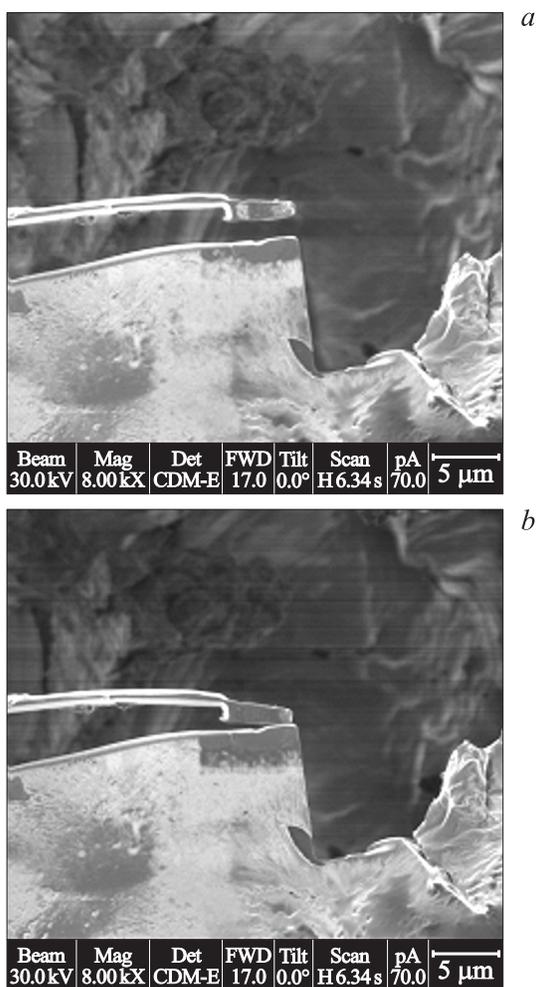
Для управления нанопинцетом использовали полупроводниковый лазерный диод на основе гетероструктуры GaAl/GaAlAs с длиной волны излучения  $\lambda = 0.9\text{ }\mu\text{m}$ . Включение питания лазера вызывает нагрев сплава  $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$ , который переходит в аустенитное состояние и деформируется, а при выключении тока восстанавливает исходную форму за счет ненесенного упругого слоя. Контроль деформации осуществляли при помощи ионного микроскопа в реальном режиме времени с разрешением не хуже  $30\text{ nm}$ . Таким образом, достигалась обратимая деформация, причем свободный створ пинцета изменялся от  $1200$  до  $0\text{ nm}$ . При смыкании створа наблюдались силы притяжения между металлическими поверхностями нанопинцета. Видеодемонстрацию работы нанопинцета см. в интернете: <http://smwsm.org/ll/micropincer.html>.

Для теоретической оценки прогиба элемента с ЭПФ возьмем выражение для радиуса изгиба  $R$  биметаллической пластинки [6]:

$$R = \frac{4h}{3\varepsilon}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  — относительная деформация растяжения при изгибе биметаллической пластинки,  $h$  — толщина слоя с ЭПФ. Для простоты принято, что модули Юнга материала с ЭПФ в аустенитном состоянии и упругого слоя платины равны, а также равны толщины этих слоев. Для вычисления прогиба конца образца  $\lambda$  примем во внимание, что  $\lambda = R(1 - \cos \alpha)$ ,  $\alpha = L/R$ . Следовательно,

$$\lambda = \frac{L^2}{2R} = \frac{3L^2\varepsilon}{8h}. \quad (2)$$



**Рис. 3.** Макет нанопинцета, выполненный методом ФИП на фрагменте быстрозакаленной ленты сплава NiTiCu с ЭПФ (*a* — нанопинцет в мартенсите, *b* — нанопинцет в мартенсите, *b* — нанопинцет в аустените).

Для численного расчета примем  $L = 12 \mu\text{m}$ ,  $\varepsilon = 0.01$ ,  $h = 500 \text{ nm}$ , получаем  $\lambda \approx 1000 \text{ nm}$ . Таким образом, приближенный расчет дает величину прогиба композита, хорошо согласующуюся с экспериментом.

В заключение отметим, что предложенная в настоящей работе композитная схема с использованием предварительно растянутого слоя сплава с ЭПФ обеспечивает обратимые изгибные деформации только при использовании „одностороннего“ ЭПФ сплава. Продемонстрировано, что схема работоспособна при толщинах слоя с ЭПФ до  $500 \text{ nm}$ . При этом в слоях субмикронной толщины ЭПФ проявляется качественно так же, как и в крупногабаритных. Данная схема композитного функционального материала может изготавливаться с применением как быстрозакаленных сплавов, так и полимерных, наноструктурированных материалов с ЭПФ. Как показано в последние годы, ЭПФ может управляться не только тепловым воздействием, но и ультразвуковым и магнитным [7,8]. Новая схема может найти применение для создания микро- и наноманипуляторов, различных датчиков, самособирающихся конструкций, медицинских приборов.

Данная работа поддержана РФФИ (№ 09-08-01177, 09-02-90437, 07-02-13629 и программой президиума РАН № 27 „Основы фундаментальных исследований нанотехнологий и наноматериалов“ на 2009 г.

## Список литературы

- [1] *Сплавы никелида титана с памятью формы*. Ч. 1 / Под ред. В.Г. Пушина. Екатеринбург: Изд-во Института физики металлов УрО РАН, 2006.
- [2] *Fu Y.Q., Luo J.K., Flewitt A.J., Ong S.E., Zhang S., Du H.J., Milne W.I.* // Smart Materials and Structures. 2007. V. 16. P. 2651.
- [3] *Chang J., Min B.-K., Kim J., Lin L.* // Microelectronic Engineering. 2009. V. 86. P. 2364.
- [4] *Fu Y.Q., Luo J.K., Ong S.E., Zhang S., Flewitt A.J., Milne W.I.* // Journal of micromechanics and microengineering. 2008. V. 18. P. 035026.
- [5] *Resnina N., Belyaev S., Shelyakov A.* // European Physical Journal: Special Topics. 2008. V. 158. P. 21.
- [6] *Андреева Л.Е.* Упругие элементы приборов. М., 1962. С. 213.
- [7] *Cherechukin A.A., Dikshtein I.E., Ermakov D.I., Glebov A.V.* et al. // Physics Letters A. 2001. V. 291. P. 175–183.
- [8] *Buchelnikov V., Dikshtein I., Grechishkin R.* et al. // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2004. V. 272–276. P. 2025–2026.