

## МАРТЕНСИТНЫЙ ТЕРМОУПРУГИЙ ПЕРЕХОД В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ И ТОЛЩИНЫ

<sup>1</sup>Иржак А.В., <sup>2</sup>Коледов В.В., <sup>1</sup>Касьянов Н.Н., <sup>2</sup>Кучин Д. С., <sup>2</sup>Лега П.В., <sup>2</sup>Орлов А.П.,  
<sup>1</sup>Табачкова Н.Ю., <sup>3</sup>Шеляков А.В.

<sup>1</sup>НИТУ «МИСус», Москва, Россия, E-mail: airzhak@gmail.com

<sup>2</sup>ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, Москва, Россия, E-mail: lega\_peter@list.ru

<sup>3</sup>НИЯУ «МИФИ», Москва, Россия, E-mail: alex-shel@mail.ru

В последние годы большой интерес вызывает проблема создания миниатюрных механических устройств и инструментов с эффектом памяти формы (ЭПФ), способных изменять форму и производить механическую работу на микро- и наномасштабах. В [1] доказано, что ЭПФ наблюдается в композитных микроактюаторах при толщине активного слоя сплава  $Ti_2NiCu$  с ЭПФ, по крайней мере, до 80 нм. Большое количество работ посвящено исследованию мартенситных превращений на наномасштабах [2–6]. Например, в статьях [5,6] предпринимается попытка исследовать размерные эффекты в сплаве никелида титана с ЭПФ и показано, что имеется тенденция к понижению температуры мартенситного перехода при уменьшении размера элемента структуры до уровня десятков нм, а при дальнейшем уменьшении размера переход вообще блокируется. В некоторых работах эффект блокировки связывают с уменьшением вероятности появления зародыша в сферическом нанозерне.

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию мартенситных превращений в клиновидных пластинках сплава  $Ti_2NiCu$  в зависимости от температуры и толщины. Главная идея заключается в том, чтобы проверить предположение о том, что, в принципе, микроактюаторы из  $Ti_2NiCu$  могут работать и при толщине активного слоя с ЭПФ менее 80-100 нм, пусть, если даже для этого придется проводить эксперименты в криогенной области температур.

Образцы сплава  $Ti_2NiCu$  были изготовлены методом быстрой закалки из расплава в аморфном состоянии в виде лент толщиной 30-40 мкм. Затем они были подвергнуты отжигу импульсами электрического тока и частичной кристаллизации [7]. Клиновидные пластины были получены методом утонения ионным пучком для исследований *in situ* в ПЭМ высокого разрешения с приставкой для охлаждения и нагрева образца.

Изображение в ПЭМ края образца клиновидной пластины сплава  $Ti_2NiCu$  при температуре  $T=300$  К показано на рисунке 1. Его толщина составляет, приблизительно, 80-100 нм в левой части снимка, а на правом краю пластины достигает, предположительно, 10–20 нм. В левой части снимка наблюдается мартенситная структура с двойниками, посередине наблюдается граница фаз, а вблизи края – структура аустенита, которая не должна наблюдаться в объемном образце, так как температура окончания перехода мартенсит-аустенит составляет около 330 К для этого сплава.

При охлаждении, граница мартенсит-аустенит начинает движение в область меньших толщин, и при достижении температуры 150-100 К она нависает (см. рис.2).

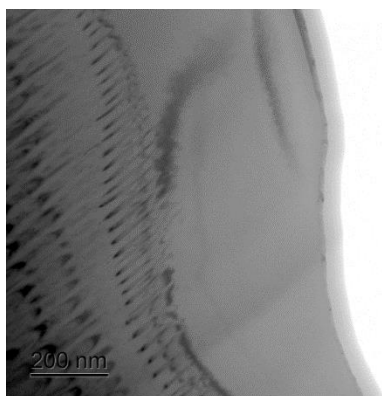


Рисунок 1 – Образец при комнатной температуре. Начало эксперимента

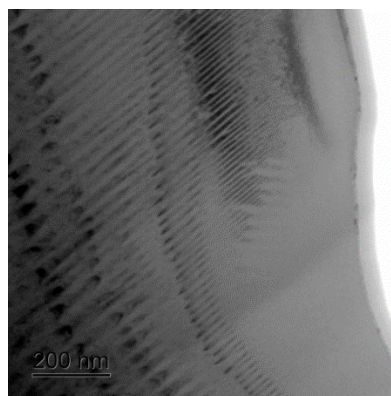


Рисунок 2 – Образец при температуре 100 К

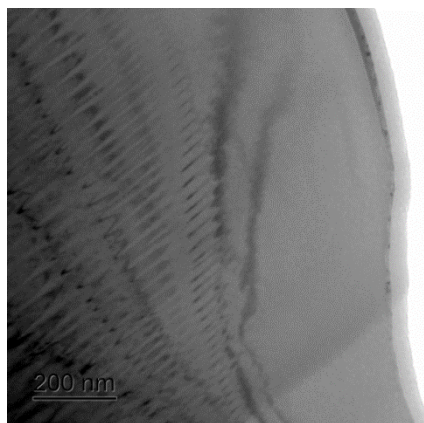


Рисунок 3 – Возвращение к комнатной температуре

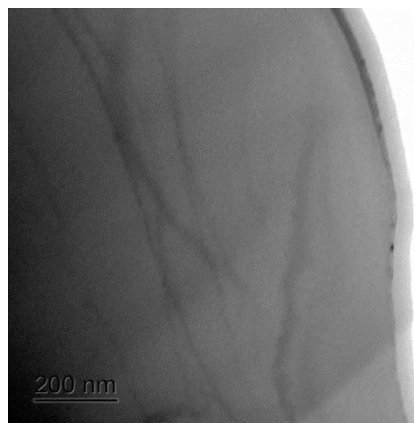


Рисунок 4 – Нагрев образца до 350 K

В то же время видно, что вблизи края клиновидной пластинки аустенит не исчезает полностью, что подтверждает предположение о том, что при толщине меньше критической, мартенситный переход блокируется. При возврате температуры к комнатной, граница мартенсит-аустенит не точно возвращается в исходное положение (рис.3). Это указывает на гистерезис зависимости положения границы мартенситного перехода по толщине. При нагреве образца до 350 K, мартенситные двойники исчезают, и образец переходит в состояние аустенита полностью по всей площади пластины (рис.4).

В связи с тем, что образец имеет неоднородную структуру и толщину вдоль края, граница перехода мартенсит – аустенит имеет форму изогнутой, зубчатой кривой. Рисунки 5-8 иллюстрируют серию дифракционных экспериментов, предпринятую для того, чтобы доказать, что положение границы структурных фаз действительно отвечает видимой зубчатой границе. На рисунке 5 области, в которых структура определялась методом дифракции пронумерованы от 1 до 7. На рисунке 6 показана типичная дифракционная картина от мартенсита в области 1. Рисунки 7 и 8 демонстрируют структуру аустенита в областях 2-7.

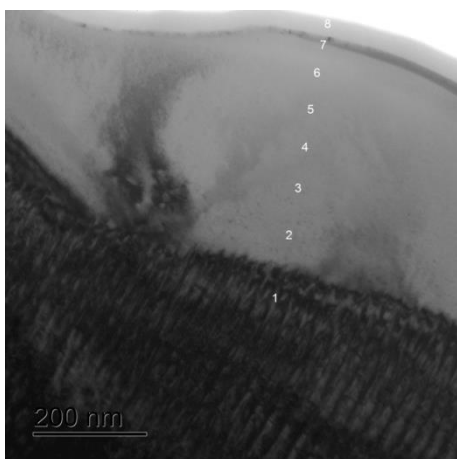


Рисунок 5 – Нумерация областей, на которых будет снята микродифракция

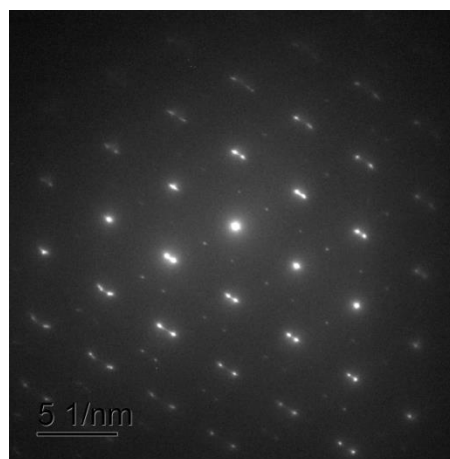


Рисунок 6 – Микродифракция от области 1 (мартенсит)



Рисунок 7 – Микродифракция от области 2 (аустенит)

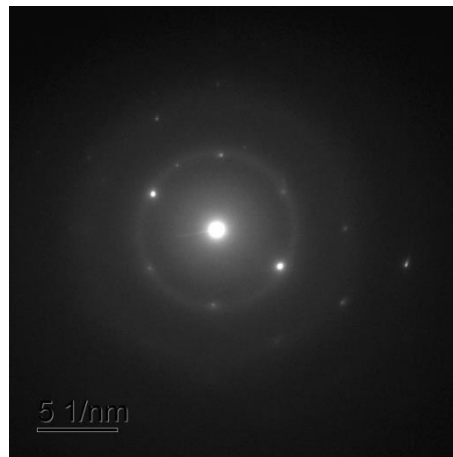


Рисунок 8 – Микродифракция от области 7 (аустенит)

Таким образом, качественно доказано, что мартенситный переход в сплаве  $Ti_2NiCu$  зависит как от температуры, так от толщины пластины. При этом явление блокировки перехода наблюдается также и при наличии границы мартенсит-аустенит. На следующем этапе экспериментов предстоит количественно исследовать зависимость положения границы от температуры и толщины и детально исследовать структуру в сечении клиновидной пластины.

*Работа выполнена при поддержке РФФ, грант № 17-19-01748.*

**Список литературы:**

1. Иржак А.В. и др. // Доклады Академии Наук. – 2017. – Т. 472. - № 2. - С. 139.
2. Glezer A.M. et al. // Journal of Nanoparticle Research. - 2003. – V. 5. – P. 551.
3. Пушин В.Г. и др. // Физика металлов и металловедение. – 1997. Т. 83 (3). С. 78
4. Pushin V.G. et. al. Physics of Metals and Metallography. – 2002. V. 94(1). P. S107
5. Waitz T. et al.// Materials Science and Technology.– 2008. – V. 24. - № 8. – P. 934
6. Waitz T. et al.// MRS bulletin. – 2009 – V. 34. – P. 814.
7. Belyaev S.P. et al // Journal of Alloys and Compounds. – 2014. V. 586. – P. S222.