

## КИНЕТИКА ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА 1-ГО РОДА В СПЛАВЕ $Ti_2NiCu$

Каманцев А.П.<sup>1</sup>, Коледов В.В.<sup>1</sup>, Романов А.А.<sup>1</sup>, Шавров В.Г.<sup>1</sup>, Шеляков А.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>НИЯУ МИФИ, Москва, Россия

kama@cplire.ru

Сплавы, полученные методом быстрой закалки из расплава методом спиннингования в виде лент, отличаются необычной структурой: аморфной, нано- и микрокристаллической, рядом уникальных свойств, например, высокой твердостью и прочностью, высокой магнитной проницаемостью, эффектом памяти формы (ЭПФ) и другими. Они находят применение в технике сенсоров и актюаторов. Однако, в настоящее время отсутствуют данные о скорости протекания фазовых мартенситных превращений (МП) в этих сплавах, то есть практически неизвестны принципиальные ограничения на такие важные для техники характеристики, как достижимое быстродействие и предельная мощность будущих устройств на их основе. Таким образом, цели представленной работы следующие:

1) Разработка методики для изучения эффекта гигантских термоиндуцированных деформаций быстрозакаленных сплавов в динамике и измерения характерных времен протекания прямого и обратного МП в быстрозакаленных лентах сплавов и сопутствующих им термоиндуцированных деформаций.

2) Экспериментальное исследование динамических свойств быстрозакаленных лент сплава  $Ti_2NiCu$ , определение времени тепловой релаксации и оценка характерных времен протекания прямого и обратного МП в них.

3) Оценка максимально достижимой удельной мощности (на единицу массы) мартенситного двигателя с рабочим телом на основе лент сплава  $Ti_2NiCu$ .

Образцы быстрозакаленных лент толщиной 30-40 мкм были получены путём быстрого охлаждения на медном вращающемся барабане (метод спиннингования), из исходного расплава  $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$ . Далее ленты, полученные в аморфном состоянии, подвергались отжигу в течение 7 минут при температуре  $550^{\circ}C$ , с последующим охлаждением до комнатной температуры. В результате в лентах формируется кристаллическая структура с МП с температурой вблизи  $40-50^{\circ}C$ . Измерение зависимости деформации от времени осуществлялось на специально разработанной установке, схема которой приведена на рисунке 1.

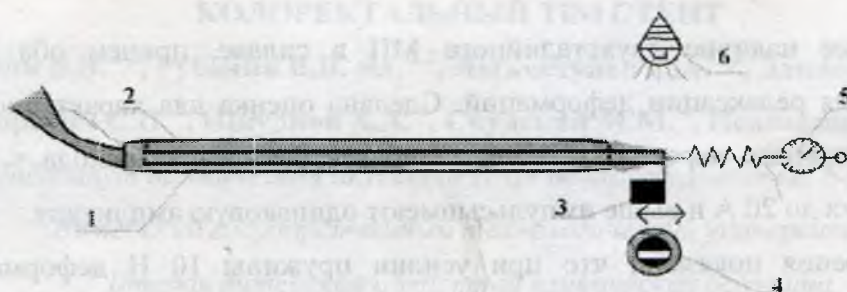


Рисунок 1. Схема экспериментальной установки для исследования кинетики ЭПФ

Установка включает ленту сплава  $Ti_2NiCu$  – 1, с припаянными к концам контактами, помещенную в стеклянную трубку с водой – 2, соединенную с водопроводом. К свободному концу ленты прикреплен флажок – 3 и динамометр – 5. Измерение проводится с помощью кремниевого фотоприемника (ФД-24к) – 4 и источника света (лампы накаливания) – 6.

Установка работает следующим образом: разогреваясь и охлаждаясь од действие импульса электрического тока, лента  $Ti_2NiCu$  испытывает за счет ЭПФ под действием пружины гигантские деформации и перемещает флажок, тем самым меняя освещенную площадь фотоприемника. Фотоприемник через эмиттерный повторитель соединен с АЦП (L-card E14-140), который передает оцифрованный сигнал на компьютер. Для создания импульсов тока, была разработана импульсная высоковольтная система питания и схема контроля длительности импульса.

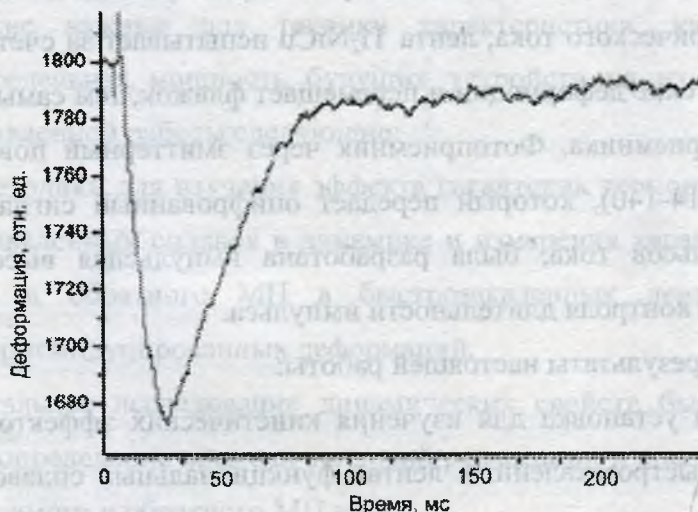
Основные результаты настоящей работы:

1) Создана установка для изучения кинетических эффектов при термоупругом МП и ЭПФ в быстрозакаленных лентах функциональных сплавов. Она позволяет в условиях интенсивного теплообмена с проточной водой измерять деформацию растяжения ленты сплава при прямом и обратном термоупругом МП, вызванном нагревом импульсом электрического тока до 50 А длительностью от 1 мс до 1 с. Растяжение ленты при обратном переходе осуществляется пружиной с усилием в пределах 0 – 10 Н. Временное разрешение установки ограничено резонансной частотой механической системы – 30 мс. Типичная зависимость деформации образца от времени показана на рисунке 2.

2) При экспериментальном изучении термоиндуцированной деформации растяжения ленты сплава  $Ti_2NiCu$  длиной 30 см, толщиной 40 мкм, шириной 1,5 мм обнаружен эффект «первого импульса», который заключается в том, что в интервале токов 12– 16 А первый импульс в посылке имеет в 2-5 большую амплитуду механического отклика, чем остальные. Предложено объяснение эффекта,

предполагающее наличие двухстадийного МП в сплаве, причем оба МП имеют различное время релаксации деформаций. Сделана оценка для характерного времени наиболее длительного перехода – 50мс, анаиболее быстрого перехода < 30 мс. При повышении тока до 20 А и выше импульсы имеют одинаковую амплитуду.

3) Измерения показали, что при усилии пружины 10 Н деформация ленты составляет 3 мм. Времени реакции ленты не более 30 мс. Тогда производимая механическая работа равна 30 мДж, а мощность – 1 Вт. Масса ленты –  $5\text{г}/\text{см}^3 \cdot 30\text{см} \cdot 0,004\text{см} \cdot 0,15\text{см} = 0,1\text{ г}$ , значит, удельная мощность сплава  $\text{Ti}_2\text{NiCu}$  составляет около 10 кВт/кг. Так как измеренные значения времени релаксации ограничены характерным временем резонанса механической системы установки, требуется дальнейшее усовершенствование механической системы для определения предельной частоты и максимальной удельной мощности функционального сплава.



**Рисунок 2.** Отклик ленты сплава с ЭПФ на электрический импульс длительностью 2 мс и амплитудой 27 А

Работа поддержана РФФИ, гранты № 12-08-01043, 12-07-00656, 13-07-12130, 14-07-31179, 14-07-00729.

1. D.D. Shin, K.P. Mohanchandra, G.P. Carman / Sensors and Actuators A **111** (2004) 166–171.
2. Sylvain Toru / Research internship report (2008).