

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

# **ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА**

## **СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ XV РОССИЙСКОЙ НАУЧНОЙ СТУДЕНЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

**18–20 мая 2016 г., г. Томск, Россия**

Томск  
Издательский Дом Томского государственного университета  
2016

## **Эффект памяти формы и сверхэластичность в высокопрочных состаренных кристаллах**

**$\text{Ni}_{50,2}\text{Ti}_{37,3}\text{Hf}_{12,5}$**

*Н.Ю. Суриков, Е.Ю. Панченко, Ю.И. Чумляков*

Сибирский физико-технический институт

Томского государственного университета, 634050, г. Томск

E-mail: Jet\_n@mail.ru

## **Shape memory effect and superelasticity in high-strength aged crystals $\text{Ni}_{50,2}\text{Ti}_{37,3}\text{Hf}_{12,5}$**

*N.Yu. Surikov, E.Yu. Panchenko, Yu.I. Chumlyakov*

Siberian Physical Technical Institute of Tomsk State University, 634050, Tomsk

E-mail: Jet\_n@mail.ru

Создание и разработка перспективных функциональных материалов с гарантированными свойствами – одно из важнейших направлений развития науки и техники. Поэтому исследования структуры, механических характеристик и функциональных свойств сплавов с эффектом памяти формы (ЭПФ) является актуальной задачей.

В рамках данной работы исследуется влияние старения на функциональные свойства легированного атомами Hf сплава никелида титана, испытывающего термоупругие B2–B19' мартенситные превращения (МП). Сплавы NiTiHf с содержанием Hf свыше 10% испытывают МП при высоких температурах и высоких внешних напряжениях свыше 1000 МПа и являются кандидатами для широкого применения в авиакосмической промышленности в качестве высокотемпературных сплавов с ЭПФ [1, 2]. В настоящее время интенсивно изучается возможность управления характеристическими параметрами функциональных свойств этих сплавов и создания условий для получения высокотемпературной сверхэластичности (СЭ) за счет различных режимов термообработки, при которых выделяются дисперсные частицы, не испытывающие B2-B19' МП [1–3]. Однако гетерофазные сплавы TiNiHf недостаточно изучены для их полноценного использования.

Поэтому задачей данного исследования является изучение зависимости функциональных свойств – эффекта памяти формы и сверхэластичности, прочностных характеристик фаз от микроструктуры состаренных монокристаллов, ориентированных вдоль [011]-направления, и поликристаллов сплава  $\text{Ni}_{50,2}\text{Ti}_{37,3}\text{Hf}_{12,5}$ .

В настоящей работе исследовали монокристаллы и поликристаллы после следующих термообработок: для монокристаллов – отжиг при температуре  $T = 1323 \text{ K}$ , 8 ч с последующим медленным охлаждением (M1); M1

+ старение при 773 К, 3 ч (M2); для поликристаллов – исходное состояние (П1) и старение при 773 К, 3 ч (П2).

Как показали электронно-микроскопические исследования, в монокристаллах  $Ni_{50,2}Ti_{37,3}Hf_{12,5}$  во всех исследуемых состояниях обнаружены частицы Н-фазы  $Ni_{0,52}Ti_{0,19}Hf_{0,29}$  с гранецентрированной орторомбической решеткой с параметрами  $a = 1,264$  нм,  $b = 0,882$  нм,  $c = 2,608$  нм. Размеры частиц составляют  $\sim 100$  нм (M1) и  $\sim 15$  нм (M2).

ЭПФ был исследован в экспериментах при охлаждении / нагреве под действием внешних постоянных сжимающих нагрузок с записью зависимости  $\epsilon(T)$  (рис. 1, а). В монокристаллах  $Ni_{50,2}Ti_{37,3}Hf_{12,5}$  в обоих состояниях наблюдается ЭПФ при внешних напряжениях свыше 75 МПа с обратимой деформацией до  $\epsilon_{\max} = 1,0\%$  в состоянии M1 и  $\epsilon_{\max} = 2,6\%$  в состоянии M2. Для поликристаллов ЭПФ с обратимой деформацией до  $\epsilon_{\max} = 1,8\%$  (П1) и  $\epsilon_{\max} = 1,7\%$  (П2) наблюдается с наличием необратимой деформации  $\epsilon_{\text{необр}} = 0,2\%$ .

Явление СЭ исследовано путем нагрузки-разгрузки при постоянной температуре в интервале от  $A_f$  до 523 К. Примеры кривых  $\sigma(\epsilon)$ , полученных в ходе эксперимента, приведены на рис. 1, б. Монокристаллы  $Ni_{50,2}Ti_{37,3}Hf_{12,5}$  обладают СЭ в температурных интервалах 198–348 К в состоянии M1 и 283–373 К в состоянии M2. В поликристаллах СЭ отсутствует во всем исследуемом интервале температур (рис. 1, б, кривая 2).

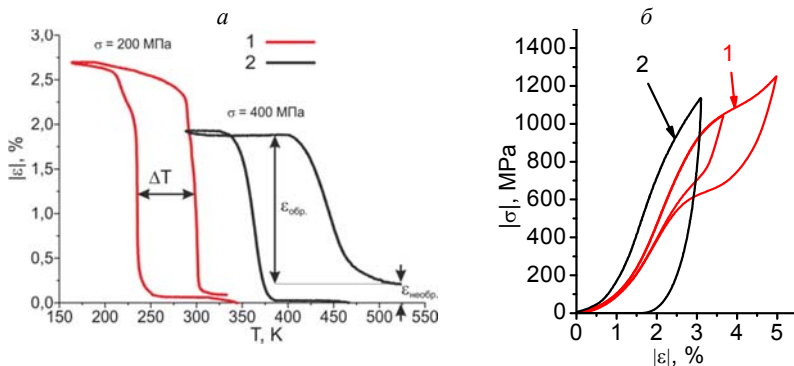


Рис. 1. Проявление функциональных свойств в состаренных монокристаллах и поликристаллах сплава  $Ni_{50,2}Ti_{37,3}Hf_{12,5}$ : а – кривые, характеризующие эффект памяти формы; б – кривые зависимости напряжения от деформации (1 – состояние M2; 2 – состояние П2)

На рис. 2 представлены экспериментальные данные зависимости критических напряжений образования мартенсита от температуры для исследуемых состояний. Вне зависимости от микроструктуры монокристаллы  $Ni_{50,2}Ti_{37,3}Hf_{12,5}$  характеризуются высокими прочностными свойствами

обеих фаз, развитием обратимых термоупругих МП под нагрузкой при высоких внешних осевых напряжениях до 1 200 МПа (М2) и до 1100 МПа (М1). Величина механического гистерезиса  $\Delta\sigma$  достигает 300÷400 МПа.

Показано, что для монокристаллов сплава  $\text{Ni}_{50,2}\text{Ti}_{37,3}\text{Hf}_{12,5}$  термообработкой можно варьировать в широких пределах критические напряжения образования мартенсита  $\sigma_{cr}$ , а также коэффициент температурного роста критических напряжений образования мартенсита  $\alpha = d\sigma_{cr}/dT$  (рис. 2).

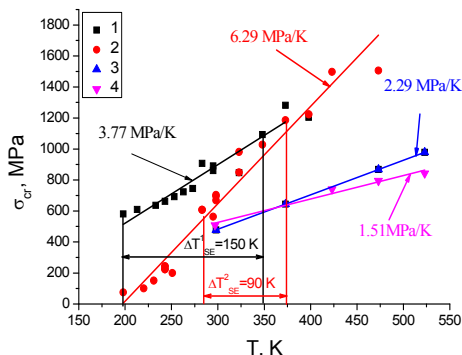


Рис. 2. Температурная зависимость критических напряжений образования мартенсита кристаллов  $\text{Ni}_{50,2}\text{Ti}_{37,3}\text{Hf}_{12,5}$ : 1 – отожженные монокристаллы М1; 2 – состаренные монокристаллы М2; 3 – исходные поликристаллы П1; 4 – состаренные поликристаллы П2

Старение при 773 К, 3 ч (М2) приводит в случае монокристаллов к значительному изменению коэффициента  $\alpha$  с 3,77 до 6,29 МПа/К, уменьшению и смещению в сторону высоких температур температурного интервала СЭ по сравнению с М1. В случае поликристаллов старение не приводит к значительным изменениям характера и параметров функциональных свойств (например, обратимая деформация при ЭПФ в состояниях П1 и П2 практически одинакова и может составлять до  $\epsilon_{max} = 1,8\%$ ).

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ 14-29-00012.*

## Литература

1. Karaca H.E., Saghaian S.M. et al. Compressive response of nickel-rich NiTiHf high-temperature shape memory single crystals along the [1 1 1] orientation // ScriptaMaterialia. 2011. № 65. P. 577–580.
2. Karaca H.E., Ded G. et al. Effects of nanoprecipitation on the shape memory and material properties of an Ni-rich NiTiHf high temperature shape memory alloy // ActaMaterialia. 2013. № 61. P. 7422–7431.
3. Firstov G.S., Van Humbeeck J. et al. Comparison of high temperature shape memory behavior for ZrCu-based, Ti–Ni–Zr and Ti–Ni–Hf alloys // ScriptaMaterialia. 2004. № 50. P. 243–248.