

**ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА МОНО- И ПОЛИКРИСТАЛЛОВ**

**ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СПЛАВА  $\text{Ni}_{50,3}\text{Ti}_{32,2}\text{Hf}_{17,5}$**

А.И. Тагильцев, Н.Г. Ларченкова

Научный руководитель: д.ф.-м.н., доцент, Е.Ю. Панченко, д.ф.-м.н., профессор, Ю.И. Чумляков

Национальный исследовательский Томский государственный университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина 36, 634050

E-mail: antontgl@gmail.com

**FUNCTIONAL PROPERTIES IN SINGLE- AND POLYCRYSTALS OF HIGH-TEMPERATURE**

**$\text{Ni}_{50,3}\text{Ti}_{32,2}\text{Hf}_{17,5}$  ALLOY**

A.I. Tagiltsev, N.G. Larchenkova

Scientific Supervisor: Dr. Sci., docent, E.Y. Panchenko, Dr. Sci., professor, Y.I. Chumlyakov

National Research Tomsk State University, Russia, Tomsk, Lenin str. 36, 634050

E-mail: antontgl@gmail.com

***Abstract.** Thermoelastic martensitic transformations were investigated in single crystals and polycrystals of high-temperature  $\text{Ni}_{50,3}\text{Ti}_{32,2}\text{Hf}_{17,5}$  alloy. It was shown, that functional properties, such as strain, thermal hysteresis, characteristic temperatures, superelasticity are different in single crystals and polycrystals. The inner microstructure provides either low characteristic temperature, decreasing hysteresis, difficult generation and easy growth of martensite in single crystals or high characteristic temperatures, increasing hysteresis, easy generation and difficult growth of martensite in polycrystals. Besides, it was suggested, that large coefficient  $\alpha$ , that characterizes the growth of stress with the increase of temperature  $M_s$ , in combination with wide thermal hysteresis result in the absence of superelasticity in polycrystals.*

**Введение.** Создание и исследование высокопрочных структурно-неоднородных материалов, способных испытывать термоупругие мартенситные превращения и вследствие этого обладать эффектом памяти формы и сверхэластичностью, является одной из наиболее перспективных и актуальных задач современного материаловедения. Данная работа посвящена исследованию моно- и поликристаллов сплава никелида титана, легированного Hf. Яркой особенностью сплава NiTiHf является то, что при увеличении легируемого элемента свыше 10-15% можно наблюдать реализацию термоупругого мартенситного превращения при высоких температурах [1]. Таким образом, способность сплавов NiTiHf испытывать МП при высоких как внешних приложенных напряжениях (свыше 1 ГПа), так и температурах (до 800 К) позволит применять сплавы в авиакосмической промышленности [2]. Однако в настоящее время данные сплавы исследованы слабо для их полноценного использования в каких-либо сферах деятельности. Именно поэтому целью текущей работы является изучение и сравнение функциональных свойств (величины эффекта памяти формы и сверхэластичности, температурного интервала развития СЭ) в моно- и поликристаллах сплава  $\text{Ni}_{50,3}\text{Ti}_{32,2}\text{Hf}_{17,5}$  при реализации B2-B19' мартенситного превращения при деформации сжатием.

**Материалы и методы исследования.** Для исследования были выбраны моно- и поликристаллы сплава  $\text{Ni}_{50,3}\text{Ti}_{32,2}\text{Hf}_{17,5}$  (ат.%). Поликристаллы данного сплава выплавлены в индукционной печи с использованием «чистых» компонентов (концентрация элемента составляет не менее 99,9%).

Монокристаллы с использованием данных поликристаллических заготовок были выращены методом Бриджмена в атмосфере инертного газа. Образцы вырезаны на электроискровом станке «АРТА-153» в форме параллелепипеда со сторонами  $3 \times 3 \times 6$  мм<sup>3</sup>. Для исследования монокристаллов была выбрана [111] ориентация, которая определялась на рентгеновском дифрактометре «Дрон-3» с использованием  $FeK\alpha$  излучения. Перед проведением механических испытаний образцы механически шлифовались, а затем электрохимически полировались. Механические испытания моно- и поликристаллов проведены на дилатометре ИМРС-1. Моно- и поликристаллы исследовали в исходном состоянии: на них не проводилось никаких дополнительных термических обработок после получения материала.

**Результаты.** В моно- и поликристаллах сплава  $Ni_{50,3}Ti_{32,2}Hf_{17,5}$  был исследован эффект памяти формы в циклах охлаждения/нагрева под действием внешних постоянных сжимающих нагрузок (рис. 1).

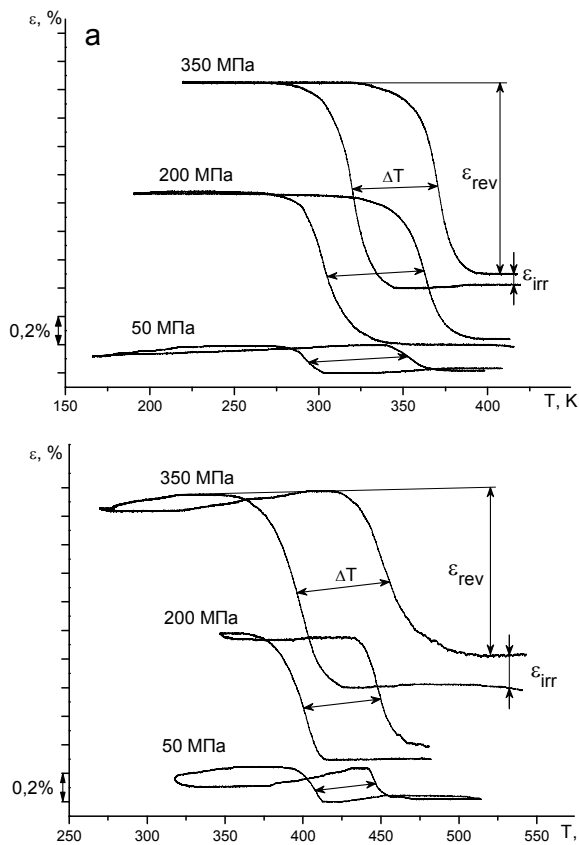


Рис. 1. Кривые  $\epsilon(T)$  при приложенных 50, 200 и 350 МПа в: (а) [111]-монокристаллах и (б) поликристаллах сплава  $Ni_{50,3}Ti_{32,2}Hf_{17,5}$

ответает за рост напряжений с увеличением температуры и обратно пропорционален деформации превращения. Кроме этого видно (рис. 2), что СЭ в поликристаллах не обнаружена. Предположительной причиной отсутствия СЭ как раз и является большой коэффициент  $\alpha$  [4]. Помимо всего прочего, МП в поликристаллах и монокристаллах сплава  $Ni_{50,3}Ti_{32,2}Hf_{17,5}$  различаются характеристическими температурами: МП в монокристаллах начинается при более низких температурах (на 100К), нежели в поликристаллах.

ЭПФ как в моно-, так и в поликристаллах реализуется при приложении 50 МПа и выше, низкая величина напряжений ( $<50$  МПа) не обеспечивает рост ориентированного варианта мартенсита и, соответственно, изменения размеров образца. Величина наблюдаемой обратимой деформации как в поликристаллах, так и в монокристаллах возрастает вплоть до 1,1% и 1,5%, соответственно, при увеличении приложенной постоянной нагрузки в ходе эксперимента вплоть до 350 МПа. Необратимая деформация в обоих состояниях появляется выше 100 МПа и вплоть до 350 МПа не превышает 0,3%. По полученным кривым  $\epsilon(T)$  была построена зависимость  $\sigma(T)$ , описывающая изменение температуры для начала прямого МП ( $M_s$ ) при заданной внешней нагрузке (рис. 2). Наблюдается линейная зависимость напряжений от температуры испытаний, что в общем случае описывается уравнением Клапейрона-Клаузиуса [3]. Эта зависимость может быть охарактеризована коэффициентом  $\alpha$ , который

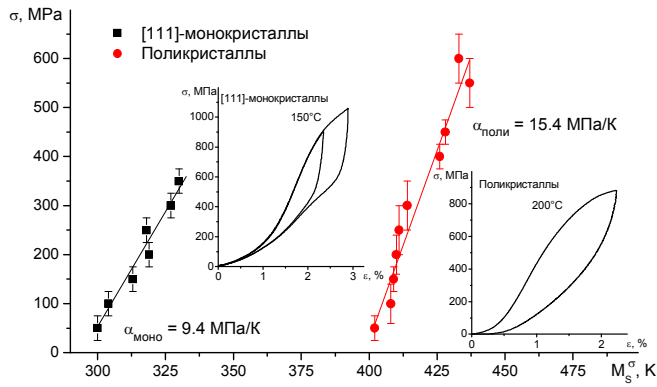


Рис. 2. Зависимость  $\sigma(M_s^0)$  для  $[111]$ -

монокристаллов и поликристаллов сплава  $Ni_{50,3}Ti_{32,2}Hf_{17,5}$

компоненты сплава находятся в пределах погрешности 0,5% от номинального состава. Увеличение концентрации Ni в монокристаллах может быть связано с образованием карбидов титана TiC и оксидов  $Ti_4Ni_2O$  во время роста монокристаллов. Во-вторых, отсутствие в монокристаллах границ зерен, которые служат преимущественным местом зарождения мартенсита. Одной из немаловажных особенностей МП является температурный гистерезис  $\Delta T$ , который характеризует рассеяние энергии при развитии обратимых МП. Обнаружена различная зависимость температурного гистерезиса от внешних сжимающих напряжений:  $\Delta T$  уменьшается в монокристаллах и увеличивается в поликристаллах с увеличением приложенных напряжений. Такое изменение  $\Delta T$  в монокристаллах связано с увеличением температуры начала прямого МП ( $M_s$ ), тогда как увеличение температурного гистерезиса  $\Delta T$  в поликристаллах зависит от повышения температуры обратного МП ( $A_f$ ). В поликристаллах границы зерен выступают как места преимущественного зарождения мартенсита, которое затрудняет переориентацию и движение межфазной границы, что в итоге приводит к увеличению гистерезиса  $\Delta T$  с ростом напряжений  $\sigma$  и деформации превращения  $\epsilon$ .

**Заключение.** Таким образом, подтверждено, что поли- и монокристаллы сплава  $Ni_{50,3}Ti_{32,2}Hf_{17,5}$  в исходном состоянии способны испытывать термоупругие мартенситные превращения с максимальной величиной эффекта памяти формы до 1.1% (поликристаллы) и 1.5% (монокристаллы). Сочетание высокого коэффициента  $\alpha$  и рост температурного гистерезиса может быть причиной отсутствия СЭ в исходных поликристаллах  $Ni_{50,3}Ti_{32,2}Hf_{17,5}$ .

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

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Saghaian S.M. [et. al.] Effects of aging on the shape memory behavior of Ni-rich  $Ni_{50.3}Ti_{29.7}Hf_{20}$  single crystals // Acta Materialia. – 2015. – V. 87. – P. 128–141.
2. 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 // Scripta Materialia. – 2011. – №65. – P. 577–580.
3. Сплавы с эффектом памяти формы / Под ред. Х. Фунакубо – М.: Металлургия, 1990. – 224 с.
4. Chumlyakov Yu. I., Kireeva I.V., Panchenko E.Yu., et. al. High-temperature superelasticity in CoNiGa, CoNiAl, NiFeGa, and TiNi monocrystals // Russian Physics Journal. – 2008. – V.51. – №10. – P. 1016-1036.