

**ВЛИЯНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ЭФФЕКТ ПАМЯТИ ФОРМЫ В  
КРИСТАЛЛАХ СПЛАВА  $Ni_{50,2}Ti_{37,3}Hf_{12,5}$**

Н.Ю. Суриков, А.И. Тагильцев.

Научные руководители: д.ф.-м.н., доц. Е.Ю. Панченко, д.ф.-м.н., профессор Ю.И. Чумляков

Сибирский физико-технический институт Томского государственного университета,

Россия, г. Томск, пл. Новособорная, 1, 634050

E-mail: [jet\\_n@mail.ru](mailto:jet_n@mail.ru)

**THE EFFECT OF THERMOMECHANICAL TREATMENT ON THE SHAPE MEMORY IN  
HETEROPHASE  $Ni_{50,2}Ti_{37,3}Hf_{12,5}$  ALLOYS**

N.Yu. Surikov, A.I. Tagiltsev.

Scientific Supervisors: Assist. Prof., Dr. E.Yu. Panchenko, Prof., Dr. Yu.I. Chumlyakov

Siberian Physical Technical Institute of Tomsk State University, Russia,

Tomsk, Novosobornaya sq., 1, 634050

E-mail: [jet\\_n@mail.ru](mailto:jet_n@mail.ru)

**Abstract.** *In this work the high-temperature shape memory effect was investigated in  $Ni_{50,2}Ti_{37,3}Hf_{12,5}$  alloys aged in austenite at 773 K 3h with/without an additional holding in the martensitic state under stress. It was experimentally shown, that the additional stress-holding in the martensitic state leads to the stabilization of stress-induced martensite, heavy increasing of reverse martensitic transformation start temperature  $A_s^g$  on 30 K, and gain of the reversible strain from 1,8% to 2,3% as compared with the aged alloys.*

**Введение.** Одним из актуальных направлений развития материаловедения является разработка высокопрочных «умных» материалов, испытывающих термоупругие B2–B19' мартенситные превращения (МП) с проявлением функциональных свойств – эффекта памяти формы (ЭПФ) и сверхэластичности. В данной работе исследуются гетерофазные поликристаллы никелида титана, легированного атомами Hf, обладающие эффектом памяти формы. Эти сплавы испытывают МП при высоких внешних напряжениях свыше 1000 МПа и высоких температурах до 800 К, что позволяет использовать данные материалы для решения более широкого спектра практических задач [1]. За счет различных режимов термических и термомеханических обработок, при выделении дисперсных частиц вторичных фаз, не испытывающих МП, существует возможность управления основными характеристиками функциональных свойств этих сплавов [1, 2]. В данной работе целью является изучения влияния выбранных термических и термомеханических обработок на эффект памяти формы в гетерофазных поликристаллах сплава  $Ni_{50,2}Ti_{37,3}Hf_{12,5}$ .

**Материалы и методы исследования.** Поликристаллы сплава номинального состава  $Ni_{50,2}Ti_{37,3}Hf_{12,5}$  (ат. %) произведены путем плазменно-дуговой плавки. Микроструктура изучена на просвечивающем электронном микроскопе JEOL JEM-2100 в ЦКП ИФПМ СО РАН «НАНОТЕХ» с ускоряющим напряжением 200 кВ и оптическом микроскопе Keyence VHX-2000. Изобарические циклы нагрев/охлаждение под действием постоянных сжимающих напряжений проведены на дилатометре ИМРС-1.

Поликристаллы  $Ni_{50,2}Ti_{37,3}Hf_{12,5}$  исследовались в двух состояниях: 1) старение при  $T = 773$  К, 3ч в аустенитном состоянии (ТО); 2) старение при  $T = 773$  К, 3ч в аустенитном состоянии с дополнительной

выдержкой в мартенситном состоянии при  $T = 373 \text{ K}$  1ч под нагрузкой (ТМО). Предположительно, выдержка в мартенситном состоянии под нагрузкой должна стабилизировать мартенситную фазу.

**Результаты.** В кристаллах после ТО и ТМО средний размер зерна составляет 30 мкм. Микроструктура поверхности образца представлена на Рис. 1 а. С помощью рентгеновских и электронно-микроскопических исследований с использованием энергодисперсионного анализатора установлен химический состав полученных кристаллов  $\text{Ni}_{50,4}\text{Ti}_{37,3}\text{Hf}_{12,3}$  (ат.%), который с учетом погрешности  $\pm 0,5 \%$  близок к номинальному. На светлопольном изображении обнаружены области, обогащенные по Hf вплоть до 91 % (Рис. 1 б), не растворенные в материале при плавке.

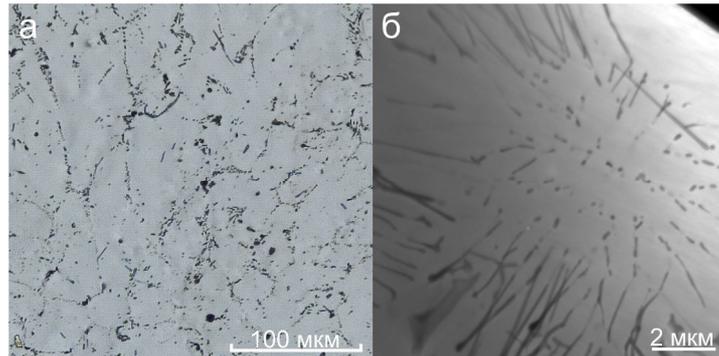


Рис. 1. Структура поликристаллов  $\text{Ni}_{50,2}\text{Ti}_{37,3}\text{Hf}_{12,5}$ ; а – оптическая микроскопия поверхности; б – электронно-микроскопическое светлопольное изображение.

Эффект памяти формы исследовали при постоянной нагрузке в циклах нагрев/охлаждение (Рис. 2 а). Изменение размеров образца при термоциклировании в свободном состоянии (двойной эффект памяти формы) не наблюдается в обоих состояниях аналогично монокристаллам  $\text{NiTiHf}$  [2, 3]. Напряжения, необходимые для роста ориентированного варианта мартенсита и появления обратимой деформации, связанной с мартенситным превращением в состояниях ТО и ТМО близки и составляют 25 МПа. В поликристаллах  $\text{Ni}_{50,2}\text{Ti}_{37,3}\text{Hf}_{12,5}$  после ТО и ТМО наблюдается высокотемпературный ЭПФ. Характеристические температуры  $B2-B19'$  МП ( $M_s^\sigma$ ,  $A_f^\sigma$ ) находятся в температурном интервале от 350 К до 450 К. С ростом напряжений обратимая деформация в кристаллах после ТМО увеличивается на большую величину, чем в состоянии ТО (Рис. 2 б), что говорит о снижении сопротивления ориентированному росту кристаллов  $B19'$ -мартенсита. ЭПФ в состоянии ТМО протекает, в основном, с отсутствием необратимой деформации, в то время как при ТО необратимая деформация достигает 0,2 %. Величина ЭПФ в циклах нагрев/охлаждение при 400 МПа достигает 1,8 % и 2,3 % в состояниях ТО и ТМО, соответственно.

Несмотря на стабилизацию мартенситного состояния, при термомеханической обработке ТМО, температуры  $M_s^\sigma$  и  $A_f^\sigma$  начала прямого и конца обратного МП практически не изменяются. Однако при ТМО наблюдается значительный рост температуры  $A_s^\sigma$  начала обратного МП (Рис. 2 а), что свидетельствует о стабилизации мартенсита напряжений [4]. ТМО также приводит к изменению характера превращения: уменьшается сопротивление росту ориентированного варианта мартенсита за счет перераспределения точечных дефектов в материале в соответствии с симметрией моноклинного  $B19'$ -мартенсита. Это приводит к увеличению обратимой деформации и уменьшению температурных интервалов МП на 40 К по сравнению с состаренными сплавами после ТО. Как видно из Рис. 2 а в поликристаллах после ТМО  $B2-B19'$  МП прямое и обратное МП протекает в узких температурных

интервалах и приобретает черты взрывного превращения. Поэтому вполне можно ожидать, что состаренные с дополнительной выдержкой в мартенсите кристаллы будут обладать эффектом сверхэластичности в отличие от поликристаллов после ТО, которые не проявляют СЭ поведения.

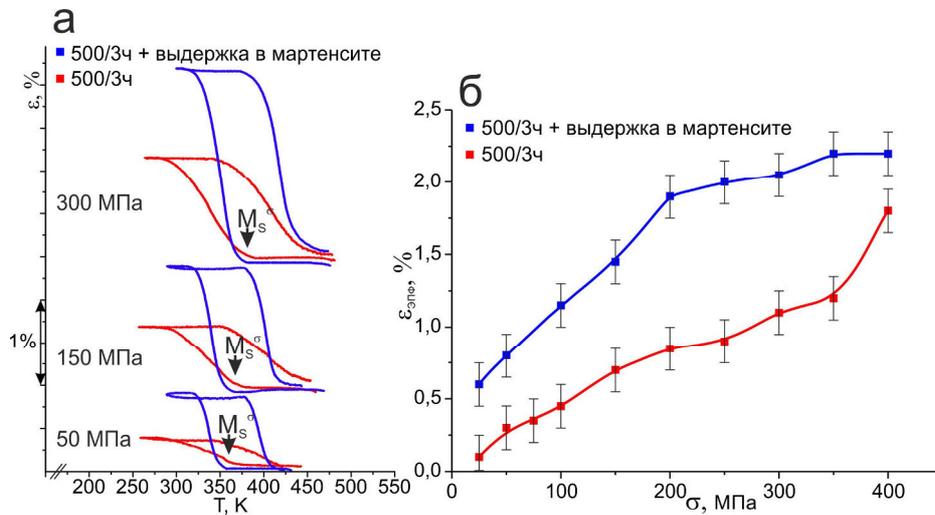


Рис. 2. Эффект памяти формы в поликристаллах  $Ni_{50,2}Ti_{37,3}Hf_{12,5}$ ; а – кривые «деформация – температура»; б – зависимость величины ЭПФ от приложенного напряжения.

**Заключение.** Экспериментально установлено, что предложенная в настоящей работе термомеханическая обработка (старение 773 К 3ч с дополнительной низкотемпературной выдержкой в мартенситном состоянии при  $T = 373$  К 1ч под нагрузкой) позволяет эффективно управлять характеристиками высокотемпературного эффекта памяти формы в кристаллах сплава  $Ni_{50,2}Ti_{37,3}Hf_{12,5}$ , а именно: приводит к появлению взрывного характера В2-В19' МП, увеличению величины эффекта памяти формы с 1,8 % до 2,3 %, увеличению температур  $A_s^\sigma$  на 30 К и стабилизации мартенсита напряжений.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 14-29-00012.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. G.S. Firstov, J. Van Humbeeck et al. Comparison of high temperature shape memory behavior for ZrCu-based, Ti–Ni–Zr and Ti–Ni–Hf alloys. // Scripta Materialia. – 2004. – № 50. – P. 243–248.
2. H.E. Karaca, S.M. Saghaian et al. Effects of nanoprecipitation on the shape memory and material properties of an Ni-rich NiTiHf high temperature shape memory alloy // Acta Materialia. – 2013. – №61. – P.7422–7431.
3. N. Y. Surikov, A. S. Eftifeeva et al. Stress-induced martensitic transformation in high-strength [236]-oriented  $Ni_{51}Ti_{36,5}Hf_{12,5}$  single crystals. // IOP Conf. Series. – 2015. – № 93. – p. 012047.
4. K. Otsuka, X. Ren. Mechanism of martensite aging effects and new aspects. // Materials Science and Engineering. – 2001. – № A312. –P. 207–218.