

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ



Национальный исследовательский
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

**Сборник материалов
XVI Российской научной
студенческой конференции**

Томск, 17–20 апреля 2018 г.



ТОМСК
«Издательство НТЛ»
2018

Влияние бора на функциональные свойства в монокристаллах FeNiCoAlNb(B) при деформации растяжением

М.Ю. Панченко

Томский государственный университет, г.Томск

В настоящей работе представлены результаты исследования влияния бора на эффект памяти формы (ЭПФ) и сверхэластичность (СЭ) при термоупругом γ - α' -мартенситном превращении (МП) в монокристаллах Fe-28 % Ni-17 % Co-11,5 % Al-2,5 % Nb(-0,05 % B) (ат.%) при деформации растяжением. Известно, что для достижения термоупругих γ - α' -МП под нагрузкой в сплавах FeNiCoAlX (X = Nb, Ta, Ti) выделяют когерентные частицы γ' -фазы, атомно-упорядоченной по типу $L1_2$ [1]. В поликристаллах данных сплавов при выделении частиц γ' -фазы в теле зерна происходит образование по границам зерен β -фазы, которая приводит к хрупкому разрушению [2]. Для подавления β -фазы и получения эффекта памяти формы и значительной по величине сверхэластичности до 13,5 % поликристаллы легируют бором [2]. Однако до сих пор не выяснено влияние бора на γ - α' -МП в отсутствие границ зерен. Для того чтобы это выяснить, необходимы исследования на монокристаллах данного сплава. Для исследования были выбраны ориентированные вдоль [001]-направления монокристаллы, FeNiCoAlNb (Nb), состаренные при 973 К в течение 5 ч, и FeNiCoAlNbB (NbB), состаренные при 973 К в течение 10 ч. При данных термообработках кристаллы с бором и без бора имеют равный размер частиц γ' -фазы $d = 6-8$ нм с объемной долей $\gamma = 15-20$ %. Получение одинакового размера частиц γ' -фазы в кристаллах Nb и NbB позволит исследовать влияние бора на величину ЭПФ, СЭ, механического $\Delta\sigma$ и термического ΔT гистерезисов под нагрузкой при γ - α' -МП.

При исследовании зависимости электросопротивления от температуры $\rho(T)$ в интервале 77 К – 400 К в свободном состоянии изменений на кривых $\rho(T)$, связанных с МП, в кристаллах Nb и NbB не обнаружено. Следовательно, температура начала МП при охлаждении M_s кристаллов Nb и NbB с размером частиц γ' -фазы $d = 6-8$ нм находится ниже температуры жидкого азота, и поэтому выяснить влияние бора на температуру M_s не удастся.

В таблице представлены результаты исследований механических и функциональных свойств кристаллов Nb и NbB с одинаковым размером частиц γ' -фазы. Анализ представленных данных в таблице показал, что критические напряжения при температуре M_d $\sigma_{0,1}(M_d)$ (M_d – температура, при которой напряжения высокотемпературной фазы оказываются равны-

ми напряжениям, необходимым для образования мартенсита под нагрузкой), величина $\alpha = d\sigma_{0,1}/dT$, величина ЭПФ $\varepsilon_{\text{ЭПФ}}$ и СЭ $\varepsilon_{\text{СЭ}}$ в сплавах Nb и NbB оказываются близкими.

Механические и функциональные свойства монокристаллов FeNiCoAlNb(B) при деформации растяжением

Кристаллы	Размер частиц γ' -фазы, нм	$\sigma_{0,1}(\text{Мд}), \text{МПа}$ $\pm 5 \text{МПа}$	$\alpha = d\sigma_{0,1}/dT, \text{МПа/К}$	$\varepsilon_{\text{ЭПФ}}^{\text{max}}, \%$ $\pm 0,5 \%$	$\Delta T, \text{К}$ $\pm 5\text{К}$	$\varepsilon_{\text{СЭ}}^{\text{max}}, \%$ $\pm 0,5 \%$	$\Delta\sigma, \text{МПа}$, при 77 К $\pm 5 \text{МПа}$
Nb	6 – 8	998	2,1	3,6	65	5,0	100
NbB	6 – 8	1000	2,1	4,0	155	4	168

Следовательно, бор концентрацией 0,05 ат.% не оказывает влияние на величину обратимой деформации в изобарических и изотермических экспериментах по изучению ЭПФ и СЭ соответственно. При этом он значительно увеличивает термический гистерезис $\Delta T^{\text{NbB}}/\Delta T^{\text{Nb}} = 2,4$ и механический гистерезис $\Delta\sigma^{\text{NbB}}/\Delta\sigma^{\text{Nb}} = 1,68$ (таблица).

Электронно-микроскопические исследования показали, что бориды при концентрации бора 0,05 ат.% в кристаллах NbB при старении 973 К, 10 ч не образуются и, следовательно, бор находится в твердом растворе. Как было отмечено ранее, в кристаллах NbB размер частиц γ' -фазы, аналогичный наблюдаемому в кристаллах Nb, достигается при больших временах старения. Таким образом, во-первых, находясь в твердом растворе, бор замедляет процессы старения, во-вторых, увеличивает сопротивление движению межфазных и двойниковых границ α' -мартенсита, что подтверждается увеличением механического и термического гистерезисов по сравнению с кристаллами без бора.

Автор выражает благодарность своим научным руководителям д.ф.-м.н. И.В. Киреевой и д.ф.-м.н. Ю.И. Чумлякову за помощь в обсуждении результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чумляков Ю.И., Киреева И.В., Панченко Е.Ю., Тимофеева Е.Е. Механизмы термоупругих мартенситных превращений в высокопрочных монокристаллах сплавов на основе железа и никелида титана. – Томск: Изд-во НТЛ, 2016. – 240 с.
2. Tanaka Y., Himuro Y., Kainuma R. Ferrous polycrystalline shape memory alloy showing huge superelasticity // Science. – 2010. – V. 327. – No. 3. – P. 1488–1490.

Panchenko M.Yu. Effect of boron on functional properties in single crystals of FeNiCoAlNb(B) under tensile strain

Панченко Марина Юрьевна, магистрантка; panchenko.marina4@gmail.com