

**ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ЧАСТИЦ НА ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ  
СВОЙСТВА МОНОКРИСТАЛЛОВ СПЛАВА НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА FeNiCoAlNb**

М.Ю. Панченко

Научный руководитель: гл. н. с., д.ф.-м.н. И.В. Киреева, профессор, д.ф.-м.н. Ю.И. Чумляков

Национальный исследовательский Томский государственный университет,

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

E-mail: [panchenko.marina4@gmail.com](mailto:panchenko.marina4@gmail.com)**EFFECT OF PARTICLE SIZE ON FUNCTIONAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF  
SINGLE CRYSTALS OF IRON-BASED FeNiCoAlNb ALLOY**

M.Yu. Panchenko

Scientific Supervisor: chief researcher, Dr. I.V. Kireeva, Prof., Dr. Yu.I. Chumlaykov

National Research Tomsk State University, Russia, Tomsk, Lenina Str.36, 634050

E-mail: [panchenko.marina4@gmail.com](mailto:panchenko.marina4@gmail.com)

**Abstract.** It is shown that [001]-single crystals Fe-28%Ni-17%Co-11.5%Al-2.5Nb (at. %) alloy aged at  $T=973$  K, 1–20 hours are observed  $\gamma'$ -phase particle size of 3-25 nm, which give rise to thermoelastic of the  $\gamma$ - $\alpha'$  martensitic transformation. The effect of size of  $\gamma'$ -phase particle on the critical stress of high temperature phase, the temperature range of superelasticity and the mechanical hysteresis are investigated.

**Введение.** В последнее время конструкционные материалы с функциональными свойствами привлекают все больше внимание исследователей. Известно, что сплавы на основе железа имеют атомно-неупорядоченную структуру, и, как правило, в них наблюдаются нетермоупругие мартенситные превращения (МП) [1]. При выделении наноразмерных частиц  $\gamma'$ -фазы атомно-упорядоченной по типу  $L1_2$  в сплаве на основе железа FeNiCoAlNb  $\gamma$ - $\alpha'$  МП становится термоупругим ( $\gamma$ -ГЦК – гранецентрированная кубическая решетка,  $\alpha'$ -ОЦТ – объемно-центрированная тетрагональная решетка) и наблюдается ЭПФ и СЭ [2-3]. Для успешного практического применения данных сплавов необходимо выяснить влияние размера частиц на осевые напряжения  $\sigma_{0,1}$  высокотемпературной фазы, величину СЭ и механический гистрезис в монокристаллах сплава Fe-28%Ni-17%Co-11.5%Al-2.5Nb (ат. %).

**Материалы и методы исследования.** Монокристаллы сплавов Fe-28%Ni-17%Co-11.5%Al-2.5%Nb (ат.%) выращивали методом Бриджмена в среде инертного газа. Для исследования были выбраны монокристаллы, ориентированные вдоль [001]-направления, так как данная ориентация при растяжении обладает максимальным теоретическим значением деформации решетки  $\varepsilon_0[001]=8,7$  % при  $\gamma$ - $\alpha'$  МП [1]. После роста монокристаллы гомогенизировали при 1553 К, 6 ч в среде инертного газа. Старение монокристаллов проводили при температуре 973 К в течение 1-20 ч в среде инертного газа с последующей закалкой в воду. Механические свойства исследовали на испытательной машине Instron-5969 при скорости деформации  $4 \cdot 10^{-4}$  с<sup>-1</sup> в интервале температур от 77 до 550 К.

**Результаты.** Электронно-микроскопические исследования показали, что с увеличением времени старения при температуре  $T=973$  К размер частиц  $r$  увеличивается от 3–5 нм при старении в течение 1

часа до 18–25 нм при 20 часах. Частицы  $\gamma'$ -фазы имеют когерентное сопряжение с матрицей, о чем свидетельствуют области диффузного рассеяния вокруг фундаментальных рефлексов (рис. 1).

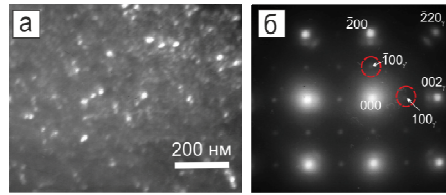


Рис.1. Электронно-микроскопическое наблюдение частиц  $\gamma'$ -фазы в [001] монокристаллах сплава FeNiCoAlNb, состаренных при 973K, 10 ч: (а) – темнопольное изображение; (б) – микродифракционная картина к (а);

Исследования температурной зависимости электрического сопротивления  $\rho(T)$  монокристаллов FeNiCoAlNb с размером частиц  $\gamma'$ -фазы  $r < 18$  нм (старение 1–10 ч), показали, что изменений на зависимости  $\rho(T)$ , связанных с  $\gamma$ - $\alpha'$  МП не обнаружено при охлаждении до 77 К и при нагреве до 400 К, следовательно, температура прямого МП при охлаждении Ms в монокристаллах FeNiCoAlNb с малым размером частиц  $\gamma'$ -фазы находится ниже температуры жидкого азота. При размере частиц  $r = 18 - 25$  нм (старение 20 ч) на зависимости  $\rho(T)$  наблюдается  $\gamma$ - $\alpha'$  МП и Ms=116 К (рис. 2). Следует отметить, что получить полную петлю на кривой зависимости  $\rho(T)$  не удастся из-за низких значений температуры конца МП при охлаждении Mf.

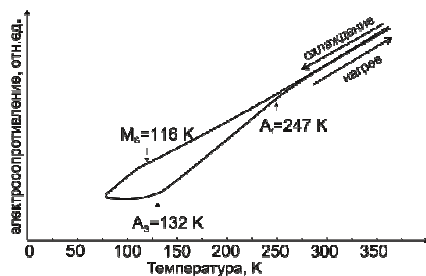


Рис.2 – Зависимость электрического сопротивления от температуры для монокристаллов FeNiCoAlNb, состаренных при 973 K, 20 ч.

На рис. 3 представлены данные исследования влияния размера частиц  $\gamma'$ -фазы на уровень напряжений  $\sigma_{0.1}$  исходной высокотемпературной фазы, температурный интервал СЭ  $\Delta T_{сэ}$ , величину СЭ и механического гистерезиса  $\Delta\sigma$  [001]-монокристаллах сплава FeNiCoAlNb.

Анализ результатов, представленных на рис. 3а показывает, что в [001]-монокристаллах сплава FeNiCoAlNb на зависимости  $\sigma_{0.1}(r)$ , где напряжения  $\sigma_{0.1}$  высокотемпературной фазы определяли при  $T = M_d$  (кривая 1) и при температуре выше  $M_d$   $T = 460$  К (кривая 2), наблюдается три стадии: первая стадия – стадия роста напряжений  $\sigma_{0.1}$  при времени старения 1–5 часов и размером частиц  $r = 3-5$  нм; затем вторая стадия – стадия насыщения  $\sigma_{0.1}$ , напряжения растут слабее и достигают своего максимального значения при размере частиц  $r = 10-14$  нм; третья стадия – стадия падения  $\sigma_{0.1}$  при  $r > 14$  нм. Известно, что при срезании скользящими дислокациями когерентных с матрицей частиц уровень прочностных свойств высокотемпературной фазы определяется размером и объемной долей частиц и описывается соотношением (1):

$$\sigma_{cr} = 3 \cdot G \cdot E^{3/2} \cdot (f \cdot r / b)^{1/2} \quad (1)$$

Здесь  $G$  – модуль сдвига высокотемпературной фазы,  $E = \Delta a/a$  – параметр несоответствия решеток высокотемпературной фазы и частицы ( $\Delta a = a_m - a_c$ );  $f$  – объемная доля частиц;  $r$  – радиус частицы;  $b$  – модуль вектора Бюргера скользящей дислокации. Из соотношения (1) следует, что, чем больше  $r$  и  $f$ , тем выше уровень напряжений высокотемпературной фазы. Это совпадает с полученными экспериментальными данными по исследованию зависимости  $\sigma_{0.1}(r)$  при  $r \leq 12$  нм. При размере частиц

$r > 12$  нм наблюдается уменьшение уровня напряжений  $\sigma_{0.1}$  высокотемпературной фазы. Обычно падение уровня напряжений связывают с потерей когерентности частиц. В монокристаллах FeNiCoAlNb с использованием электронной микроскопии было показано, что при  $r = 12-25$  нм частицы  $\gamma'$ -фазы имеют когерентное сопряжение с исходной фазой, и уменьшение напряжений  $\sigma_{0.1}$ , связано с выделением частиц хрупкой  $\beta$ -фазы при длительных временах старения [2].

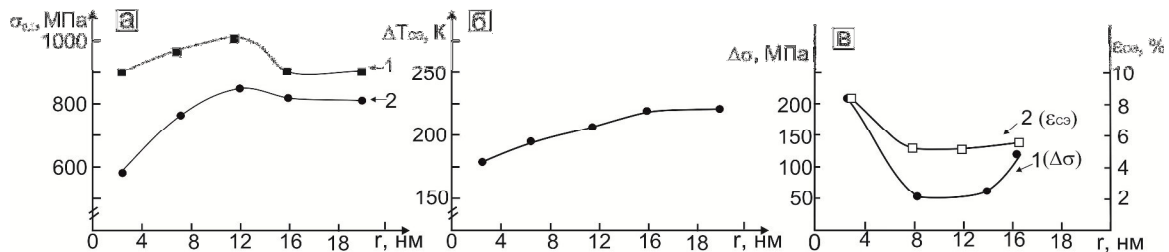


Рис. 3а – Зависимость осевых напряжений  $\sigma_{0.1}$  при 1)  $T = M_d$  и 2)  $T = 460$  К (а); механического гистерезиса  $\Delta\sigma$  и величины сверхэластичности  $\epsilon_{cs}$  при температуре испытания 77 К (б); температурного интервала сверхэластичности  $\Delta T_{cs}$  (в) от размера частиц для [001]-монокристаллов сплава FeNiCoAlNb;

Уровень критических напряжений высокотемпературной фазы определяет зависимость температурного интервала СЭ  $\Delta T_{cs}$ , механического гистерезиса  $\Delta\sigma$  и величины СЭ  $\epsilon_{cs}$  от размера частиц  $\gamma'$ -фазы. Температурный интервал СЭ  $\Delta T_{cs}$  (рис. 3б) при размере частиц  $r = 3-5$  нм равен  $\Delta T_{cs} = 178$  К увеличивается до  $\Delta T_{cs} = 220$  К при размере частиц  $r = 16-25$  нм. Максимальное значение механического гистерезиса  $\Delta\sigma = 220$  МПа и величины СЭ  $\epsilon_{cs} = 8,5$  % наблюдается при размере частиц  $r = 3-5$  нм, а при размере частиц  $r = 8-14$  нм механический гистерезис равен  $\Delta\sigma = 50-60$  МПа и  $\epsilon_{cs} = 6$  %. Это коррелирует с данными зависимости  $\sigma_{0.1}(r)$  (рис 3а), чем меньше размер частиц  $r$ , тем ниже уровень напряжений высокотемпературной фазы  $\sigma_{0.1}$ , тем больше  $\Delta\sigma$  и  $\epsilon_{cs}$ .

**Вывод.** Таким образом, на монокристаллах сплава Fe-28%Ni-17%Co-11.5%Al-2.5%Nb (ат. %) показано, что при старении 1–20 ч выделяются частицы  $\gamma'$ -фазы размером  $r = 3-25$  нм, которые приводят к появлению термоупругих  $\gamma-\alpha'$  МП. Показано что размер частиц  $\gamma'$ -фазы определяет уровень напряжений  $\sigma_{0.1}$  исходной высокотемпературной фазы, температурный интервал сверхэластичности  $\Delta T_{cs}$ , механический гистерезис  $\Delta\sigma$  и величину сверхэластичности. Таким образом, изменяя размер частиц  $\gamma'$ -фазы можно управлять механическими и функциональными свойствами сплава на основе железа FeNiCoAlNb.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-29-00012).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Olson G. B, Cohen M. (1972) A mechanism for the strain-induced nucleation of martensitic transformation // Journal of the Less-Common Metals Vol. 28. pp. 107-118.
2. Чумляков Ю. И., Киреева И.В., Куц О.А., Панченко М.Ю., Карака Э., Майер Г. Эффект памяти формы и сверхэластичность в [001]-монокристаллах ферромагнитного сплава FeNiCoAlNb(B) // Известия Вузов. Физика. – 2015. – Т. 58. – № 7. – С. 16–23.
3. Omori T, Kainuma R, Abe S., Tanaka Y (2013) Thermoelastic martensitic transformation and superelasticity in Fe-Ni-Co-Al-Nb-B polycrystalline alloy // Scripta Materialia Vol. 69. pp. 812–815.