

**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

**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

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 γ' -phase particle size of 3-25 nm, which give rise to thermoelastic of the γ - α' martensitic transformation. The effect of size of γ' -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 γ' -фазы атомно-упорядоченной по типу $L1_2$ в сплаве на основе железа FeNiCoAlNb γ - α' МП становится термоупругим (γ -ГЦК – гранецентрированная кубическая решетка, α' -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 γ - α' 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⁻¹ 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 γ' -фазы имеют когерентное сопряжение с матрицей, о чем свидетельствуют области диффузного рассеяния вокруг фундаментальных рефлексов (рис. 1).

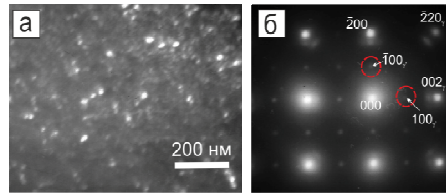


Рис.1. Электронно-микроскопическое наблюдение частиц γ' -фазы в [001] монокристаллах сплава FeNiCoAlNb, состаренных при 973K, 10 ч: (а) – темнопольное изображение; (б) – микродифракционная картина к (а);

Исследования температурной зависимости электрического сопротивления $\rho(T)$ монокристаллов FeNiCoAlNb с размером частиц γ' -фазы $r < 18$ нм (старение 1–10 ч), показали, что изменений на зависимости $\rho(T)$, связанных с γ - α' МП не обнаружено при охлаждении до 77 К и при нагреве до 400 К, следовательно, температура прямого МП при охлаждении M_s в монокристаллах FeNiCoAlNb с малым размером частиц γ' -фазы находится ниже температуры жидкого азота. При размере частиц $r = 18 - 25$ нм (старение 20 ч) на зависимости $\rho(T)$ наблюдается γ - α' МП и $M_s = 116$ 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 M_f .

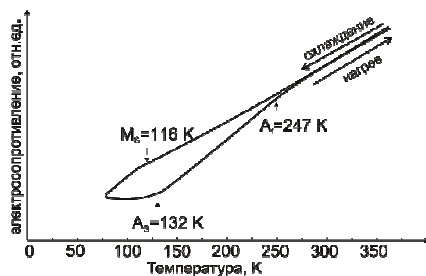


Рис.2 – Зависимость электрического сопротивления от температуры для монокристаллов FeNiCoAlNb, состаренных при 973 K, 20 ч.

На рис. 3 представлены данные исследования влияния размера частиц γ' -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 γ' -фазы имеют когерентное сопряжение с исходной фазой, и уменьшение напряжений $\sigma_{0.1}$, связано с выделением частиц хрупкой β -фазы при длительных временах старения [2].

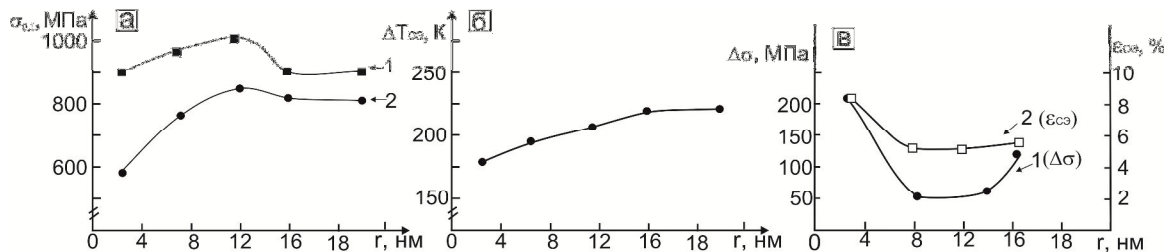


Рис. 3а – Зависимость осевых напряжений $\sigma_{0.1}$ при 1) $T = M_d$ и 2) $T = 460$ К (а); механического гистерезиса $\Delta\sigma$ и величины сверхэластичности ϵ_{cs} при температуре испытания 77 К (б); температурного интервала сверхэластичности ΔT_{cs} (в) от размера частиц для [001]-монокристаллов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

Уровень критических напряжений высокотемпературной фазы определяет зависимость температурного интервала СЭ ΔT_{cs} , механического гистерезиса $\Delta\sigma$ и величины СЭ ϵ_{cs} от размера частиц γ' -фазы. Температурный интервал СЭ ΔT_{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 ϵ_{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 γ' -фазы размером $r = 3-25$ нм, которые приводят к появлению термоупругих $\gamma-\alpha'$ МП. Показано что размер частиц γ' -фазы определяет уровень напряжений $\sigma_{0.1}$ исходной высокотемпературной фазы, температурный интервал сверхэластичности ΔT_{cs} , механический гистерезис $\Delta\sigma$ и величину сверхэластичности. Таким образом, изменяя размер частиц γ' -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.