

**ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ γ' -ФАЗЫ НА СВЕРХЭЛАСТИЧНОСТЬ В
МОНОКРИСТАЛЛАХ СПЛАВА FeNiCoAlTi**

В.В. Поклонов, С.Э. Лямкин

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

Национальный исследовательский Томский государственный университет,

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

E-mail: poklonov_vyacheslav@mail.ru

**THE EFFECT OF SIZE OF γ' PHASE DISPERSED PARTICLES ON SUPERELASTICITY IN
FeNiCoAlTi SINGLE CRYSTALS**

V.V. Poklonov, S.E. Lyamkin

Scientific Supervisors: professor, Dr. Yu.I. Chumlaykov, chief researcher, Dr. I.V. Kireeva,

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

E-mail: poklonov_vyacheslav@mail.ru

***Abstract.** In [001] single crystals of FeNiCoAlTi alloy, it is shown that precipitation of particles of the ordered γ' -phase in the course of aging at $T=873$ K for 4 h and $T=973$ K for 5, 7 h results in the development of superelasticity. It is experimentally found that variation of size of γ' -phase dispersed particles allows controlling mechanical and functional properties.*

Введение. Авторами работ [1–3] показано, что в неупорядоченных сплавах на основе железа FeNiCoTi условия для термоупругих мартенситных превращений (МП) создаются за счет выделения наноразмерных упорядоченных частиц, которые сами не испытывают МП. Известно, что с помощью вариации размера и объемной доли дисперсных частиц γ' -фазы можно изменять не только тип структуры мартенсита, но и уровень напряжений пластического течения аустенитной фазы, температуры МП и температурный интервал сверхэластичности (СЭ) [1–3]. Целью настоящей работы является исследование влияния размера дисперсных частиц γ' -фазы на развитие термоупругого γ - α' -МП под нагрузкой и СЭ в [001]-монокристаллах сплава на основе железа Fe–28%Ni–17%Co–11,5%Al–2,5%Ti (ат.%).

Материалы и методы исследования. Монокристаллы сплава Fe–28%Ni–17%Co–11,5%Al–2,5%Ti (ат.%) выращивали в среде инертного газа методом Бриджмена. Ориентацию кристаллов определяли на дифрактометре ДРОН-3. Образцы для растяжения вдоль [001]-направления вырезали на электроискровом станке. Выбор ориентации [001] обусловлен максимальным теоретическим значением величины деформации решетки $\varepsilon_{\sigma}=8,7\%$ при деформации растяжением [1]. Гомогенизацию образцов проводили в атмосфере инертного газа He при температуре 1550 К, 20 часов. После закалки от 1550 К, 1 час в воду монокристаллы при комнатной температуре находились в однофазном состоянии. Для выделения наноразмерных частиц γ' -фазы проводили старение в атмосфере инертного газа He при температурах 873 К, 4 часа (кристаллы А), а также при температуре 973 К, 5 часов (кристаллы В) и 7 часов (кристаллы С). В кристаллах А размер частиц <5 нм, в кристаллах В 7,5–9,5 нм, а в кристаллах С частицы имеют размер 10–14 нм. Механические свойства исследовали на испытательной машинах типа «Поляни» и Instron 5969 при скорости деформации $\dot{\varepsilon}=4 \cdot 10^{-4}$ с⁻¹ в интервале температур от 77 до 525 К.

Результаты. На рис.1 представлены результаты исследования температурной зависимости критических напряжений при деформации растяжением. Видно, что в однофазном состоянии кривая $\sigma_{0,1}(T)$ имеет характерную для ГЦК-сплавов, не испытывающих МП, температурную зависимость – с увеличением температуры испытания $\sigma_{0,1}$ уменьшаются. При старении наблюдается изменение температурной зависимости $\sigma_{0,1}(T)$ и температурная зависимость имеет вид, который наблюдается в сплавах, испытывающих МП под нагрузкой. На кривых $\sigma_{0,1}(T)$ в температурном интервале $T=77-525$ К наблюдаются две стадии. На первой стадии при $77 \text{ К} < T < M_d$ (M_d – температура, при которой напряжения образования мартенсита под нагрузкой равны напряжениям течения высокотемпературной фазы и соответствует максимальному значению σ) происходит линейное увеличение $\sigma_{0,1}$ с ростом температуры испытания, которое описывается соотношением Клапейрона – Клаузиуса:

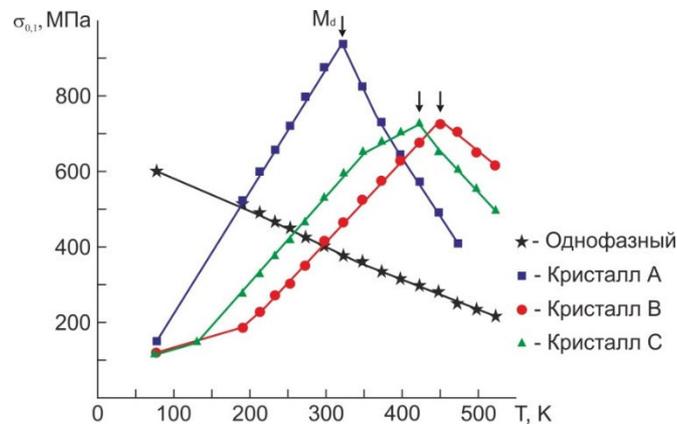


Рис. 1. Температурная зависимость критических напряжений $\sigma_{0,1}$ для [001] монокристаллов сплава FeNiCoAlTi при деформации растяжением

$$\frac{d\sigma_{0,1}}{dT} = -\frac{\Delta H}{\epsilon_0 T_0} \quad (1)$$

Здесь ΔH – изменение энтальпии при γ - α' -МП; ϵ_0 – деформация превращения; T_0 – температура химического равновесия фаз. При $T > M_d$ наблюдается вторая стадия, связанная с деформацией высокотемпературной фазы, на которой напряжения $\sigma_{0,1}$ падают с ростом температуры и данная зависимость характерна для материалов с ГЦК решеткой при деформации скольжением, и данных кристаллов в однофазном состоянии. Анализ температурной зависимости критических напряжений показал, что изменение размера дисперсных частиц γ' -фазы влияет, во-первых, на величину $\alpha = d\sigma_{0,1}/dT$: в кристаллах А $\alpha_1=3,5$ МПа/К, в кристаллах В $\alpha_2=2,25$ МПа/К, в кристаллах С $\alpha_3=2,3$ МПа/К. Во-вторых, M_d , уровень напряжений $\sigma_{0,1}(M_d)$ и температура начала прямого МП M_S зависят от времени старения. С увеличением размера дисперсных частиц γ' -фазы температуры M_S и M_d повышаются, а напряжения $\sigma_{0,1}(M_d)$ уменьшаются: в кристаллах А $M_S < 77$ К, $M_d=320$ К и $\sigma_{0,1}(M_d)=920$ МПа, в кристаллах В $M_S < 77$ К, $M_d=450$ К и $\sigma_{0,1}(M_d)=720$ МПа, а в кристаллах С $M_S=97$ К, $M_d=420$ К и $\sigma_{0,1}(M_d)=720$ МПа.

Экспериментально установлено, что при деформации растяжением [001]-монокристаллы обладают СЭ, величина и температурный интервал проявления которой зависят от размера дисперсных частиц γ' -фазы: в кристаллах А СЭ наблюдается в температурном интервале $\Delta T=60$ К, в кристаллах В $\Delta T=160$ К, а в кристаллах С $\Delta T=220$ К. На рис. 2 представлены результаты исследования максимальной

величины СЭ. В кристаллах А $\varepsilon_{СЭ}=11\%$ и эта величина оказывается больше величины деформации решетки $\varepsilon_0=8,7\%$ для кристаллов данной ориентации при γ - α' -МП. В кристаллах В и С максимальная величина СЭ равна $8,7\%$ и эта величина оказывается равной теоретической величине деформации решетки. В работе [3] на монокристаллах FeNiCoAlNb с малым размере дисперсных частиц γ' -фазы <3 нм наблюдали превышение величины обратимой деформации теоретического значения ε_0 , что авторы связывают с $\langle 011 \rangle \{110\}$ упругим двойникованием, развивающимся в α' -мартенсите. При увеличении размера частиц γ' -фазы происходит подавление упругого двойникования. Результат, полученный на кристалле А, где $\varepsilon_{СЭ}$, как и в монокристаллах FeNiCoAlNb, превышает ε_0 , подтверждает общность этого явления.

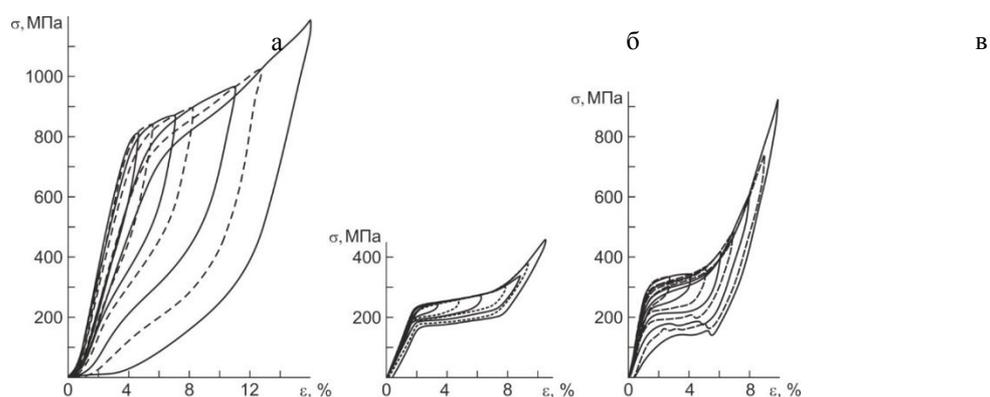


Рис. 2. Кривые «напряжение – деформация» при растяжении в $[001]$ -монокристаллах сплава FeNiCoAlTi: а – кристалл А при температуре испытания 250 К, б – кристалл В при температуре испытания 223 К, в – кристалл С при температуре испытания 195 К

Заключение. На монокристаллах сплава FeNiCoAlTi при деформации растяжением установлено, что изменением размера дисперсных частиц γ' -фазы можно управлять температурами МП, уровнем напряжений высокотемпературной фазы, величиной обратимой деформации и интервалом проявления СЭ.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ №14-29-00012.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sehitoglu H., Zhang X.Y., Kotil T., Canadic D., Chumlyakov Y.I., Maier H.J. Shape memory behavior of FeNiCoTi single and polycrystals // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2002. – V. 33A. – P. 3661–3672.
2. Chumlyakov Y.I., Kireeva I.V., Poklonov V.V., Pobedennaya Z.V., Karaman I. The shape-memory effect and superelasticity in single-crystal ferromagnetic alloy FeNiCoAlTi // Technical Physics Letters. – 2014. – V. 40. – N. 9. – P. 747–750.
3. Chumlyakov Y.I., Kireeva I.V., Kutz O.A., Turabi A.S., Karaca H.E., Karaman I. Unusual reversible twinning modes and giant superelastic strains in FeNiCoAlNb single crystals // Scripta Materialia. – 2016. – V. 119. – P. 43–46.