

**ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ  $\gamma'$ -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](mailto:poklonov_vyacheslav@mail.ru)

**THE EFFECT OF SIZE OF  $\gamma'$  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](mailto:poklonov_vyacheslav@mail.ru)

**Abstract.** In [001] single crystals of FeNiCoAlTi alloy, it is shown that precipitation of particles of the ordered  $\gamma'$ -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  $\gamma'$ -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  $\gamma'$ -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  $\gamma'$ -фазы на развитие термоупругого  $\gamma$ - $\alpha'$ -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  $\gamma'$ -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<sup>-1</sup> 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  $\sigma$ ) происходит линейное увеличение  $\sigma_{0,1}$  с ростом температуры испытания, которое описывается соотношением Клапейрона – Клаузиуса:

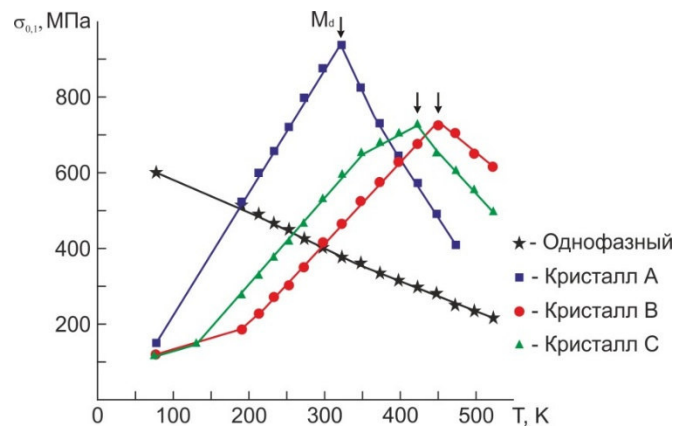


Рис. 1. Температурная зависимость критических напряжений  $\sigma_{0,1}$  для [001] монокристаллов сплава FeNiCoAlTi при деформации растяжением

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

Здесь  $\Delta H$  – изменение энтальпии при  $\gamma$ - $\alpha'$ -МП;  $\epsilon_0$  – 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  $\gamma'$ -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  $\gamma'$ -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  $\gamma'$ -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  $\gamma$ - $\alpha'$ -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  $\gamma'$ -фазы  $<3$  нм наблюдали превышение величины обратимой деформации теоретического значения  $\varepsilon_0$ , что авторы связывают с  $\langle 011 \rangle \{110\}$  упругим двойникованием, развивающимся в  $\alpha'$ -мартенсите. При увеличении размера частиц  $\gamma'$ -фазы происходит подавление упругого двойникования. Результат, полученный на кристалле А, где  $\varepsilon_{СЭ}$ , как и в монокристаллах FeNiCoAlNb, превышает  $\varepsilon_0$ , подтверждает общность этого явления.

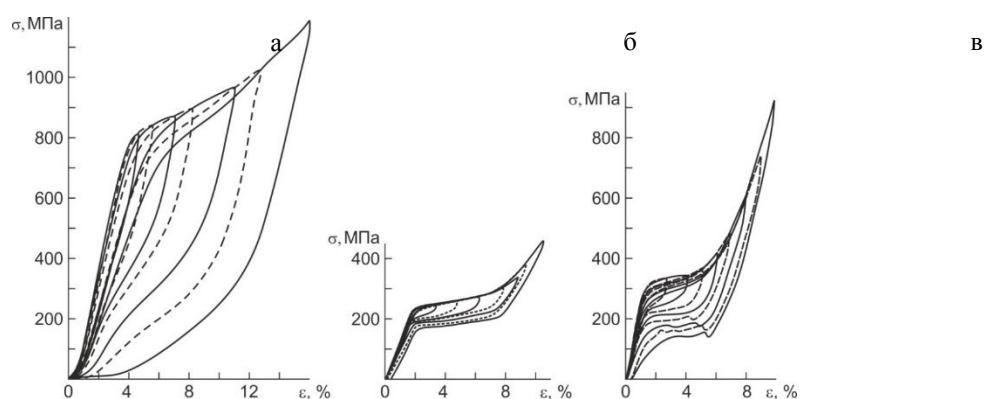


Рис. 2. Кривые «напряжение – деформация» при растяжении в  $[001]$ -монокристаллах сплава FeNiCoAlTi: а – кристалл А при температуре испытания 250 К, б – кристалл В при температуре испытания 223 К, в – кристалл С при температуре испытания 195 К

**Заключение.** На монокристаллах сплава FeNiCoAlTi при деформации растяжением установлено, что изменением размера дисперсных частиц  $\gamma'$ -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.