

Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Томский государственный архитектурно-строительный университет  
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

# **ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ НАУК**

Сборник научных трудов  
XIII Международной конференции студентов, аспирантов  
и молодых ученых

**Том 1. Физика**

РОССИЯ, ТОМСК, 26 – 29 апреля 2016 г.

# **PROSPECTS OF FUNDAMENTAL SCIENCES DEVELOPMENT**

XIII International Conference of students, graduate students  
and young scientists

**Volume 2. Physics**

RUSSIA, TOMSK, April 26 – 29, 2016

Томск 2016

**ОРИЕНТАЦИОННАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ОСЕВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И СВЕРХЭЛАСТИЧНОСТИ  
В МОНОКРИСТАЛЛАХ ФЕРРОМАГНИТНОГО СПЛАВА FeNiCoAlTa**

К.А. Реунова, Ю.Н. Платонова

Научные руководители: 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: [reunova.ksenva@mail.ru](mailto:reunova.ksenva@mail.ru)

**ORIENTATION DEPENDENCE OF CRITICAL STRESS AND SUPERELASTICITY IN SINGLE  
CRYSTALS OF FERROMAGNETIC FeNiCoAlTa ALLOY**

K.A. Reunova, Yu.N. Platonova

Scientific Supervisors: Chief Scientist, Dr., I.V. Kireeva, professor, Dr. Yu.I. Chumlyakov

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

E-mail: [reunova.ksenva@mail.ru](mailto:reunova.ksenva@mail.ru)

***Abstract.** The mechanical properties and superelastic behavior were studied on [001], [111] and [123] - single crystals of Fe-28%Ni-17%Co-11.5%Al-2.5%Ta (at. %) alloy. It is shown, that orientation of crystals influences on axial stress, temperature  $M_d$  and value of superelasticity.*

В неупорядоченных железосодержащих сплавах термоупругие мартенситные превращения (МП) развиваются за счет выделения наноразмерных атомноупорядоченных частиц  $\gamma'$ -фазы по типу  $L_{12}$  [1-3]. Такие частицы не испытывают МП, и их наличие приводит к изменению кинетики МП от нетермоупругой в однофазном состоянии к термоупругой при наличии частиц. В настоящее время такие сплавы привлекают большое внимание в качестве конструкционных материалов из-за низкой стоимости самого материала и его обработки по сравнению с NiTi, функциональных свойств – эффекта памяти формы (ЭПФ) и сверхэластичности (СЭ). В различных исследованиях показано, что такие материалы обладают большими обратимыми деформациями [1,2]. Известно, что величина обратимой деформации определяется величиной деформации решетки, которая зависит от ориентации кристалла, зерна относительно внешней приложенной нагрузки и от способа деформации – растяжения/сжатия [3]. Исследование влияния ориентации кристалла на деформацию превращения возможно только с использованием монокристаллов различной ориентации.

Поэтому цель настоящей работы заключается в изучении зависимости механических и функциональных свойств монокристаллов сплава Fe-28%Ni-17%Co-11.5%Al-2.5%Ta (ат. %) от ориентации кристалла при деформации растяжением. Для исследования были выбраны монокристаллы, ориентированные вдоль [001],  $\bar{1}11$  и  $\bar{1}23$ -направлений, которые имеют разные величины деформации решетки. Исследования температурной зависимости осевых напряжений и СЭ были проведены на кристаллах, состаренных при  $T=973$  К в течение 30 минут, на испытательной машине Instron-5969.

На рис.1 представлены результаты исследования температурной зависимости осевых напряжений  $\sigma_{0,1}(T)$  для [001],  $[\bar{1}11]$  и  $[\bar{1}23]$ -монокристаллов в интервале температур  $T=77-523$  К при деформации

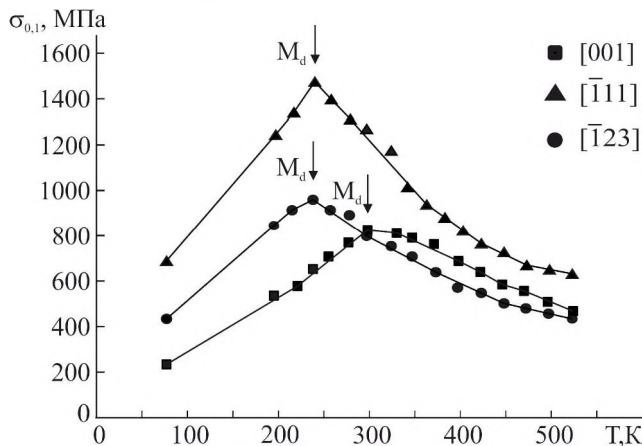


Рис.1. Температурная зависимость осевых напряжений  $\sigma_{0,1}$  для [001],  $[\bar{1}11]$  и  $[\bar{1}23]$  монокристаллов сплава FeNiCoAlTa, состаренных при  $T=973$  К в течение 30 минут, при деформации растяжением

растяжением. На рис.2 – данные по исследованию сверхэластичного поведения при температуре  $T = 77$  К. Механические и функциональные характеристики показаны в таблице 1. Из рис.1 видно, что температурная зависимость осевых напряжений для всех ориентаций имеет вид, характерный для сплавов, испытывающих МП под нагрузкой. На зависимости  $\sigma_{0,1}(T)$  наблюдается две стадии. На первой стадии при  $77 \text{ К} < T < M_d$  ( $M_d$  – температура, при которой напряжения высокотемпературной фазы оказываются равными напряжениям, необходимым для образования мартенсита под нагрузкой) напряжения  $\sigma_{0,1}$  с увеличением температуры

испытания линейно растут, и их зависимость описывается соотношением Клапейрона-Клаузиуса:

$$\frac{d\sigma_{0,1}}{dT} = -\frac{\Delta H}{\varepsilon_0 T_0}, \quad (1)$$

здесь  $\Delta H$  – изменение энтальпии при  $\gamma$ - $\alpha'$  МП;  $\varepsilon_0$  – деформация решетки, которая зависит от ориентации кристалла;  $T_0$  – температура химического равновесия  $\gamma$ - и  $\alpha'$ -фаз. Вторая стадия, выше  $M_d$ , связана с пластической деформацией высокотемпературной фазы.

Таблица 1

Функциональные и механические свойства монокристаллов сплава FeNiCoAlTa, состаренных при  $T=973$  К в течение 30 минут, при деформации растяжением

Ориентация	$T(M_d)$ , К	$\sigma_{0,1}(M_d)$ , МПа	$\alpha=d\sigma_{0,1}/dT$ , МПа/К	$\varepsilon_0$ , % [3]	$\varepsilon_{сз}$ , %
[001]	298	825	2.7	8.7	9.2
$[\bar{1}11]$	240	1475	4.8	2.1	1.7
$[\bar{1}23]$	238	960	3.3	5	0.8

Анализ данных, представленных на рис.1 и в Таблице 1, показывает, что температура  $M_d$ , уровень осевых напряжений  $\sigma_{0,1}(M_d)$ , а также величина  $\alpha = d\sigma_{0,1}/dT$  зависят от ориентации кристалла. Максимальная температура  $M_d=298$  К имеет место в кристаллах, ориентированных вдоль [001]-направления. Для кристаллов  $[\bar{1}11]$  и  $[\bar{1}23]$ -ориентаций  $M_d$  оказывается близкой. Максимальное значение осевых напряжений  $\sigma_{0,1}(M_d) = 1475$  МПа наблюдается в  $[\bar{1}11]$ - кристаллах. Минимальное – в кристаллах, ориентированных вдоль [001]-направления,  $\sigma_{0,1}(M_d) = 825$  МПа. Значение  $\sigma_{0,1}(T)$  и величина  $\alpha$  зависят от ориентации кристалла. Эта зависимость находится в полном соответствии с соотношением Клапейрона-Клаузиуса (1): меньшему теоретическому значению величины деформации решетки  $\varepsilon_0 = 2.1$  % в  $[\bar{1}11]$ - кристаллах соответствует большая экспериментальная величина  $\alpha = 4.8$  МПа/К. И наоборот, большему значению  $\varepsilon_0 = 8.7$  % в [001]- кристаллах соответствует меньшее значение

$\alpha = 2.7$  МПа/К. Кривая  $\sigma_{0,1}(T)$  для  $[\bar{1}23]$ -кристаллов занимает промежуточное положение между  $[\bar{1}11]$  и  $[001]$ -кристаллами.

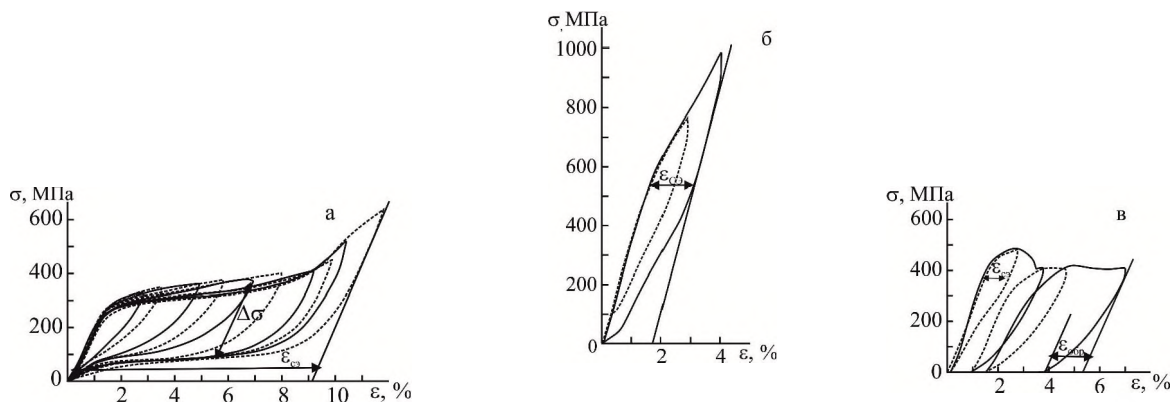


Рис.2. Исследование величины сверхэластичности при  $T = 77$  К для монокристаллов сплава FeNiCoAlTa, состаренных при  $T=973$  К в течение 30 минут, при деформации растяжением:

а) ориентация  $[001]$ , б) ориентация  $[\bar{1}11]$ , в) ориентация  $[\bar{1}23]$

Вышеописанное поведение наблюдается как в сплавах, испытывающих термоупругое МП, так и в сплавах, испытывающих нетермоупругое МП. При исследовании сверхэластичного поведения монокристаллов сплава FeNiCoAlTa, состаренных при  $T = 973$  К в течение 30 минут, было установлено, что  $\gamma$ - $\alpha'$  МП является термоупругим. В этих кристаллах наблюдается СЭ, величина и температурный интервал которой зависят от ориентации монокристалла. Максимальная величина СЭ  $\varepsilon_{сэ} = 9.2\%$  обнаружена в  $[001]$ - кристаллах, которая превышает теоретическую величину деформации решетки  $\varepsilon_0 = 8.7\%$  для данной ориентации при растяжении (Таблица 1). В  $[\bar{1}11]$ - кристаллах величина СЭ  $\varepsilon_{сэ} = 1.7\%$  и оказывается близкой к теоретической величине деформации решетки для данной ориентации  $\varepsilon_0 = 2.1\%$ . В  $[\bar{1}23]$ - кристаллах, величина СЭ в первом цикле равна  $\varepsilon_{сэ} = 0.8\%$ . При увеличении заданной деформации в цикле больше 2 % совершенной петли СЭ не наблюдается, что связано с большой величиной механического гистерезиса  $\Delta\sigma$ . Таким образом, экспериментально установлено, что в монокристаллах сплава Fe-28%Ni-17%Co-11.5%Al-2.5%Ta (ат. %) при деформации растяжением уровень осевых напряжений, величина  $\alpha = d\sigma_{0,1}/dT$  и величина СЭ, зависят от ориентации кристалла. Максимальная величина СЭ в 9.2% наблюдается в монокристаллах  $[001]$ -ориентации.

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

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кокорин В.В. Мартенситные превращения в неоднородных твердых растворах. – Киев: Наука думка, 1987. – 168 с.
2. Чумляков Ю.И., Киреева И.В. и др. Эффект памяти формы и сверхэластичность в  $[001]$  монокристаллах сплава FeNiCoAlTa с  $\gamma$ - $\alpha'$ -термоупругими мартенситными превращениями // Известия вузов. Физика. – 2013. – Т. 56. – № 8. – с. 66–74.
3. Tanaka Y., Himuro Y. et al. Ferrous polycrystalline shape-memory alloy showing huge superelasticity // Science. – 2010. – V. 327. – Is. 3. – pp 1488-1490.