

**ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МАРТЕНСИТНОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ В
МОНОКРИСТАЛЛАХ СПЛАВА НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА**

М.Е. Подгорный, И.В. Куксгаузен

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: pdgmaksim@yandex.ru

**EFFECT OF THE HEAT TREATMENT ON MARTENSITIC TRANSFORMATIONS IN SINGLE
CRYSTALS OF IRON-BASED ALLOY**

M.E. Podgorniy, I.V. Kuksgauzen

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

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

E-mail: pdgmaksim@yandex.ru

Abstract. *The shape memory effect, superelasticity and temperature range of superelasticity were investigated on [001]-oriented single crystal of FeNiCoAl(Ti+Nb+Ta) alloy, aged at temperature of $T=973$ K for 0,5, 3 and 5 h. The maximum value of superelasticity $\varepsilon_{SE}=7,8$ % was observed after aging for 0,5 h, the temperature range of its manifestations $\Delta T_{SE}=156$ K. With increasing of aging time the ε_{SE} value is reduced to 3,2 % and ΔT_{SE} is increased to 246 K.*

Введение. Известно, что в моно- и поликристаллах сплавов на основе железа наблюдается обратимая деформация превращения величиной до 13–15 % [1, 2], поэтому они представляют большой интерес для их практического применения в качестве демпферов и сенсорных материалов в авиакосмической промышленности. В настоящей работе представлены результаты по исследованию влияния термообработки на эффект памяти формы (ЭПФ) и сверхэластичность (СЭ) при деформации растяжением в [001]- монокристаллах сплава FeNiCoAl(Ti+Nb+Ta).

Материал и методика исследования. В качестве материала для исследования были выбраны [001]- монокристаллы сложного легированного сплава $Fe_{41}Ni_{28}Co_{17}Al_{11,5}(Ti+Nb+Ta)_{2,5}$ (ат. %). Выбор ориентации монокристаллов определялся максимальным теоретическим значением деформации решетки ε_0 при деформации растяжением в ориентации [001]: $\varepsilon_0=8,7\%$ при γ - α' -мартенситном превращении (МП) [1]. Испытания проводили после предварительной термообработки: гомогенизация 1553 К, 10 ч, отжиг при $T=1553$ К, 1,5 ч с последующей закалкой в воду и старении при $T=973$ К в течение 0,5 ч, 3 ч и 5 ч в атмосфере гелия. Механические свойства исследовали на испытательной машине типа «Поляни» в интервале температур от 77 до 523 К. ЭПФ под нагрузкой исследовали на специально сконструированной установке для термоциклирования при постоянной нагрузке со скоростью охлаждения/нагрева 20 К/мин в температурном интервале от 77 до 373 К.

Результаты и их обсуждения. На рис. 1 представлены результаты исследований температурной зависимости критических напряжений $\sigma_{0,1}$ в температурном интервале $T=77$ –573 К для состаренных при $T=973$ К в течение $t=0,5, 3$ и 5 ч [001]- монокристаллов сплава FeNiCoAl(Ti+Nb+Ta) при деформации

растяжением. При всех временах старения зависимость $\sigma_{0,1}(T)$ имеет вид характерный для сплавов, испытывающих МП под нагрузкой, и состоит из двух стадий. На первой стадии $77\text{ K} < T < M_d$ (M_d – температура, при которой напряжения высокотемпературной фазы оказываются равными напряжению,

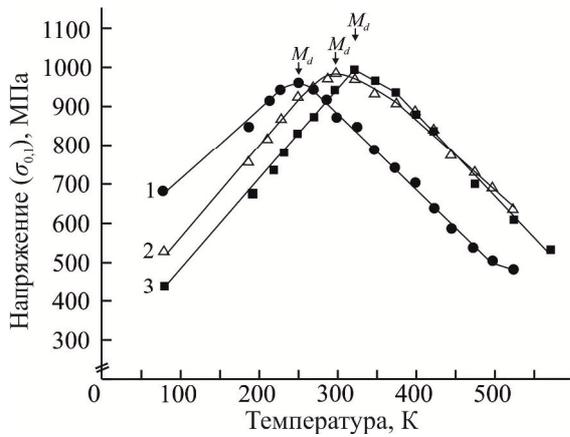


Рис.1. Температурная зависимость критических напряжений $\sigma_{0,1}$ для состаренных при $T=973\text{ K}$ 0,5 ч (кривая 1), 3 ч (кривая 2) и 5 ч (кривая 3) [001]-монокристаллов сплава $\text{FeNiCoAl}(\text{Ti}+\text{Nb}+\text{Ta})$ при растяжении

(табл. 1). Из рис.1 видно, что напряжения $\sigma_{0,1}$ при одной температуре испытания, например при $T=77\text{ K}$, уменьшаются с увеличением времени старения и, следовательно, температура M_s повышается. При $T > M_d$ напряжения $\sigma_{0,1}$ после старения в течение 3-5 ч выше на 110-130 МПа, относительно старения $t=0,5\text{ ч}$. Рост напряжений высокотемпературной фазы и $T(M_d)$ приводит к увеличению температурного интервала развития МП под нагрузкой, а следовательно и температурного интервала проявления СЭ $\Delta T_{\text{СЭ}}$ (табл. 1).

Таблица 1

Механические и функциональные свойства [001]-монокристаллов $\text{FeNiCoAl}(\text{Ti}+\text{Nb}+\text{Ta})$, состаренных при $T=973\text{ K}$

Термообработка	$T(M_d)$, К	$\sigma_{0,1}(M_d)$, МПа	$\varepsilon_{\text{ЭПФ}}^{\text{макс}}$, %	$\varepsilon_{\text{СЭ}}^{\text{макс}}$, %	$T_{\text{СЭ1}}$, К	$T_{\text{СЭ2}}$, К	$\Delta T_{\text{СЭ}}$, К
973 К, 0,5 ч	250	961	-	7,8	≤ 77	233	156
973 К, 3 ч	297	987	1,2	3,4	≤ 77	283	206
973 К, 5 ч	323	1002	1,7	3,2	≤ 77	323	246

На рис. 2 представлены результаты исследования ЭПФ при охлаждении/нагреве под постоянной внешней растягивающей нагрузкой $\sigma_{\text{вн}}$ для состаренных при $T=973\text{ K}$, $t=0,5, 3$ и 5 ч [001]- монокристаллов сплава $\text{FeNiCoAl}(\text{Ti}+\text{Nb}+\text{Ta})$. Видно, что с увеличением времени старения напряжения, необходимые для появления первой петли ЭПФ, уменьшаются, что коррелирует с повышением температуры M_s (рис. 1). При времени старения $t=0,5\text{ ч}$ при охлаждении под нагрузкой $\sigma_{\text{вн}}=775\text{ МПа}$ (рис.2, а) наблюдается изменение размеров образца на 0,9 %, однако при нагреве до $T=373\text{ K}$ деформация не возвращается, следовательно ЭПФ не реализуется. Отсутствие ЭПФ при данном времени старения связано, во-первых, с не достижением температур обратного МП из-за широкого температурного гистерезиса превращения

необходимому для образования мартенсита под нагрузкой) напряжения $\sigma_{0,1}$ растут с увеличением температуры испытания. Такая зависимость $\sigma_{0,1}(T)$ описывается соотношением Клайперона-Клаузиуса [3]:

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

где ΔH – изменение энтальпии, T_0 – температуры химического равновесия γ - и α' -фаз. При $T > M_d$ наблюдается вторая стадия, характерная для ГЦК-материалов, в которой наблюдается падение $\sigma_{0,1}$ с ростом температур.

Анализ температурной зависимости $\sigma_{0,1}(T)$ показывает, что с увеличением времени старения температура начала прямого МП $T(M_s)$, температура $T(M_d)$ и уровень напряжений $\sigma_{0,1}(M_d)$ увеличиваются

ΔT , и во-вторых, с низкими прочностными свойствами высокотемпературной фазы. При увеличении времени старения до 3-5 ч напряжения высокотемпературной фазы возрастают, и при изучении ЭПФ при охлаждении/нагреве под нагрузкой наблюдается одностадийное γ - α' -МП, которое является полностью обратимым и характеризуется узким температурным гистерезисом $\Delta T=75$ К, а следовательно наблюдается ЭПФ (рис. 2, б, в). После старения в течение $t=3$ ч (рис. 2, б) $\varepsilon_{\text{ЭПФ}}=0,6$ % реализуется при напряжениях $\sigma_{\text{вн}}=600$ МПа, а при $\sigma_{\text{вн}}=650$ МПа достигается максимальная величина обратимой деформации, равная 1,2 %. После старения $t=5$ ч (рис.2, в) величина ЭПФ при $\sigma_{\text{вн}}=650$ МПа увеличивается до 1,7 %, по сравнению со старением в течение 3 ч. Значения $\varepsilon_{\text{ЭПФ}}$ для всех времен старения не достигают теоретической величины деформации решетки ε_0 при γ - α' МП для соответствующей ориентации.

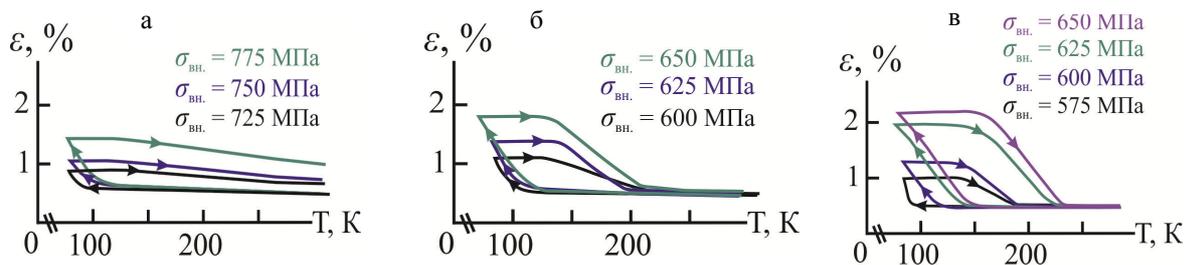


Рис.2. $\varepsilon(T)$ кривые, полученные при охлаждении/нагреве под постоянной растягивающей нагрузкой для состаренных при $T=973$ К в течение а) 0,5 ч, б) 3 ч и в) 5 ч [001]-монокристаллов $\text{FeNiCoAl(Ti+Nb+Ta)}$

Исследования СЭ в [001]-монокристаллах сплава $\text{FeNiCoAl(Ti+Nb+Ta)}$, состаренных при $T=973$ К, $t=0,5, 3$ и 5 ч показали, что величина СЭ $\varepsilon_{\text{СЭ}}$ и ее температурный интервал $\Delta T_{\text{СЭ}}$ зависят от времени старения (табл. 1). Из экспериментов по термоциклированию при температуре $T=77$ К было установлено, что величина $\varepsilon_{\text{СЭ}}$ при времени старения $t=0,5$ ч равна 7,8 %, что близко к теоретическому значению ε_0 . С увеличением времени старения величина СЭ уменьшается до 3,4 % при $t=3$ ч и до 3,2 % при $t=5$ ч, что связано с уменьшением объема материала, который испытывает МП под нагрузки, за счет увеличения объёмной доли частиц γ' -фазы. СЭ после старения 0,5 ч наблюдается от $T_{\text{СЭ}1}=77$ К до $T_{\text{СЭ}2}=233$ К. После старения в течение 5 ч последняя температура наблюдения СЭ $T_{\text{СЭ}2}$ возрастает до 323 К, так что интервал СЭ увеличивается до $\Delta T_{\text{СЭ}}=246$ К, по сравнению с $\Delta T_{\text{СЭ}}=156$ К при времени старения 0,5 ч.

Заключение. Итак, экспериментально на [001]- монокристаллах сплава $\text{FeNiCoAl(Ti+Nb+Ta)}$ при деформации растяжением было установлено, что изменяя время старения при одной и той же температуре можно управлять уровнем напряжений высокотемпературной фазы, температурами $T(M_d)$ и $T(M_s)$, величиной ЭПФ и СЭ, а также температурным интервалом СЭ.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tanaka Y., Niyuro Y., Kainuma R. et.al. Ferrous polycrystalline shape-memory alloy showing huge superelasticity // Science. – 2010. – Vol. 327. – P. 1488–1490.
2. Чумляков Ю.И., Киреева И.В., Поклонов В.В. и др. Эффект памяти формы и сверхэластичность в монокристаллах ферромагнитного сплава FeNiCoAlTi // Письма в ЖТФ. – 2014. – Т. 40, Вып. 17. – С. 47–53.
3. Otsuka K., Wayman C.M. Shape memory materials. – Cambridge: Cambridge University Press, 1998. – 284 p.