

**ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ В [001]-
МОНОКРИСТАЛЛАХ CoNiAl, СОСТАРЕННЫХ В МАРТЕНСИТЕ**

А.С. Ефтифеева, Э.И. Янушоните

Научный руководитель: профессор, д.ф.-м.н. Е.Ю. Панченко

Национальный исследовательский Томский государственный университет,

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

E-mail: anna_eftifeeva@rambler.ru

**THE FUNCTIONAL PROPERTIES IN STRESS-ASSISTED MARTENSITE AGED CoNiAl [001]-
ORIENTED SINGLE CRYSTALS**

A.S. Eftifeeva, E.I. Yanushonite

Scientific Supervisor: Prof., Dr. E.Yu. Panchenko

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

E-mail: anna_eftifeeva@rambler.ru

Abstract. *It has been experimentally shown that the internal tensile stress fields $\sigma_G=65$ MPa are created by stress-induced martensite aging of ferromagnetic $Co_{35}Ni_{35}Al_{30}$ single crystals. Internal stress fields create two-way shape memory effect with a giant reversible tensile strain of up to $+7.3(\pm 0.3)$ % with high cyclic stability during stress-free cooling/heating cycles.*

Введение. Ферромагнитные сплавы CoNiAl с термоупругими $B2-L1_0$ мартенситными превращениями (МП) активно исследуются последние годы. Интерес к сплавам CoNiAl вызван возможностью вариации температур МП в широких пределах, способностью материала к высокотемпературной сверхэластичности, отсутствием охрупчивания при выделении пластичной γ -фазы в $B2$ -марице и к тому же, в их состав не входят дорогие легирующие элементы [1, 2]. Они имеют уникальную способность испытывать гигантские обратимые деформации до 3,3 % как под действием механических напряжений, так и магнитного поля [3]. Одними из основных факторов, сдерживающих широкое практическое применение этих материалов в качестве приводов и исполнительных устройств многократного действия, является низкая циклическая стабильность двустороннего эффекта памяти формы (ДЭПФ) и небольшая обратимая деформация при ДЭПФ (не более 1/2 от теоретически рассчитанной деформации превращения $\epsilon_{ДЭПФ}=0,5 \cdot \epsilon_0$). Целью данного исследования является изучение ЭПФ, ДЭПФ и влияния термоциклирования на стабильность ДЭПФ в монокристаллах ферромагнитного сплава $Co_{35}Ni_{35}Al_{30}$ после старения под нагрузкой в мартенситном состоянии.

Материалы и методы исследования. В работе исследованы монокристаллы ферромагнитного сплава $Co_{35}Ni_{35}Al_{30}$ (ат. %), выращенные методом Бриджмена. Образцы в форме прямоугольных параллелепипедов с площадью поперечного сечения 9 мм² и высотой 6 мм, вырезаны так, чтобы направления кристаллографических осей $[001]_{B2}$ и $[110]_{B2}$ были взаимно перпендикулярны. Термомеханическая обработка образцов заключалась в гомогенизации при 1623 К, 8,5 ч с последующей закалкой в воду комнатной температуры и старении под нагрузкой в мартенсите – образец выдерживали при 400 К, 1,0 ч в мартенситном состоянии под сжимающей нагрузкой 500 МПа, приложенной вдоль $[110]_{B2}$ -направления. Затем проводили исследование функциональных свойств вдоль $[001]_{B2}$ -направления

состаренных в мартенсите монокристаллов на установке ИМРС – 1 для измерения деформации при растяжении/сжатии во время охлаждения/нагрева в интервале 77 – 573 К под постоянной нагрузкой с выводом кривых деформации от температуры на компьютер. Согласно [4], теоретическая деформация ε_0 для исследуемого $[001]_{B2}$ -направления при $B2-L1_0$ МП при деформации сжатием равна -4.6% и растяжением $+9.6\%$.

Результаты. На рис. 1 показаны результаты исследования ЭПФ и ДЭПФ в состаренных в мартенситном состоянии монокристаллах – зависимость обратимой деформации ε от величины внешних напряжений $\sigma_{вн}$, приложенных вдоль $[001]_{B2}$ -направления и кривые деформации от температуры $\varepsilon(T)$.

При минимальном внешнем напряжении $\sigma_{вн}=1$ МПа, необходимом для закрепления образца в захватах установки, наблюдается ДЭПФ – образец самопроизвольно увеличивает размеры при охлаждении и восстанавливает исходный размер при нагреве (рис. 1). Видно, что кривая $\varepsilon(T)$ при $\sigma_{вн}=1$ МПа имеет стадийность. На первой стадии $280\text{ К} < T < 333\text{ К}$ превращение имеет взрывоподобный характер, т.е. температуры начала и конца перехода равны и, соответственно, имеют значения $M_{s1}=M_l=280\text{ К}$ для прямого МП и $A_{s1}=328\text{ К}$ и $A_l=333\text{ К}$ для обратного МП. Обратимая деформация на первой стадии равна $\varepsilon_{ДЭПФ1}=+4.9\%$ и превращение сопровождается рассеянием энергии с величиной температурного гистерезиса $\Delta T=50\text{ К}$. Далее скорость превращения резко уменьшается и МП на второй стадии $T < 280\text{ К}$ развивается в широком температурном интервале 141 К. Суммарная обратимая растягивающая деформация ДЭПФ на двух стадиях равна $\varepsilon_{ДЭПФ}=+7.3(\pm 0.3)\%$, что составляет $\varepsilon_{ДЭПФ}=0.8 \cdot \varepsilon_0$ при растяжении.

При охлаждении/нагреве под нагрузкой наблюдается ЭПФ. С увеличением сжимающей нагрузки $\sigma_{вн}$ стадийность на кривых $\varepsilon(T)$ исчезает и растягивающая обратимая деформация при ЭПФ линейно уменьшается (рис. 1). При $\sigma_{вн}=65$ МПа при охлаждении/нагреве кривая $\varepsilon(T)$ не наблюдается, т.к. образец не испытывает превращения $\varepsilon_{ЭПФ}=0$. Дальнейшее увеличение напряжений $\sigma_{вн}$ приводит к появлению обратимой деформации, которая увеличивается с ростом $\sigma_{вн}$. Обратимая деформация при $\sigma_{вн}>65$ МПа становится сжимающей – под нагрузкой при охлаждении образец уменьшается и обратимо восстанавливается при нагреве. Максимальная обратимая деформация при действии внешних напряжений равна $\varepsilon_{ЭПФ}=-3.1(\pm 0.3)\%$, что составляет $\varepsilon_{ДЭПФ}=0.7 \cdot \varepsilon_0$ при сжатии.

Наведение ДЭПФ и смена знака ЭПФ вызваны внутренними дальнедействующими полями напряжений σ_G , которые возникают в монокристаллах после старения в мартенситном состоянии. Из анализа зависимости $\varepsilon(\sigma_{вн})$ видно, что внутренние напряжения σ_G являются растягивающими, т.к. размер образца во время охлаждения при минимальном напряжении увеличивается. Приложение внешних сжимающих напряжений компенсирует действие внутренних растягивающих, поэтому обратимая растягивающая деформация уменьшается с ростом $\sigma_{вн}$. Отсутствие петли гистерезиса на кривой $\varepsilon(T)$ при $\sigma_{вн}=65$ МПа, говорит о том, что противоположно направленные внутренние и внешние напряжения уравновешивают друг друга. И наконец, под действием внешних сжимающих напряжений при $\sigma_{вн}>65$ МПа, превышающие внутренние σ_G , образец во время охлаждения уменьшается.

Циклическая стабильность ДЭПФ была исследована при минимальном напряжении $\sigma_{вн}=1$ МПа в циклах охлаждения/нагрев. Зависимость обратимой деформации $\varepsilon_{ДЭПФ}$, температуры начала прямого МП M_s и температурного гистерезиса ΔT от числа циклов n представлены на рис. 2. Полученные при термоциклировании кривые $\varepsilon(T)$ практически накладываются друг на друга. Сравнение кривых $\varepsilon(T)$ в циклах $n=1$ и $n=100$ показало небольшую разницу. В 100 цикле деформация $\varepsilon_{ДЭПФ}$ увеличивается на 0,7

%, температура M_s – на 7 К, а гистерезис уменьшается на 7 К по сравнению с 1 циклом. Таким образом, показано, что термоциклирование не разрушает внутренние напряжения, сформированные во время старения в мартенситном состоянии, поэтому количество циклов несущественно влияет ДЭПФ.

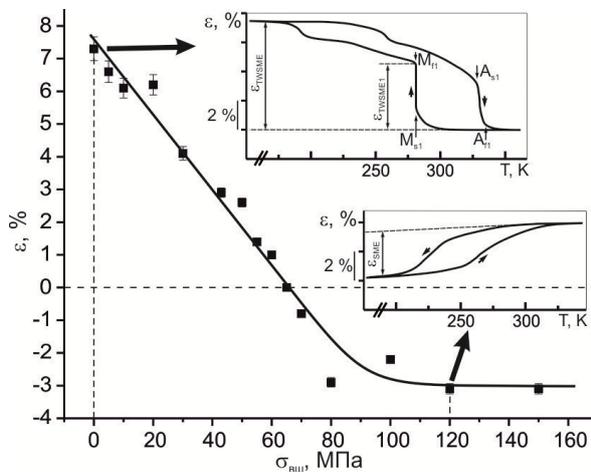


Рис. 1. Зависимость $\varepsilon(\sigma_{\text{внеш}})$ и кривые $\varepsilon(T)$ при $\sigma_{\text{внеш}}=1$ МПа и $\sigma_{\text{внеш}}=120$ МПа для состаренных в мартенсите монокристаллов $\text{Co}_{35}\text{Ni}_{35}\text{Al}_{30}$ с осью деформации вдоль $[001]_{\text{B2}}$ -направления

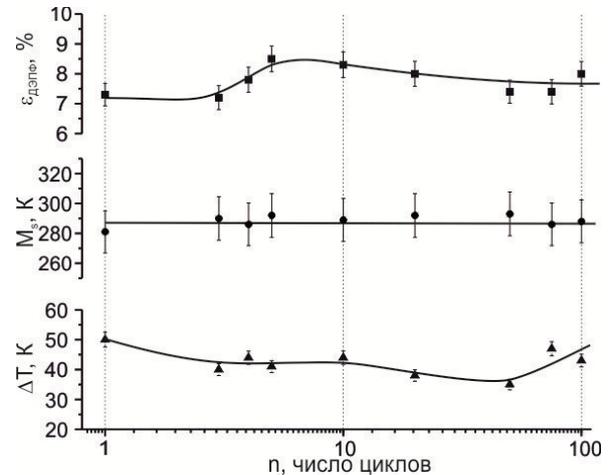


Рис. 2. Зависимости $\varepsilon_{\text{ДЭПФ}}(n)$, $M_s(n)$ и $\Delta T(n)$ для состаренных в мартенсите монокристаллов $\text{Co}_{35}\text{Ni}_{35}\text{Al}_{30}$ с осью деформации вдоль $[001]_{\text{B2}}$ -направления

Заключение. Экспериментально показано, что с помощью старения в мартенситном состоянии в монокристаллах ферромагнитного сплава $\text{Co}_{35}\text{Ni}_{35}\text{Al}_{30}$ созданы внутренние растягивающие напряжения $\sigma_{\text{Г}}=65$ МПа, которые способствуют наведению гигантского ДЭПФ $\varepsilon_{\text{ДЭПФ}}=+7,3$ % с высокой циклической стабильностью.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-08-00179.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chumlyakov Yu.I., Panchenko E.Yu., Ovsyannikov A.V., Chusov S.A., Kirillov V.A., Karaman I., Maier H. High-temperature superelasticity and the shape-memory effect in $[001]$ Co-Ni-Al single crystals // The Physics of Metals and Metallography. – 2009. – V. 107. – P. 194–205.
2. Tanaka Y., Oikawa K., Sutou Y., Omori T., Kainuma R., Ishida K. Martensitic transition and superelasticity of Co-Ni-Al ferromagnetic shape memory alloys with $\beta+\gamma$ two-phase structure // Mater. Sci. Eng., A. – 2006. – V. 438–440. – P. 1054–1060.
3. Morito H., Oikawa K., Fujita A., Fukamichi K., Kainuma R., Ishida K. Large magnetic-field-induced strain in CoNiAl single-variant ferromagnetic shape memory alloy // Scripta Mater. – 2010. – V. 63. – P. 379–382.
4. Karaca H.E., Karaman I., Chumlyakov Y.I., Lagoudas D.C., Zhang X. Compressive response of a single crystalline CoNiAl shape memory alloy // Scripta Mater. – 2004. – V. 51. – P. 261–266.