

ДВУСТОРОННИЙ ЭФФЕКТ ПАМЯТИ ФОРМЫ В ДВУХФАЗНЫХ ($\beta+\gamma$) МОНОКРИСТАЛЛАХ

СПЛАВАС₀₃₈Ni₃₃Al₂₉

А.С. Ефтифеева

Научный руководитель: доцент, д. ф.-м. н. Е.Ю. Панченко; профессор, д. ф.-м. н. Ю.И. Чумляков

Национальный исследовательский Томский государственный университет,

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

E-mail: anna_eftifeeva@rambler.ru

TWO-WAY SHAPE MEMORY EFFECT IN ($\beta+\gamma$) TWO-PHASE Co₃₈Ni₃₃Al₂₉

SINGLE CRYSTALS

A.S. Eftifeeva

Scientific Supervisor: Assoc. prof., Dr. E.Yu. Panchenko; Prof., Dr. Yu.I. Chumlyakov

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

E-mail: anna_eftifeeva@rambler.ru

Abstract. *In the present study, it is shown that the aging in martensite under load is the effective way to create two-way shape memory effect at the martensite start temperature $M_s=311$ K with the reversible strain of 5 % along the $[001]_{B2}$ -direction in $Co_{38}Ni_{33}Al_{29}$ single crystals with the minimum volume fraction $f_{\gamma}\sim 1$ % of large γ -phase precipitations. The increase of volume fraction up to $f_{\gamma}\sim 5$ % leads to the suppression of two-way shape memory effect, the reversible strain is less than 1 %.*

Введение. Эффект гигантских магнитоиндуцированных деформаций до 3-10 % исследован на многих системах ферромагнитных сплавов: NiMnGa, NiMnAl, FePd, FePt, CoNiAl, CoNiGa [1]. Одной из основных проблем данного класса материалов является их низкая пластичность. В наиболее перспективных, с точки зрения практического применения, сплавах CoNiAl значительно повысить пластичность возможно за счет выделения частиц низкопрочной γ -фазы [2]. Сплавы CoNiAl испытывают термоупругое мартенситное превращение (МП) из $B2(\beta)$ -аустенита (кубический) в $L1_0$ -мартенсит (тетрагональный) в диапазоне температур от 93 К до 393 К в зависимости от химического состава. Частицы γ -фазы не испытывают термоупругое $B2-L1_0$ МП [2], поэтому уменьшают объемную долю материала, испытывающего переход и, соответственно, величину обратимой деформации при одностороннем и двустороннем эффекте памяти формы (ЭПФ и ДЭПФ). При ДЭПФ, в отличие от ЭПФ, во время охлаждения/нагрева происходит изменение/восстановление размеров без воздействия внешней нагрузки. В материале с ДЭПФ формируется одновариантная структура мартенсита, которая позволяет легче достичь больших обратимых магнитоиндуцированных деформаций при приложении магнитного поля. Исследования последних двух лет показали, что старение в мартенситном состоянии под нагрузкой является эффективным способом для повышения температур МП [3] и реализации ДЭПФ с высокой циклической стабильностью [4], в отличие от старения в аустенитном состоянии и различного вида «тренировок». Цель данного исследования – изучение влияния старения в мартенситном состоянии под нагрузкой на проявление ЭПФ и ДЭПФ вдоль $[001]_{B2}$ -направления в монокристаллах ферромагнитного сплава $Co_{38}Ni_{33}Al_{29}$ с различной объемной долей γ -фазы.

Материалы и методы исследования. Объектом исследования является монокристалл ферромагнитного сплава $\text{Co}_{38}\text{Ni}_{33}\text{Al}_{29}$, выращенный методом Бриджмена. Образцы для исследования при деформации сжатием вдоль $[001]_{B2}$ -направления вырезаны из заготовок, предварительно гомогенизированных в течение 8 ч при 1623 К и закаленных в воду комнатной температуры. Форма образцов – параллелепипеды с площадью поперечного сечения $S=9 \text{ мм}^2$ и высотой $L=6 \text{ мм}$. Закаленные образцы с содержанием различной объемной доли γ -фазы старили в мартенситном состоянии при 398 К в течение 1 ч под сжимающей нагрузкой 430-450 МПа, приложенной перпендикулярно оси деформации образца.

Результаты. Закаленные образцы монокристалла сплава $\text{Co}_{38}\text{Ni}_{33}\text{Al}_{29}$ имеют двухфазную ($\beta+\gamma$)-структуру (рис. 1). Частицы вторичной γ -фазы, наблюдаемые на поверхности образцов, отличаются по размеру и форме: частицы сложной формы имеют размер до 100 мкм и сферической – до 10 мкм. Объемная доля мелких частиц составляет 10 %, в то время как объемная доля крупных частиц f_γ различна в образцах. Оценка показала, что одна партия образцов содержит крупные частицы с $f_\gamma \sim 1 \%$ (кристаллы I) и другая – $f_\gamma \sim 5 \%$ (кристаллы II) (рис. 1 а, б).

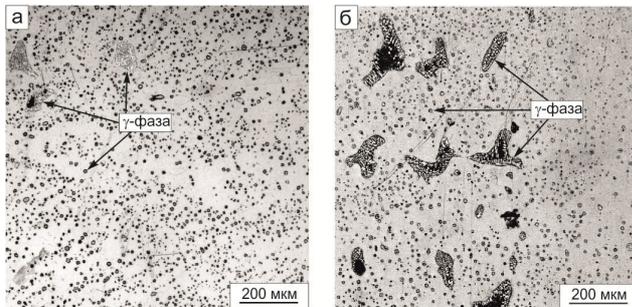


Рис. 1. Оптическая металлография поверхности монокристаллов $\text{Co}_{38}\text{Ni}_{33}\text{Al}_{29}$ после закалки:

а – кристаллы I; б – кристаллы II

уменьшается вдоль $[001]_{B2}$ -направления при охлаждении). В кристаллах II с большей объемной долей $f_\gamma \sim 5 \%$ ЭПФ реализуется при более высокой температуре $M_s=320 \text{ К}$ и с меньшей обратимой деформацией $\epsilon_{\text{ЭПФ}}=-2,0 \%$, по сравнению с кристаллами I.

Старение приводит к уменьшению температур МП в циклах охлаждение/нагрев под действием сжимающей нагрузки 150 МПа, расширению в 1,4-4,5 раза температурных интервалов превращения $\Delta_1=(M_s-M_f)$ и $\Delta_2=(A_f-A_s)$ по сравнению с закаленным состоянием кристаллов I и II. А именно, после старения величины $\epsilon_{\text{ЭПФ}}$ и M_s для кристаллов I соответственно равны -1,8 % и 227 К. Кристаллы II после старения характеризуются следующими значениями $\epsilon_{\text{ЭПФ}}=-1,2 \%$ и $M_s=265 \text{ К}$.

В закаленном состоянии ДЭПФ не наблюдается без дополнительных тренировок, в то время как в состаренном состоянии тренировки не нужны для наведения ДЭПФ. На рис. 3 показаны результаты исследования ДЭПФ в состаренных в мартенситном состоянии монокристаллах – кривые деформации от температуры $\epsilon(T)$, полученные при охлаждении/нагреве под действием минимальной нагрузки 3 МПа, приложенной вдоль $[001]_{B2}$ -направления и необходимой для закрепления образцов в захватах испытательной установки. При ДЭПФ во время охлаждения в свободном состоянии размер образца увеличивается вдоль $[001]_{B2}$ -направления, что свидетельствует о наличие внутренних растягивающих

На рис. 2 представлены результаты исследования развития термоупругих МП при охлаждении/нагреве под действием постоянной сжимающей нагрузки 150 МПа, приложенной вдоль $[001]_{B2}$ -направления, в закаленных и состаренных кристаллах. Закаленные кристаллы I и II имеют различные температуры МП и величину ЭПФ. Кристаллы I характеризуются температурой начала прямого МП $M_s=251 \text{ К}$ и величиной ЭПФ $\epsilon_{\text{ЭПФ}}=-2,7 \%$ (размер образца

напряжений в состаренном материале. Поэтому при развитии превращения под сжимающей нагрузкой 150 МПа в состаренных образцах (рис. 2), внешние и внутренние напряжения противодействуют друг другу. Это является причиной снижения температур МП и уменьшения обратимой деформации по сравнению с закаленными кристаллами. В состаренных кристаллах I ДЭПФ реализуется с большой величиной обратимой деформации $\varepsilon_{\text{ДЭПФ}}=5\%$ при высокой температуре $M_s=311\text{ К}$. В состаренных кристаллах II, большая объемная доля f_γ является причиной малой обратимой деформации при ДЭПФ: $\varepsilon_{\text{ДЭПФ}}=0,9\%$ и $M_s=320\text{ К}$. Это связано с релаксацией внутренних напряжений в материале близи границы β -фазы с крупными частицами γ -фазы в кристаллах с содержанием большой f_γ .

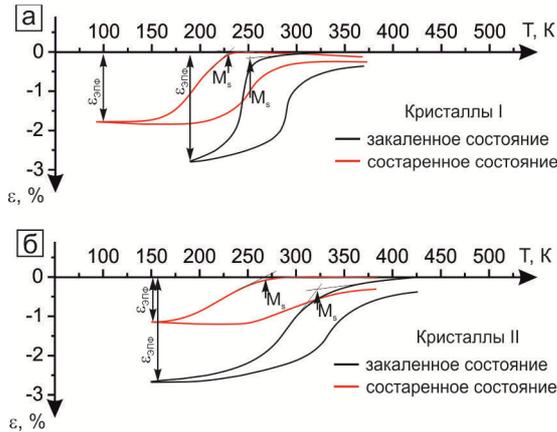


Рис. 2. Кривые $\varepsilon(T)$ при $\sigma_{\text{вн}}=150\text{ МПа}$ для
монокристаллов $\text{Co}_{38}\text{Ni}_{33}\text{Al}_{29}$:
а – кристаллы I; б – кристаллы II

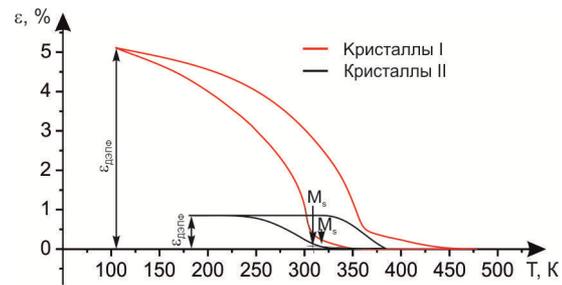


Рис. 3. Кривые $\varepsilon(T)$ при $\sigma_{\text{вн}}=3\text{ МПа}$ для
монокристаллов $\text{Co}_{38}\text{Ni}_{33}\text{Al}_{29}$ после старения

Закключение. Экспериментально показано, что старение под нагрузкой в мартенситном состоянии является эффективным способом для наведения ДЭПФ при температуре $M_s=311\text{ К}$ с величиной обратимой деформации 5 % вдоль $[001]_{B2}$ -направления в монокристаллах $\text{Co}_{38}\text{Ni}_{33}\text{Al}_{29}$ с минимальной объемной долей крупных включений γ -фазы $f_\gamma \sim 1\%$. Увеличение объемной доли до $f_\gamma \sim 5\%$ приводит к подавлению ДЭПФ, обратимая деформация становится менее 1 %.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bartova B., Wiese N., Schryvers D., Chapman J.N., Ignacova S. Microstructure of precipitates and magnetic domain structure in an annealed $\text{Co}_{38}\text{Ni}_{33}\text{Al}_{29}$ shape memory alloy // Acta Mater. – 2008. – V. 56. – P. 4470–4476.
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. Niendorf T., Krooß P., Somsen C., Eggeler G., Chumlyakov Yu.I., Maier H.J. Martensite aging – avenue to new high temperature shape memory alloys // Acta Mater. – 2015. – V. 89. – P. 298–304.
4. Eftifeeva A., Panchenko E., Chumlyakov Yu., Maier H.J. Two-way shape memory effect in $[001]_{B2}$ -oriented Co–Ni–Al single crystals // Materials Today: Proceedings. – 2016. – in the press.