

**ОДНОСТОРОННИЙ И ДВУСТОРОННИЙ ЭФФЕКТ ПАМЯТИ ФОРМЫ В $[\bar{3}12]$ -
МОНОКРИСТАЛЛАХ СПЛАВА $\text{Ni}_{49}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}\text{Co}_6$**

Н.Г. Ветошкина, Е.Е. Тимофеева, Е.Ю. Панченко, Ю.И. Чумляков

Научный руководитель: канд. физ.-мат. н. Е.Е. Тимофеева

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: vetoshkina23011991@mail.ru

**ONE-WAY AND TWO-WAY SHAPE MEMORY EFFECT IN $[\bar{3}12]$ -ORIENTED $\text{Ni}_{49}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}\text{Co}_6$
SINGLE CRYSTALS**

N.G. Vetoshkina, E.E. Timofeeva, E.Y. Panchenko, Yu. I. Chumlyakov

Scientific Supervisor: Phd.E.E. Timofeeva

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: vetoshkina23011991@mail.ru

Annotation. One-way and two-way shape memory effect in $[\bar{3}12]$ oriented $\text{Ni}_{49}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}\text{Co}_6$ (at.%) single crystals in compression were investigated. Single crystals after aging under stress of 100 MPa at 673 K for 4 hours demonstrate the maximum value of one-way shape memory effect of $\varepsilon = 2,5 (\pm 0,3)\%$ at 80 MPa and maximum value of two-way shape memory effect of $\varepsilon = 1 (\pm 0,3)\%$ at 0 MPa in comparison with single crystals after aging in freestate at 673 K for 4 hours.

В данной работе представлены исследования одностороннего эффекта памяти формы (ЭПФ) и двустороннего эффекта памяти формы (ДЭПФ) в гетерофазных $[\bar{3}12]$ -монокристаллах сплава $\text{Ni}_{49}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}\text{Co}_6$ (ат.%) при деформации сжатием. ЭПФ заключается в способности сплава при нагреве выше температуры конца обратного мартенситного превращения (МП) (A_f), возвращать приобретенную ранее, в мартенситном состоянии деформацию и, соответственно, восстанавливать первоначальную форму [1]. ДЭПФ, в отличие от ЭПФ, реализуется только за счёт изменения температуры, и не требует внешних приложенных напряжений [2]. Причиной ДЭПФ являются внутренние поля напряжения, которые приводят к ориентированному росту мартенсита охлаждения и, как следствие, к деформации образца. В монокристалле с ориентированным мартенситом легче получить большие обратимые магнитоиндуцированные деформации [3]. Поэтому за счет реализации ДЭПФ в возможно расширить область применения ферромагнитных сплавов с термоупругими МП. Подробного исследования ДЭПФ на монокристаллах $\text{Ni}_{49}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}\text{Co}_6$ проведено не было, поэтому целью нашей работы является исследование одностороннего ЭПФ и выяснение условий возникновения ДЭПФ в гетерофазных $[\bar{3}12]$ -монокристаллах $\text{Ni}_{49}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}\text{Co}_6$ (ат. %) при деформации сжатием.

Монокристаллы были выращены по методу Бриджмена в атмосфере инертного газа. Образцы для испытаний при сжатии имели форму параллелепипедов и размеры $(3 \times 3 \times 6) \text{ мм}^3$. Для исследования были выбраны монокристаллы в следующих структурных состояниях: (1) отжиг 1373К, 25 минут, закалка; (2)

отжиг 1373К, 25 минут, закалка + старение 673К, 4 часа в свободном состоянии; (3) отжиг 1373К, 25 минут, закалка + старение 673К, 4 часа под нагрузкой 100 МПа.

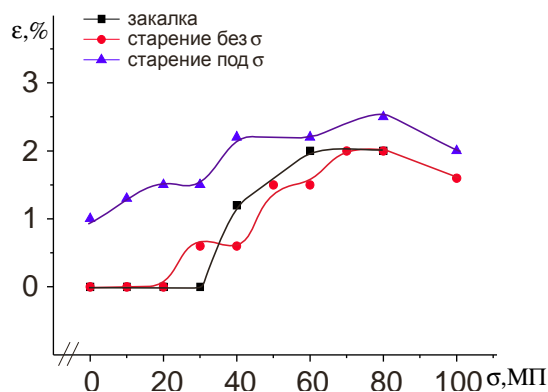


Рис.1. Зависимости обратимой деформации при эффекте памяти формы от внешних приложенных напряжений $\varepsilon(\sigma)$ для монокристаллов $Ni_{49}Fe_{18}Ga_{27}Co_6$ (ат. %) с $[111]$ - ориентацией

частиц образуются дальнедействующие поля напряжений, которые появляются за счет суммирования локальных полей напряжений.

На рис. 1 представлены зависимости обратимой деформации при ЭПФ от внешних напряжений $\varepsilon(\sigma)$ для $[111]$ монокристаллов $Ni_{49}Fe_{18}Ga_{27}Co_6$ (ат. %). При охлаждении/нагреве в свободном состоянии в кристаллах (1,2), формируется самоакомодирующая структура, образец не изменяет размеров и ДЭПФ

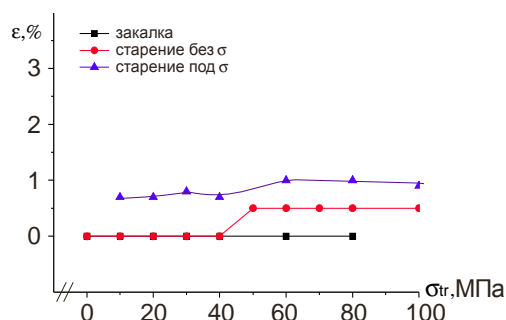


Рис.2. Зависимости обратимой деформации при двустороннем эффекте памяти формы от напряжений-тренировок $\varepsilon(\sigma_{тр})$ для монокристаллов $Ni_{49}Fe_{18}Ga_{27}Co_6$ (ат. %) с $[111]$ - ориентацией

состояниях (1) и (2) максимальная величина ЭПФ меньше и достигает всего $\varepsilon = 1,8(\pm 0,3)\%$.

Установлено, что кристаллы находятся в гетерофазном состоянии: в кристаллах (1-3) после высокотемпературного отжига выделяются крупные частицы γ' -фазы длиной $5 \div 10$ мкм. Последующие низкотемпературные отжики (2,3) приводят к формированию мелких частиц γ' -фазы $5 \div 30$ нм. Частицы γ' -фазы в сплавах NiFeGaCo вытянуты вдоль направлений типа $\langle 111 \rangle$, и при старении в свободном состоянии растут 4 кристаллографических эквивалентных варианта частиц. Ориентация $[111]$ была выбрана, поскольку все направления типа $\langle 111 \rangle$ расположены под разными углами по отношению к $[111]$, и за счет старения под нагрузкой можно управлять числом вариантов частиц [3]. При ориентированном формировании

не наблюдается. В дальнейшем, при повышении значений напряжений $\sigma > 0$ МПа проявляется обычный ЭПФ, т.е. при охлаждении под нагрузкой при $T = M_s$ начинает расти ориентированный по отношению к оси внешних напряжений вариант мартенсита, с чем связана деформация, вплоть до $T = M_f$. При нагреве до $T = A_s$ начинается обратное МП и при $T > A_f$ вся заданная деформация является обратимой. В отличие от структурных состояний (1) и (2), в состоянии (3) при охлаждении в свободном состоянии сразу реализуется ДЭПФ, и его величина составляет $1(\pm 0,3)\%$. Как и в состояниях (1) и (2), в состоянии (3) при увеличении нагрузки наблюдается ЭПФ и значения обратимой деформации при ЭПФ растут с увеличением внешних напряжений. Максимальная величина ЭПФ в состоянии (3) при $\sigma = 80$ МПа и составляет $\varepsilon = 2,5(\pm 0,3)\%$, тогда как в

Поскольку объемная доля частиц γ' -фазы мала ($\sim 2\%$), это приводит к небольшой величине ДЭПФ, меньшей, чем величина ЭПФ. В состоянии (2) так же возможно наблюдать ДЭПФ после предварительной тренировки при $\sigma_{tr}=50$ МПа (тренировка заключается в термоциклировании через интервал МП под нагрузкой, 1 цикл). Величина ДЭПФ составляет $\varepsilon=0,5(\pm 0,3)\%$ и при дальнейших повышении напряжений тренировок практически не изменяется. В состоянии (1) тренировки не приводят к возникновению ДЭПФ. В состоянии 3 проведение тренировок практически не оказывает влияния на величину ДЭПФ.

На рис. 3 представлена зависимость эффективности получения ДЭПФ от напряжений тренировок в монокристаллах $Ni_{49}Fe_{18}Ga_{27}Co_6$ (ат. %) с $[\bar{1}\bar{3}12]$ ориентацией. Эффективность рассчитана, как отношение величины $\varepsilon_{ДЭПФ}$ к соответствующей величине обратимой деформации $\varepsilon_{ЭПФ}$, взятой при тех же

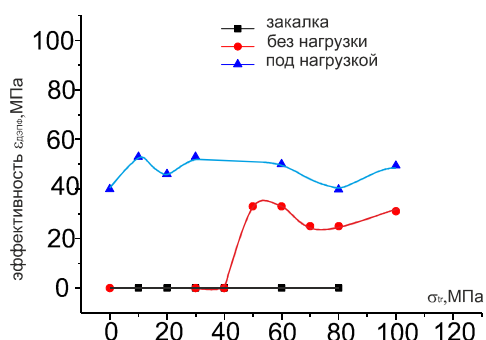


Рис.3. Зависимости эффективности получения ДЭПФ от напряжений тренировок для монокристаллов $Ni_{49}Fe_{18}Ga_{27}Co_6$ (ат. %) с $[\bar{1}\bar{3}12]$ ориентацией

напряжениях σ , при которых проводилась тренировка σ_{tr} , (при $\sigma_{tr}=0$ за величину $\varepsilon_{ЭПФ}$ принимали максимальную обратимую деформацию)

Эффективность получения ДЭПФ в состоянии (2) достигает 30%. Причина возникновения ДЭПФ может быть связана с образованием дислокационных петель вокруг мелких частиц γ' -фазы размером 10-30 нм (четыре варианта частиц) [4]. В состоянии (3) эффективность получения ДЭПФ составляет 40–50% и является наибольшей, в 1,6 раза выше, чем в состоянии (2). Кроме полей напряжений от дислокаций, как в монокристаллах (2), в кристаллах (3) присутствуют поля напряжений от ориентированных частиц. Таким образом, старение под нагрузкой является эффективным методом получения ДЭПФ в монокристаллах $Ni_{49}Fe_{18}Ga_{27}Co_6$ (ат. %).

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 14-08-00946 и стипендии Президента РФ СП-6909.2013.3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Отцука К., Симидзу К., Судзуки Ю., Сэкигути Ю., Тадаки Ц., Хомма Т., Миядзаки С. Сплавы с эффектом памяти формы / Под. Ред. Фунакубо Х.: Пер. с японск. – М.: Металлургия, 1990. – 222 с.
2. Материалы с эффектом памяти формы: Справ. Изд./Под ред. Лихачева В.А. – Т. 2. – СПб: Изд-во НИИХ СПбГУ, 1998. – 374 с.
3. Karaca H.E., Karaman I., Basaran B., Chumlyakov Yu. I., Maier H.J. Magnetic field and stress induced martensite reorientation in NiMnGa ferromagnetic shape memory single crystals // Acta Mater. – 2006. – V.54. – No.1. – P. 233-245.
4. A. Amengual, E. Cesari and J. Pons Characteristics of the two-way memory effect induced by thermomechanical cycling in Cu-Zn-Al single crystals // Journal de Physique IV. V. 5. C8-871-876.