

**ТЕРМОУПРУГИЕ МАРТЕНСИТНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ПОД НАГРУЗКОЙ В [011]-  
МОНОКРИСТАЛЛАХ СПЛАВА  $Ni_{49}Fe_{18}Ga_{27}Co_6$  ПОД ДЕЙСТВИЕМ РАСТЯГИВАЮЩИХ  
И СЖИМАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ**

А.Б. Тохметова, Н.Г. Ларченкова, Е.Е. Тимофеева

Научный руководитель: доцент, 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: [aida-tx@mail.ru](mailto:aida-tx@mail.ru)

**STRESS-INDUCED THERMOELASTIC MARTENSITIC TRANSFORMATIONS IN [011] –  
ORIENTED  $Ni_{49}Fe_{18}Ga_{27}Co_6$  SINGLE CRYSTALS IN TENSION AND COMPRESSION**

A.B. Tokhmetova, N.G. Larchenkova, E.E. Timofeeva

Scientific Supervisor: Dr. Sci., docent, E.Y. Panchenko, Dr.Sci., prof., Y.I. Chumlyakov

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

E-mail: [aida-tx@mail.ru](mailto:aida-tx@mail.ru)

**Abstract.** *The effect of the stress state (tension/compression) on the thermoelastic  $L2_1$ -(14M) $L1_0$  martensitic transformations in heating/cooling cycles under the constant stress and in loading/unloading cycles at fixed temperature in [011]-oriented  $Ni_{49}Fe_{18}Ga_{27}Co_6$  single crystals was determined. The martensitic transformation at cooling/heating occurs with a maximum reversible strain of 4.1 % at constant tensile stress of 50 MPa, and the value of the thermal hysteresis decreases with the increase of applied stresses. On the contrary, the value of thermal hysteresis in isobaric tests and stress hysteresis in isothermal tests increase with the growth of the external stress level or given strain. An bursting character of the reverse martensitic transformation in compression is observed. The reversible strain reaches 5.5 % in cooling/heating cycles at the compressive stress of 60 MPa. Such asymmetry of the properties in [011]-oriented  $Ni_{49}Fe_{18}Ga_{27}Co_6$  single crystals at the stress-induced martensitic transformations is caused both by the detwinning processes of  $L1_0$ -martensite crystals in compression, and by the difficulty of the detwinning processes in tension.*

**Введение.** Сплавы на основе NiFeGa(Co) – одни из самых перспективных ферромагнитных материалов с термоупругим мартенситным превращением (МП), в которых наблюдаются эффект памяти формы (ЭПФ) и сверхэластичность (СЭ). На данных сплавах была обнаружена однократная магнитоиндуцированная деформация 8,5 – 10 % [1]. В отличие от широко известных сплавов  $Ni_2MnGa$ , данные сплавы имеют запас пластичности и могут найти широкое применение в современных технологиях [2]. В работе [3] выявлена сильная ориентационная зависимость и обнаружена асимметрия функциональных свойств при развитии МП под нагрузкой в [001]-монокристаллах при деформации растяжением и сжатием. Теоретический расчёт деформации превращения с учётом образования сдвойникового варианта мартенсита  $\epsilon_{CVP}$  и его последующего раздвойникования  $\epsilon_{detw}$  показывает, что под действием сжимающей нагрузки в [011]-монокристаллах NiFeGa(Co)  $\epsilon_{CVP} = 3,1 \%$ ,  $\epsilon_{detw} = 3,0 \%$ , следовательно,  $\epsilon_{tr} = \epsilon_{CVP} + \epsilon_{detw} = 6,1 \%$ . Тогда как под действием растягивающей нагрузки вдоль [011]-направления  $\epsilon_{tr} = \epsilon_{CVP} = 4,1 \%$ , т.е.  $\epsilon_{detw} = 0$  также как под действием сжимающей нагрузки в [001]-

монокристаллах [4]. Раздвоивание кристаллов мартенсита под нагрузкой может давать значительный вклад в величину механического и термического гистерезисов. Поэтому целью данной работы является изучение асимметрии развития термоупругих МП в [011]-монокристаллах  $Ni_{49}Fe_{18}Ga_{27}Co_6$  под действием растягивающей и сжимающей нагрузки.

**Методика эксперимента.** Монокристаллы  $Ni_{49}Fe_{18}Ga_{27}Co_6$  (ат. %) выращивали методом Бриджмена. Ориентацию образцов определяли на рентгеновском дифрактометре «Дрон-3». Образцы для деформации сжатием имели форму параллелепипеда с размерами рабочей части  $(3 \times 3 \times 6)$  мм<sup>3</sup>, для деформации растяжением – форму двойных лопаток с размерами  $(16 \times 1,3 \times 2,7)$  мм<sup>3</sup>. Исследования проводились на монокристаллах в исходном состоянии. Перед испытанием образцы шлифовали и электролитически полировали. Изотермические циклы «нагрузка-разгрузка» при комнатной температуре  $T = 297$  К проводились на установке Instron 3369, общая заданная деформация в цикле составляла  $2 \div 6$  % при скорости деформации 6 % в минуту. Механические испытания для наблюдения ЭПФ проводили на установке ИМРС-1, погрешность измерения которой составляет 0,3 %.

**Обсуждение результатов.** На рис. 1а представлены кривые  $\varepsilon(T)$  при охлаждении/нагреве на монокристаллах  $Ni_{49}Fe_{18}Ga_{27}Co_6$ , ориентированных вдоль [011]-направления под действием постоянных сжимающих напряжений. При охлаждении/нагреве в свободном состоянии в [011]-монокристаллах образуется самоаккомодирующая структура и изменение размеров образца не происходит. Под действием внешних напряжений 20 МПа наблюдается ЭПФ с величиной обратимой деформации 3,5 % и узким термическим гистерезисом 40 К. С ростом приложенных напряжений до 60 МПа реализуется максимальная обратимая деформация 5,5 % которая близка к теоретически рассчитанной величине  $\varepsilon_{tr} = \varepsilon_{CVP} + \varepsilon_{detw} = 6,1$  % с учётом раздвоивания кристаллов мартенсита, а гистерезис  $\Delta T$  увеличивается до 80 К. При внешних напряжениях 60 МПа обратное МП имеет взрывной характер, т.е. деформация образца происходит в очень узком интервале температур  $\Delta_1 = \Delta_2 \rightarrow 0$  К ( $\Delta_1 = M_s - M_f$ ,  $\Delta_2 = A_f - A_s$ ), практически мгновенно. ДЭПФ при деформации сжатием, наблюдается после термоциклирования через интервал МП под действием сжимающей нагрузки 60 МПа, величина обратимой деформации которого составляет 1,3 % (рис. 1а). В монокристаллах деформированных под действием растягивающей нагрузки (рис. 1б) при охлаждении/нагреве в свободном состоянии сразу же наблюдаем ДЭПФ с малой

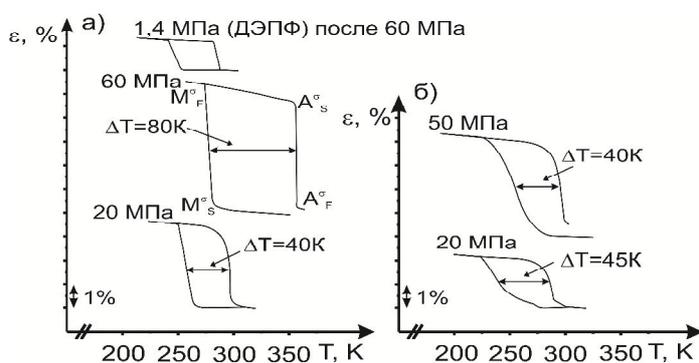


Рис. 1. ЭПФ в [011]-монокристаллах  $Ni_{49}Fe_{18}Ga_{27}Co_6$  а) под действием сжимающей нагрузки б) под действием растягивающей нагрузки

величиной обратимой деформации 0,4 % в пределах погрешности измерений. При внешних приложенных напряжениях 20 МПа обратимая деформация меньше на 1,4 %, а гистерезис шире на 9 К, чем в монокристаллах деформированных под действием сжимающей нагрузки. Однако, после увеличения напряжений от 20 МПа до 50 МПа термический гистерезис уменьшается на 8 К. Обратимая деформация растёт с увеличением приложенных напряжений и достигает

4,1 %, которая совпадает с теоретически рассчитанной величиной  $\varepsilon_{tr} = \varepsilon_{CVP} (\varepsilon_{detw} = 0) = 4,1$  %. При

50 МПа температурные интервалы прямого и обратного МП широкие  $\Delta_1=58$  К,  $\Delta_2=22$  К, в отличие от кристаллов, деформированных под действием сжимающей нагрузки  $\Delta_1 = \Delta_2 \rightarrow 0$  К. Термоциклирование при  $\sigma \leq 50$  МПа не приводит к дополнительному росту внутренних напряжений, необходимых для наведения ДЭПФ. Величина обратимой деформации ДЭПФ остаётся в пределах погрешности.

На рис. 2 представлены кривые зависимости  $\sigma(\epsilon)$ , при  $T = 295$  К на монокристаллах  $Ni_{49}Fe_{18}Ga_{27}Co_6$ , ориентированных вдоль [011]-направления. Кривые  $\sigma(\epsilon)$  при деформации сжатием демонстрируют нестабильное течение – наблюдается две стадии уменьшения и увеличения напряжения с

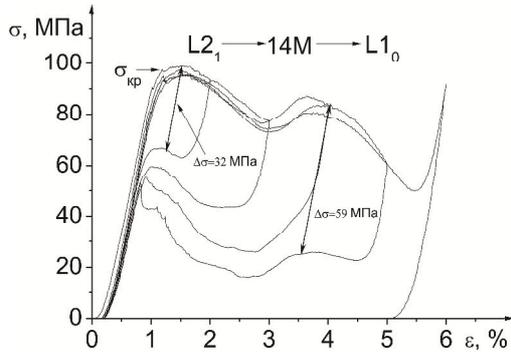


Рис. 2. Кривые зависимости напряжения от деформации при  $T = 297$  К для [011]-монокристаллов  $Ni_{49}Fe_{18}Ga_{27}Co_6$  под действием сжимающей нагрузки

ростом деформации. Первая стадия заканчивается при деформации  $\epsilon = \epsilon_{CVP} = 3\%$ , при которой образуется сдвойникованный вариант мартенсита  $\epsilon_{detw} = 3,1\%$  и начинается вторая стадия. При достижении заданной деформации  $6\%$ , что соответствует полному раздвойникованию кристаллов мартенсита  $\epsilon_{tr} = \epsilon_{CVP} + \epsilon_{detw}$  наблюдается полная стабилизация  $L1_0$ -мартенсита, а обратное МП происходит только путём дополнительного нагрева на  $20-30$  К. При этом МП носит взрывной характер. Механический гистерезис  $\Delta\sigma$ , характеризующий рассеяние энергии при развитии обратимых МП, увеличивается в 2 раза с ростом заданной

деформации от 2 до 5%. Под действием растягивающей нагрузки в циклах нагрузка/разгрузка, когда напряжения превышают 50 МПа [011]-монокристаллы разрушаются, и т.о. наблюдать кривую СЭ невозможно.

**Выводы.** Показано, что раздвойникование кристаллов  $L1_0$ -мартенсита под нагрузкой в условиях изотермических и изобарических испытаний в [011]-монокристаллах  $Ni_{49}Fe_{18}Ga_{27}Co_6$  под действием сжимающей нагрузки приводит к стабилизации  $L1_0$ -мартенсита, резкому росту термического и механического гистерезиса с ростом величины ЭПФ и СЭ и взрывному характеру МП.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 16-19-10250.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Morito H., Fujita A., Oikawa K., Ishida K., Fukamichi K., Kainuma R. Stress-assisted magnetic-field-induced strain in Ni-Fe-Ga-Co ferromagnetic shape memory alloys // Applied physics letters. 2007. V. 90. P. 201–203.
2. Pons J., Cesari E., Segui C., Masdeu F. Ferromagnetic shape memory alloys: Alternatives to Ni-Mn-Ga // Mater. Science and Eng. A., – 2008. – V. 481-482. – P. 57-65.
3. Панченко Е.Ю., Чумляков Ю.И., Тимофеева Е.Е., Казанцева Л.П., Maier H.J. Ориентационная зависимость высокотемпературной сверхэластичности в ферромагнитных монокристаллах Ni-Fe-Ga // «Деформация и разрушение материалов», 2010. – № 2. – С. 22 – 29.
4. Тимофеева Е. Е. Закономерности термоупругих мартенситных превращений, эффекта памяти формы и сверхэластичности в монокристаллах ферромагнитных сплавов Ni-Fe-Ga-(Co): автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук. – Томск, 2012. – 19 с.