

## ОРИЕНТАЦИОННАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ЭФФЕКТА ПАМЯТИ ФОРМЫ В МОНОКРИСТАЛЛАХ

### СПЛАВА $Ni_{53}Mn_{25}Ga_{22}$

М.В. Пичкалёва, Е.Е. Тимофеева

Научные руководители: д.ф. - м.н., доцент Е.Ю. Панченко, д.ф. - м.н., профессор Ю.И. Чумляков

Национальный исследовательский Томский государственный университет,

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

E-mail: [mariska\\_713@mail.ru](mailto:mariska_713@mail.ru)

## ORIENTATIONAL DEPENDENCE OF SHAPE MEMORY EFFECT IN $Ni_{53}Mn_{25}Ga_{22}$ SINGLE CRYSTALS

M.V. Pichkaleva, E.E. Timofeeva

Scientific Supervisors: Asist. Prof., Dr. E.Yu. Panchenko, Prof., Dr. Yu.I. Chumlyakov

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

E-mail: [mariska\\_713@mail.ru](mailto:mariska_713@mail.ru)

**Abstract.** *Thermoelastic martensitic transformations were investigated under cooling/heating under compressive load in  $\langle 011 \rangle$ -,  $\langle 123 \rangle$ -oriented NiMnGa single crystals annealed at a 1273 K for 1 hour followed by slow cooling. It is shown that the reversible strain at shape memory effect and the value of the thermal hysteresis  $\Delta T$  depend on the orientation of the crystal axis: in the  $\langle 011 \rangle$ -oriented single crystals the maximum reversible strain is  $\varepsilon = 4.1\%$ , and the maximum thermal hysteresis  $\Delta T = 60$  K, and in  $\langle 123 \rangle$ -oriented single crystals  $\varepsilon = 3.2\%$ , and  $\Delta T = 35$  K.*

**Введение.** Ферромагнитные монокристаллы сплава Гейслера  $Ni_{53}Mn_{25}Ga_{22}$  обладают эффектами памяти формы (ЭПФ) и сверхэластичности (СЭ), основанными на термоупругом характере мартенситных превращений (МП) [1, 2]. Эти сплавы допускают управление размерами и формой при изменении температуры и приложении нагрузки, и магнитного поля [3]. Ферромагнитные материалы с памятью формы могут найти широкое применение в авиакосмической промышленности и микросистемной технике [4, 5]. Сплавы Ni-Mn-Ga обладают высокой анизотропией ( $A = 2C_{44}/(C_{11} - C_{12}) > 10$ ) [6], вследствие чего поликристаллы являются хрупкими, и исследования сплавов Ni-Mn-Ga сфокусированы на монокристаллах, что подразумевает изучение закономерностей МП в зависимости от ориентации кристалла. Поэтому целью данной работы является исследование ориентационной зависимости величины ЭПФ и термического гистерезиса  $\Delta T$  в монокристаллах  $Ni_{53}Mn_{25}Ga_{22}$ .

**Материалы и методы.** Монокристаллы  $Ni_{53}Mn_{25}Ga_{22}$  выращены методом Бриджмена. Перед испытанием образцы шлифовали и электролитически полировали для удаления поврежденного шлифовкой слоя. Монокристаллы исследовали при деформации сжатием. Размеры образцов составляли (4×4×8) мм. Закономерности МП под сжимающей нагрузкой исследованы на специально разработанной установке для измерения ЭПФ при охлаждении/нагреве под постоянной нагрузкой. Для исследования выбраны монокристаллы двух ориентаций:  $\langle 011 \rangle$  и  $\langle 123 \rangle$ , характеризующиеся разной величиной деформации решетки при  $B2(L2_1)$ - $L1_0$  МП  $\varepsilon_0^{\langle 011 \rangle} = 6,25\%$ ,  $\varepsilon_0^{\langle 123 \rangle} = 4,77\%$ . Монокристаллы исследованы после отжига при 1273 К, 1 ч с последующим медленным охлаждением.

**Результаты.** Экспериментально показано на монокристаллах сплава  $\text{Ni}_{53}\text{Mn}_{25}\text{Ga}_{22}$ , что величины обратимой и необратимой деформаций, термический гистерезис при развитии ЭПФ при охлаждении/нагреве под нагрузкой зависят от ориентации. Калориметрические исследования показывают, что в исследуемом состоянии наблюдается одностадийное МП при охлаждении/нагреве в свободном состоянии. При охлаждении ниже температуры начала МП  $M_s$  образуется самоаккомодирующая структура мартенсита, что не сопровождается изменением размеров образца. При нагреве до температуры начала обратного МП  $A_s$  начинается обратное МП, кристаллы мартенсита, сокращаясь в размерах, полностью исчезают при температуре конца обратного МП  $A_f$ . МП в свободном состоянии характеризуется широкими интервалами прямого  $\Delta_1$  и обратного  $\Delta_2$  МП  $33 \div 50$  К и малым гистерезисом  $11 \div 18$  К. Температуры и гистерезис не зависят от ориентации.

В условиях приложенных напряжений  $10 \div 150$  МПа при  $T = M'_s$  происходит рост благоприятно ориентированного по отношению к внешней нагрузке варианта мартенсита, что сопровождается изменением длины образца (рис. 1). При нагреве до  $A'_s$  начинается обратное МП, и накопленная в процессе МП деформация возвращается. Также увеличиваются температуры начала и конца прямого и обратного МП. С ростом напряжений до 150 МПа увеличивается обратимая деформация до 4,1 % в  $\langle 011 \rangle$ -монокристаллах, а в  $\langle 123 \rangle$ -монокристаллах до 3,2 %, поскольку увеличивается объемная доля ориентированного мартенсита, а объемная доля самоаккомодирующей структуры уменьшается (рис. 2 а). Одновременно с ростом деформации при увеличении напряжений при охлаждении/нагреве увеличивается термический гистерезис  $\Delta T$  (рис. 2 б). Максимальные значения гистерезиса в  $\langle 011 \rangle$ -кристаллах  $\Delta T = 60$  К, в  $\langle 123 \rangle$ -кристаллах  $\Delta T = 35$  К в исследуемом состоянии достигаются при 60 МПа и 100 МПа, соответственно, когда наблюдается максимальная обратимая деформация. Увеличение гистерезиса с ростом напряжений объясняется взаимодействием самоаккомодирующей структуры и ориентированного мартенсита. При напряжениях выше 60 МПа обратимая деформация и термический гистерезис практически не изменяются, что связано с тем, что объемная доля ориентированного мартенсита не изменяется с увеличением напряжений. Максимальная обратимая деформация  $\sim 4,1$  % при охлаждении/нагреве под нагрузкой 60 МПа, приложенной вдоль  $\langle 011 \rangle_A$ -направления, больше теоретического значения деформации превращения с учетом образования сдвойникового варианта  $L1_0$ -мартенсита  $\varepsilon_{CVP} \approx 3,0$  % (рис. 2 а). Следовательно, в  $\langle 011 \rangle_A$ -монокристаллах сплава  $\text{Ni}_{53}\text{Mn}_{22}\text{Ga}_{25}$  при проявлении ЭПФ наблюдается раздвойникование кристаллов  $L1_0$ -мартенсита. Однако величина обратимой деформации меньше теоретического ресурса деформации превращения при полном раздвойниковании  $L1_0$ -мартенсита  $\varepsilon_{CVP+detw} \approx 6,25$  %. В кристаллах с ориентацией  $\langle 123 \rangle_A$ , напротив, величина обратимой деформации  $\sim 3,2$  % не превышает теоретическую деформацию превращения при образовании сдвойникового  $L1_0$ -мартенсита  $\varepsilon_{CVP} \approx 3,79$  %, и предполагается, что раздвойникование в  $\langle 123 \rangle_A$ -кристаллах подавлено совсем. Косвенным доказательством отсутствия раздвойникования кристаллов  $L1_0$ -мартенсита под нагрузкой в  $\langle 123 \rangle_A$ -кристаллах является узкий термический гистерезис меньше 35 К и малая величина необратимой деформации – менее 0,3 %. Известно, что при раздвойниковании мартенсита под нагрузкой плоскость Габитуса поворачивается относительно инвариантного положения, что сопровождается образованием дополнительных внутренних напряжений, большой энергией рассеяния, широким гистерезисом в  $\langle 011 \rangle_A$ -монокристаллах до 60 К и большой величиной необратимой деформации до 0,7 % (рис. 1, 2 а).

**Закключение.** Экспериментально показано, что в монокристаллах  $Ni_{53}Mn_{25}Ga_{22}$ , отожжённых при 1273 К, 1 ч с последующим медленным охлаждением закономерности развития ЭПФ при охлаждении/нагреве под нагрузкой (величина обратимой деформации и термический гистерезис) определяются ориентацией кристалла, а именно: в  $\langle 011 \rangle$ -монокристаллах обратимая деформация превышает теоретическое значение в 1, 4 раза, термический гистерезис  $\Delta T = 60$  К, а в  $\langle 123 \rangle$ -монокристаллах обратимая деформация практически совпадает с теоретически рассчитанной, термический гистерезис  $\Delta T = 35$  К.

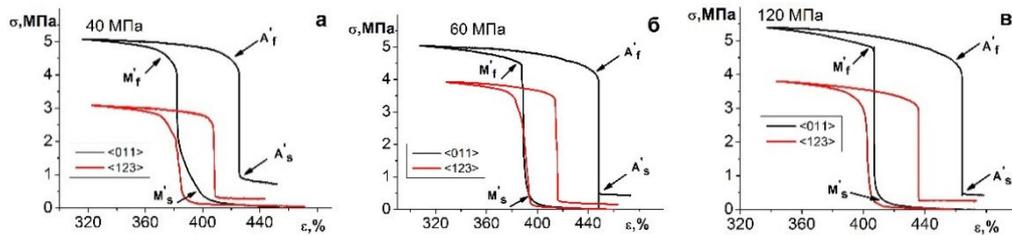


Рис. 1. Кривые  $\varepsilon(T)$  при различном уровне внешних приложенных напряжений для монокристаллов сплава  $Ni_{53}Mn_{25}Ga_{22}$  при деформации сжатием: а – 40 МПа, б – 60 МПа, в – 120 МПа

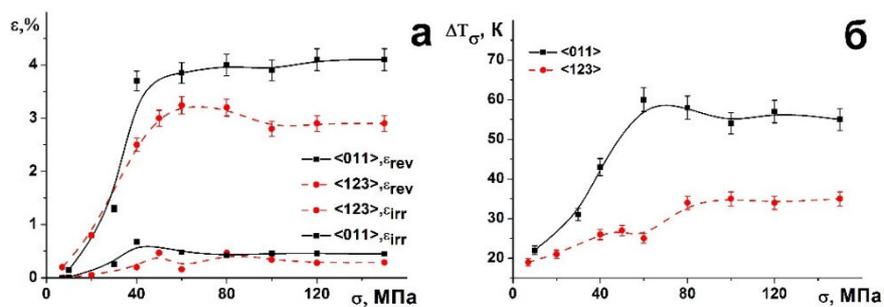


Рис. 2. Зависимости обратимой  $\varepsilon_{rev}$  и необратимой  $\varepsilon_{irr}$  деформации (а) и термического гистерезиса (б) от приложенных напряжений для монокристаллов сплава  $Ni_{53}Mn_{25}Ga_{22}$

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rothl S., Gaitzschl U., Potschke1 M. Magneto-mechanical behaviour of textured Polycrystals of NiMnGa ferromagnetic Shape Memory Alloys. // Advanced Materials Research. – 2008. – Vol. 52. – P. 29–34.
2. Mullner, P., Chernenko V. A. Stress-induced twin rearrangement resulting in change of magnetization in a Ni–Mn–Ga ferromagnetic martensite. // Scripta Materialia. – 2003. – Vol. 49. – P. 129–133.
3. Тимофеева Е. Е Закономерности термоупругих мартенситных превращений, эффекта памяти формы и сверхэластичности в монокристаллах ферромагнитных сплавов Ni-Fe-Ga-(Co) дисс. на соискание уч. ст. канд. физ.-мат. наук/ 01.04.07. – Томск, 2012г. – 195.
4. Sozinov A., Likhachev A. A., Lanska N., Ullakko K. Giant magnetic-field-induced strain in NiMnGa seven-layered martensitic phase // Appl. Phys. Lett. – 2002. – V. 80. – p. 1746.
5. Васильев А.Н., Бучельников В.Д., Такаги Т., Ховайло В.В. Эстрин Э.И. Ферромагнетики с памятью формы // Успехи физических наук. – 2003. – Т. 173. – № 6. – С. 577–608.
6. Карпук М. М., Костюк Д. А., Кузавко Ю. А. Отражение и преломление акустических волн на границе диэлектрик-ферромагнитный сплав Гейслера // ФММ. – 2010. – Т. 110. – № 2. – С. 138–150.