

Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Национальный исследовательский Томский государственный университет
Томский государственный архитектурно-строительный университет
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
Томский национальный исследовательский медицинский центр РАН

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ НАУК

Сборник научных трудов
XIV Международной конференции студентов, аспирантов
и молодых ученых

Том 1. Физика

РОССИЯ, ТОМСК, 25 – 28 апреля 2017 г.

PROSPECTS OF FUNDAMENTAL SCIENCES DEVELOPMENT

XIV International Conference of students, graduate students
and young scientists

Volume 1. Physics

RUSSIA, TOMSK, April 25 – 28, 2017

Томск 2017

ОРИЕНТАЦИОННАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ЭФФЕКТА ПАМЯТИ ФОРМЫ В МОНОКРИСТАЛЛАХ

СПЛАВА $\text{Ni}_{53}\text{Mn}_{25}\text{Ga}_{22}$

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

ORIENTATIONAL DEPENDENCE OF SHAPE MEMORY EFFECT IN $\text{Ni}_{53}\text{Mn}_{25}\text{Ga}_{22}$ 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

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 ΔT 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 $\text{Ni}_{53}\text{Mn}_{25}\text{Ga}_{22}$ 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 ΔT в монокристаллах $\text{Ni}_{53}\text{Mn}_{25}\text{Ga}_{22}$.

Материалы и методы. Монокристаллы $\text{Ni}_{53}\text{Mn}_{25}\text{Ga}_{22}$ 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 Δ_1 и обратного Δ_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 ΔT (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.

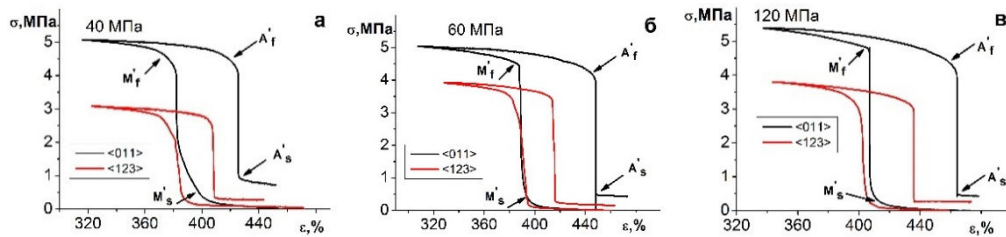


Рис. 1. Кривые $\varepsilon(T)$ при различном уровне внешних приложенных напряжений для монокристаллов сплава $Ni_{53}Mn_{25}Ga_{22}$ при деформации сжатием: а – 40 МПа, б – 60 МПа, в – 120 МПа

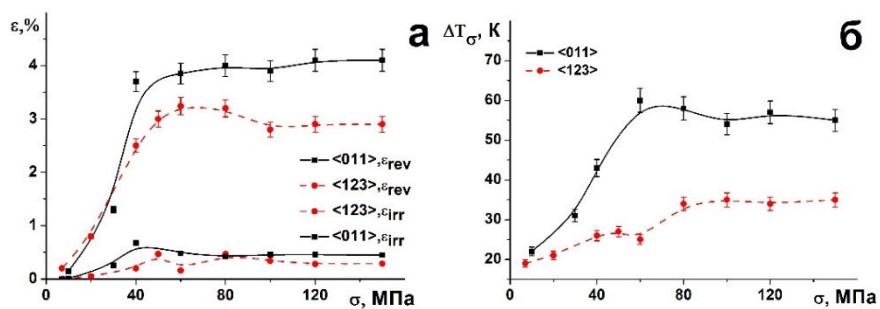


Рис. 2. Зависимости обратимой ε_{rev} и необратимой ε_{irr} деформации (а) и термического гистерезиса (б) от приложенных напряжений для монокристаллов сплава $Ni_{53}Mn_{25}Ga_{22}$

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.