

**ОРИЕНТАЦИОННАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ТЕРМИЧЕСКОГО И МЕХАНИЧЕСКОГО
ГИСТЕРЕЗИСА В МОНОКРИСТАЛЛАХ СПЛАВА $Ni_{51}Fe_{18}Ga_{27}Co_4$**

К.С. Осипович

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: osipovich_k@mail.ru

**ORIENTATION DEPENDENCE OF THERMAL AND MECHANICAL HYSTERESIS IN
 $Ni_{51}Fe_{18}Ga_{27}Co_4$ SINGLE CRYSTALS**

K.S. Osipovich

Scientific Supervisor: Assistant professors, Doctor of Physical and Mathematical Sciences E.Y. Panchenko;

Professor, Doctor of Physical and Mathematical Sciences Y.I. Chumlyakov

National Research Tomsk State University, Lenina Str., 36, Tomsk, Russia, 634050

E-mail: osipovich_k@mail.ru

Abstract. *The orientation dependence of thermal ΔT and mechanical $\Delta\sigma$ hysteresis was investigated in $Ni_{51}Fe_{18}Ga_{27}Co_4$ single crystals as-grown with isobaric (shape memory effect) and isothermal (superelasticity) experiments. Single crystals oriented along the [001]-direction show a high reversible deformation of $\varepsilon_{ЭПФ}^{001} = (4,0 \pm 0,2) \%$ for martensitic transformations, small thermal hysteresis $\Delta T = (22 \pm 2) K$ and mechanical $\Delta\sigma^{001} = (47 \pm 2) MPa$ hysteresis, as compared with to single crystals oriented along the [110]-direction. Such orientation dependence is determined by the contribution of the $L1_0$ -martensite under the ε_{derw} in deformation of transformation.*

Введение. Сплавы NiFeGa(Co) испытывают $B2(L2_1)$ - $10M/14M$ - $L1_0$ мартенситные превращения (МП) в ферромагнитном состоянии и могут найти широкое практическое применение в качестве преобразователей магнитной и тепловой энергии в механическую работу [1]. Важным параметром, определяющим коэффициент полезного действия в циклах преобразования, является величина рассеянной энергии при развитии обратимых МП. Величина рассеяния энергии характеризуется термическим гистерезисом ΔT при развитии прямого и обратного МП при охлаждении/нагреве под действием постоянных внешних напряжений при проявлении эффекта памяти формы (ЭПФ) или механическим гистерезисом $\Delta\sigma$ при развитии МП при постоянной температуре в циклах разгрузка/нагрузка при изотермических испытаниях в условиях сверхэластичности (СЭ).

Известно, что при проявлении ЭПФ и СЭ обратимая деформация определяется деформацией превращения, которая включает в себя процессы переориентации и раздвойнивания кристаллов мартенсита. Поэтому выяснение влияния процессов раздвойнивания вариантов мартенсита на величину ΔT и $\Delta\sigma$, функциональные свойства представляет интерес для практического использования.

Для изучения ориентационной зависимости ΔT и $\Delta\sigma$ в настоящей работе рассматриваются монокристаллы $Ni_{51}Fe_{27}Ga_{18}Co_4$ (ат. %) в исходном состоянии, ориентированных вдоль двух [001]- и [110]-направлений, с различным вкладом деформации раздвойнивания в деформацию превращения.

Теоретически показано, что при развитии $B2(L2_1)-L1_0$ МП под нагрузкой вдоль выбранных направлений наблюдаются максимальные значения деформации превращения $\varepsilon_{tr0} = 6,2$ % при сжатии, связанная с образованием сдвойникового варианта мартенсита ε_{CVP} и деформация, обусловленная его последующим раздвойникованием под нагрузкой ε_{detw} [2]. Вклад раздвойникового в величину ε_{tr0} при деформации сжатием вдоль [001]-направления отсутствует $\varepsilon_{detw} = 0$ %, а при сжатии вдоль [110]-направления составляет почти 50 %: $\varepsilon_{CVP} \approx 3,0$ % и $\varepsilon_{detw} \approx 3,2$ %.

Материалы и методы исследования. Монокристаллы $Ni_{51}Fe_{18}Ga_{27}Co_4$ были выращены по методу Бриджмена в атмосфере инертного газа. Образцы для испытания были врезаны на электроискровом станке с длиной 6 мм и размером поперечного сечения 3 x 3 мм². Ориентация образцов была определена на рентгеновском дифрактометре «Дрон-3» с использованием $Fe_{K\alpha}$ -излучения. Перед испытанием образцы шлифовали и полировали в электролите $H_3PO_4 + Cr_2O_3$ при $T = 293$ К, $U = 17$ В. Металлографические наблюдения проводили на цифровом измерительном микроскопе Keyence VHX-2000. Механические испытания проводили на установке ИМРС в циклах охлаждения/нагрева при постоянной внешней нагрузке с выводом кривых $\varepsilon(T)$ на компьютер, скорость охлаждения и нагрева составляла 7 К/мин и на установке Instron VHS 5969 со скоростью деформации 10^{-3} 1/с при постоянной температуре испытания.

Результаты. Монокристаллы $Ni_{51}Fe_{27}Ga_{18}Co_4$ при $T = T_{комн}$ находятся в двухфазном состоянии ($L2_1 + \gamma$). Причем в $L2_1$ -фазе присутствует $(13,5 \pm 0,5)$ % объемная доля γ -фазы, которая не испытывает МП (рис. 1).

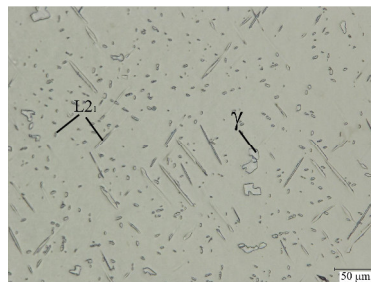


Рис. 1. Металлография поверхности монокристаллов сплавов $Ni_{51}Fe_{18}Ga_{27}Co_4$

На рисунке 2 видно, что при $\sigma_{внеш} = 30$ МПа в монокристаллах, ориентированные вдоль [001]- и [110]-направления, величина термического гистерезиса одинакова $\Delta T \approx 20$ К, но величина эффекта памяти формы в [001]-кристаллах $\varepsilon_{ЭПФ}^{001} = (1,8 \pm 0,2)$ %, почти в 4 раза больше, чем в [011]-кристаллах $\varepsilon_{ЭПФ}^{110} = (0,5 \pm 0,2)$ %. Значит, для [110]-монокристаллов требуются большие напряжения для ориентированного роста мартенсита, чем для [001]-монокристаллов. При увеличении внешней нагрузки до $\sigma_{внеш} = 150$ МПа термический гистерезис в [001]-кристаллах уменьшается, а в [011]-кристаллах, наоборот, увеличивается и $\Delta T^{001} = 2 * \Delta T^{110}$, различия $\varepsilon_{ЭПФ}^{001} > \varepsilon_{ЭПФ}^{110}$ сохраняется.

Монокристаллы $Ni_{51}Fe_{18}Ga_{27}Co_4$ (ат. %) при изотермических испытаниях при $T = T_{комн}$ с одинаковой заданной деформацией 5,4 % демонстрируют СЭ (рисунок 2). Причем вдоль [110]-направления при развитии обратимых МП наблюдается необратимая деформация ~1,3 % на кривых $\sigma(\varepsilon)$ и ~0.3% на кривых $\varepsilon(T)$, в отличие [001]-направления, где величина обратимой деформации СЭ полностью

совпадает с заданной деформацией. Механический гистерезис в [001]-монокристаллах составляет $\Delta\sigma^{001} = (47 \pm 2)$ МПа, а в [110]-монокристаллах величина $\Delta\sigma^{110}$ сильно зависит от степени деформации и при $\varepsilon_{зад} = 5,4\%$ $\Delta\sigma^{110} = (172 \pm 2)$ МПа почти в 4 раза больше, чем $\Delta\sigma^{001}$. В [001]-монокристаллах высокий уровень рассеяния энергии при исследовании ЭФ и СЭ по сравнению [001]-монокристаллами может быть связан с наличием вклада раздвойникового в величину деформации превращения в [110]-монокристаллах $Ni_{51}Fe_{18}Ga_{27}Co_4$ (ат. %) и с более низкими прочностными свойствами мартенсита.

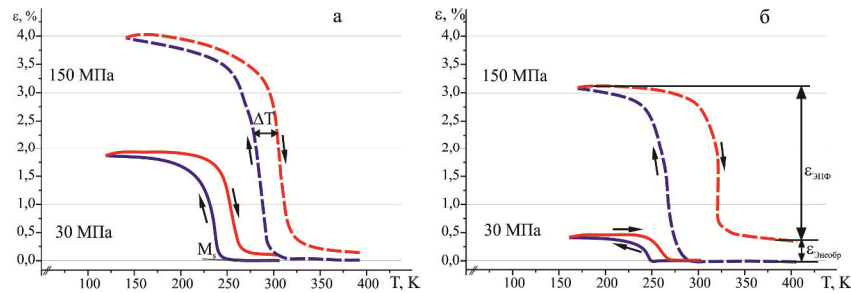


Рис. 2. Кривые $\varepsilon(T)$ для монокристаллов сплава $Ni_{51}Fe_{18}Ga_{27}Co_4$ в состояние после роста вдоль: а – [001]-направления; б – [110]-направления

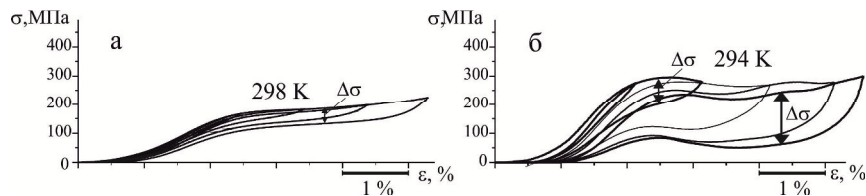


Рис. 3. Кривые сверхэластичности $\sigma(\varepsilon)$ для монокристаллов сплава $Ni_{51}Fe_{18}Ga_{27}Co_4$ вдоль: а – [001]-направления; б – [110]-направления

Заключение. Экспериментально показано, что вклад раздвойникового $L1_0$ -мартенсита под нагрузкой ε_{detw} в деформацию превращения определяют ориентационную зависимость термического ΔT и механического $\Delta\sigma$ гистерезиса в [001]- и [110]-монокристаллах $Ni_{51}Fe_{18}Ga_{27}Co_4$ (ат. %). Если величина $\varepsilon_{detw} \approx 3,2\%$ при $\varepsilon_{tr0} = 6,2\%$, как в [110]-монокристаллах, то развитие обратимых МП характеризуется высокими значениями рассеяния энергии, как при изобарических $\Delta T = (57 \pm 2)$ К, так и при изотермических испытаниях $\Delta\sigma^{110} = (183 \pm 2)$ МПа. В [001]-монокристаллах $Ni_{51}Fe_{18}Ga_{27}Co_4$ (ат. %), для которых $\varepsilon_{detw} \approx 0\%$ при $\varepsilon_{tr0} = 6,2\%$, величины термического $\Delta T = (22 \pm 2)$ К и механического $\Delta\sigma^{001} = (47 \pm 2)$ МПа в 2 и почти 4 раза меньше, чем [110]-монокристаллах, соответственно.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zheng H., Xia M., Liu J., Huang Y., Li J. Martensitic transformation of $Ni_{55.3}Fe_{17.6}Ga_{27.1}Co_x$ magnetic shape memory alloys // Acta Materialia. – 2005. – V. 53. P. 5125–5129.
2. Hamilton R.F., Sehitoglu H., Efstathiou C., Maier H.J. Mechanical response of NiFeGa alloys containing second-phase particles // Scripta Materialia. – 2007. – V. 55. P.497–499.