

**ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ТЕРМОУПРУГИХ МАРТЕНСИТНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ ПОД
НАГРУЗКОЙ В [110]-МОНОКРИСТАЛЛАХ СПЛАВА $Ni_{51}Fe_{18}Ga_{27}Co_4$**

К.С. Осипович

Научный руководитель: 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

**STRESS-INDUCED MARTENSITIC TRANSFORMATION IN [110]-ORIENTED $Ni_{51}Fe_{18}Ga_{27}Co_4$
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. *In the present study, we investigated the stress-induced thermoelastic martensitic transformations in $Ni_{51}Fe_{18}Ga_{27}Co_4$ single crystals oriented along the [110]-direction. It was shown that high-temperature annealing at a temperature higher than the order-disorder transition temperature affects of the stress-induced thermoelastic martensitic transformations due to a change in the structure of the high-temperature phase of $L2_1$ by $B2$, the dissolution of the γ -phase. The isobaric experiments (shape memory effect) under external applied stress $\sigma = 100$ МПа have shown that for ($L2_1 + \gamma$)-crystals of the reversible deformation is $\varepsilon_{SME} = 2,1$ % with insignificant irreversibility and thermal hysteresis $\Delta T = (29 \pm 2)$ K. For $B2$ -crystals the reversible deformation $\varepsilon_{SME} = 4,5\%$, accompanied by the presence of an irreversible deformation to $\approx 1,6\%$ and the thermal hysteresis value $\Delta T = (61 \pm 2)$ K. The isothermal experiments (superelasticity) shown the energy dissipation at $T = 323$ K is $\Delta\sigma = (89 \pm 2)$ МПа and decreases with increasing test temperature in the $B2$ -crystals.*

Введение. Ферромагнитные материалы на основе сплава NiFeGaCo испытывают термоупругое $B2(L2_1)$ - $L1_0$ мартенситное превращение (МП), проявляют эффект памяти формы (ЭПФ) с величиной обратимой деформации до 10 % при растяжении и характеризуются циклической стабильностью высокотемпературной сверхэластичности (СЭ) [1]. Известно [1], что в монокристаллах, ориентированных вдоль [110]-направления, максимальное значение величины обратимой деформации превращения при проявлении ЭПФ и СЭ составляет $\varepsilon_{r0} = 6,2$ % при сжатии. Деформация превращения ε_{r0} связана с образованием сдвойникового варианта мартенсита ε_{CVP} и деформацией, обусловленной его последующим раздвойникованием под нагрузкой, ε_{detw} . Вклад раздвойникового в величину ε_{r0} составляет почти 50 %: $\varepsilon_{CVP} \approx 3,0$ % и $\varepsilon_{detw} \approx 3,2$ %. Выяснение влияния вклада раздвойникового на развитие термоупругих $B2(L2_1)$ - $L1_0$ МП в циклах охлаждения/нагрев и нагрузка/разгрузка является важным фактором для реализации всех потенциальных возможностей материала на основе сплава

NiFeGaCo. Поэтому цель данной работы заключается в исследовании особенностей развития термоупругих МП под нагрузкой в [110]-монокристаллах сплава $Ni_{51}Fe_{18}Ga_{27}Co_4$ (at. %).

Материалы и методы исследования. Монокристаллы $Ni_{51}Fe_{18}Ga_{27}Co_4$ были выращены по методу Бриджмена в атмосфере инертного газа. Ориентация образцов с размерами $6 \times 3 \times 3$ мм³ была определена на рентгеновском дифрактометре «Дрон-3» с использованием $Fe_{K\alpha}$ -излучения. Химический состав монокристаллов был подтвержден на растровом электронном микроскопе Philips SEM – 15 с микроанализатором EDAX ECON IV. Испытания проводили на установке ИМРС в циклах охлаждения/нагрева при постоянной внешней нагрузке и на установке Instron VHS 5969 со скоростью деформации 10^{-3} 1/с при постоянной температуре испытания.

Результаты. В работе [2] показано, что в исходном состоянии монокристаллы ферромагнитного сплава $Ni_{51}Fe_{18}Ga_{27}Co_4$ при $T = T_{комн}$ находятся в двухфазном состоянии ($L2_1 + \gamma$): в высокотемпературной фазе $L2_1$ -матрицы присутствует $(13,5 \pm 0,5)$ % объемной доли вторичной γ -фазы, которая не испытывает МП. Полуколичественный элементный анализ показал, что вторичная фаза незначительно отличается по химическому составу от матрицы, обогащена Ni и обеднена Co (табл. 1), что согласуется с литературными данными [3]. Высокотемпературный отжиг при температуре $T = 1463$ К, что выше температуры перехода порядок-беспорядок ($T = 1248$ К) в данных сплавах [4], приводит к изменению структуры высокотемпературной фазы $L2_1$ на $B2$, растворению γ -фазы.

Таблица 1

Полуколичественный элементный анализ монокристаллов $Ni_{51}Fe_{18}Ga_{27}Co_4$

Фаза	Ni, at (%)	Fe, at (%)	Ga, at (%)	Co, at (%)
$L2_1$	$50,7 \pm 1,27$	$18,3 \pm 0,46$	$26,7 \pm 0,67$	$4,4 \pm 0,11$
γ	$50,04 \pm 1,25$	$21,03 \pm 0,53$	$23,99 \pm 0,6$	$4,94 \pm 0,12$
$B2$	$50,81 \pm 1,27$	$18,84 \pm 0,47$	$25,96 \pm 0,65$	$4,38 \pm 0,11$

Для исследования закономерности развития термоупругих МП в ($L2_1 + \gamma$)- и $B2$ -кристаллах проводили изобарические и изотермические испытания в циклах охлаждение/нагрев и нагрузка/разгрузка, соответственно (рис. 1).

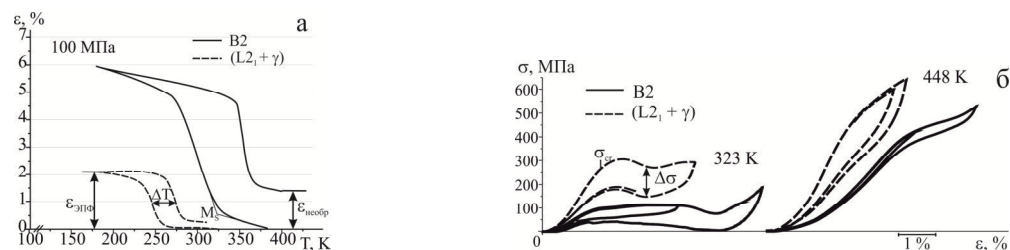


Рис. 1. Изобарические (а) и изотермические (б) испытания для [110]-монокристаллов сплава $Ni_{51}Fe_{18}Ga_{27}Co_4$ в исходном состоянии при деформации сжатием

Экспериментально установлено, что для $B2$ -кристаллов температура начала прямого МП M_s на 66 К больше, чем для монокристаллов $Ni_{51}Fe_{18}Ga_{27}Co_4$ в исходном состоянии (рис. 1а). Растворение вторичной γ -фазы оказывает влияние на рост величины обратимой деформации при ЭПФ. Так при

приложении одинаковых внешних напряжений величиной $\sigma_{\text{внеш}} = 100$ МПа для $(L2_1 + \gamma)$ -кристаллов величина ЭПФ составляет $\varepsilon_{\text{ЭПФ}} = 2,1$ %, что почти в 2 раза меньше, чем для $B2$ -кристаллов ($\varepsilon_{\text{ЭПФ}} = 4,5$ %). Рост обратимой деформации сопровождается увеличением величины термического гистерезиса ΔT , который характеризует рассеяние энергии при развитии МП в циклах охлаждение/нагрев, и необратимой деформации $\varepsilon_{\text{необ}}$. Изобарический цикл при $\sigma_{\text{внеш}} = 100$ МПа для $(L2_1 + \gamma)$ -кристаллов характеризуется величиной $\Delta T = (29 \pm 2)$ К и незначительной необратимой деформацией в отличие от $B2$ -кристаллов, в которых величина термического гистерезиса больше в 2 раза $\Delta T = (61 \pm 2)$ К и необратимая деформация составляет $\varepsilon_{\text{необ}} \approx (1,6 \pm 0,2)$ %. Неполная обратимость определяется вкладом пластической деформаций при развитии МП в циклах охлаждение/нагрев под нагрузкой, которое сопровождается раздвойникованием кристаллов мартенсита. Механический гистерезис $\Delta\sigma$, который характеризует рассеяние энергии при развитии МП в циклах нагрузка/разгрузка, в $(L2_1 + \gamma)$ -кристаллах сильно зависит от степени деформации и при постоянной температуре испытания $T = 323$ К составляет $\Delta\sigma = (121 \pm 2)$ МПа. В $B2$ -кристаллах при таких же условиях величина механического гистерезиса составляет $\Delta\sigma = (89 \pm 2)$ МПа, а с увеличением температуры испытания до $T = 448$ К происходит уменьшение механического гистерезиса до $\Delta\sigma = 42$ МПа. [110]-монокристаллы вне зависимости от состояния характеризуются ростом критических напряжений σ_{cr} с увеличением температуры начала прямого МП в соответствии с соотношением Клапейрона–Клаузиуса [5]: для $(L2_1 + \gamma)$ -кристаллов σ_{cr} увеличивается с 273 до 453 МПа, а для $B2$ -кристаллов – с 93 до 409 МПа.

Заключение. В работе показано, что в [110]-монокристаллах сплава $\text{Ni}_{51}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}\text{Co}_4$ закономерности развитие термоупругих МП определяются наличием вклада раздвойникования мартенсита под нагрузкой $\varepsilon_{\text{detw}}$ в деформацию превращения ε_{tr0} и микроструктурой высокотемпературной фазы ($(L2_1 + \gamma)$ - и $B2$ -структура). В $B2$ -кристаллов обратимые МП в циклах охлаждение-нагрев под сжимающей нагрузкой 100 МПа характеризуются высокими значениями величины ЭПФ для $\varepsilon_{\text{ЭПФ}} = 4,8$ %, величиной термического гистерезиса $\Delta T = (61 \pm 2)$ К и совершенной высокотемпературной сверхэластичностью при 448 К в отличие от $(L2_1 + \gamma)$ -кристаллов.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hamilton R.F. Mechanical response of NiFeGa alloys containing second-phase particles // Scripta Materialia. – 2007. – V. 55. – P.497–499.
2. Осипович К.С. Ориентационная зависимость термического и механического гистерезиса в монокристаллах сплава $\text{Ni}_{51}\text{Fe}_{27}\text{Ga}_{18}\text{Co}_4$ // Сборник научных трудов XIV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – 2017. – Т. 1: Физика. – С. 261–263.
3. Imano Y. Martensitic and magnetic transformations of Ni–Ga–Fe–Co ferromagnetic shape memory alloys // Materials Science and Engineering A. – 2006. – V. 438–440. – P. 970–973.
4. Masdeu F. Magnetic-field-induced strain assisted by tensile stress in $L1_0$ martensite of Ni-Fe- Ga-Co alloy // Appl. Phys. Lett. – 2008. – V. 93. – P. 152503–152508.
5. Panchenko E. Yu. Two-way shape memory effect under multi-cycles in [001]-oriented $\text{Ni}_{49}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}\text{Co}_6$ single crystal // Materials Science & Engineering A. – 2017. – V. 706. – P. 95–103.