

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ



Национальный исследовательский
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

**Сборник материалов
XVI Российской научной
студенческой конференции**

Томск, 17–20 апреля 2018 г.



ТОМСК
«Издательство НТЛ»
2018

Влияние продолжительности старения в мартенсите под нагрузкой на функциональные свойства [001]-монокристаллов сплава $\text{Ni}_{51}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}\text{Co}_4$ *

К.С. Осипович

Томский государственный университет, г.Томск

Сплавы NiFeGaCo , демонстрирующие эффект памяти формы (ЭПФ) и высокую циклическую стабильность сверхэластичности (СЭ), являются перспективными материалами и могут найти широкое практическое применение в качестве преобразователей магнитной и тепловой энергии в механическую работу [1]. В интересах развития новых производственных технологий основополагающим фактором является разработка и применение новых термомеханических обработок перспективных материалов для совершенствования их свойств. Для улучшения функциональных свойств ферромагнитных сплавов $\text{Ni}_{51}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}\text{Co}_4$ разрабатываются режимы низкотемпературного старения в мартенсите под нагрузкой [2]. Цель данного исследования – изучить влияние продолжительности старения в мартенсите под нагрузкой на функциональные свойства монокристаллов сплава $\text{Ni}_{51}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}\text{Co}_4$, ориентированных вдоль [001]-направления.

В работе [3] показано, что монокристаллы ферромагнитного сплава $\text{Ni}_{51}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}\text{Co}_4$ при $T = T_{\text{комн}}$ находятся в двухфазном состоянии ($L2_1 + \gamma$): в высокотемпературной фазе в $L2_1$ -матрице присутствует $(13,5 \pm 0,5) \%$ объемной доли вторичной γ -фазы, которая не испытывает мартенситные превращения (МП). Поэтому величина обратимой деформации меньше, чем величина теоретически рассчитанной деформации, которая составляет $\varepsilon_{\text{т0}} = 6,2 \%$ при сжатии [4]. Монокристаллы, ориентированные вдоль [001]-направления, старели в мартенсите при заданной температуре $T = 175^\circ\text{C}$ при приложении внешней сжимающей нагрузки $\sigma = 700 \text{ МПа}$ с различной продолжительностью для поиска эффективной термообработки с целью улучшения функциональных свойств. В данной работе представлены следующие кристаллы: исходные – кристаллы I, состаренные в мартенсите под нагрузкой в течение 0,5 ч – кристаллы II и состаренные в мартенсите под нагрузкой в течение 1 ч – кристаллы III.

Экспериментально установлено, что увеличение продолжительности старения в мартенсите под нагрузкой в [001]-монокристаллах сплава $\text{Ni}_{51}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}\text{Co}_4$ приводит к росту характеристических температур МП и сокращению термического гистерезиса ΔT , который характеризует рассеяние энергии при развитии МП в циклах охлаждения/нагрев (таблица).

* Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 16-19-10250.

Характеристические температуры, термический гистерезис и величина необратимой деформации в [001]-монокристаллах $\text{Ni}_{51}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}\text{Co}_4$

Кристаллы	M_s , К (± 2)	M_f , К (± 2)	A_s , К (± 2)	A_f , К (± 2)	ΔT , К (± 2)	$ \varepsilon_{\text{необ}} $, % ($\pm 0,3$)
I	271	257	280	296	26	0,4
II	306	297	318	323	19	0,2
III	328	320	336	344	16	—

Для кристаллов I характерно наличие необратимой деформации $\varepsilon_{\text{необ}} \approx 0,4 \%$, связанной с появлением пластической деформации при развитии МП под нагрузкой. Причем с увеличением продолжительности старения в мартенсите под нагрузкой необратимая деформация уменьшается, а в кристалле III вовсе исчезает.

Такое влияние обусловлено увеличением внутренних дальнедействующих полей напряжений и ростом упругой энергии в материале при образовании мартенсита охлаждения одновременно с уменьшением рассеяния энергии при обратимых превращениях. Наличие внутренних дальнедействующих полей напряжения в [001]-монокристаллах сплава $\text{Ni}_{51}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}\text{Co}_4$ подтверждается появлением двустороннего эффекта памяти формы (ДЭПФ) в кристалле III с величиной обратной деформации $|\varepsilon_{\text{ДЭПФ}}| = (2,7 \pm 0,3) \%$ (рис. 1).

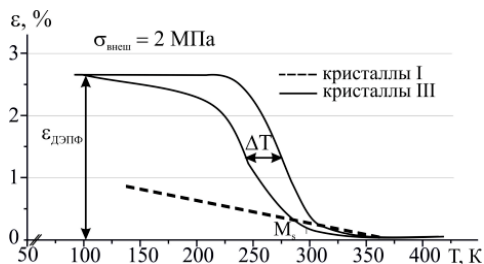


Рис. 1. Кривые $\varepsilon(T)$ в циклах охлаждение/нагрев в исследуемых [001]-монокристаллах сплава $\text{Ni}_{51}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}\text{Co}_4$ при деформации сжатием

На рис. 2 изображены кривые $\sigma(\varepsilon)$ в циклах нагрузка/разгрузка при постоянной температуре испытания в исследуемых кристаллах I и III. Монокристаллы вне зависимости от термомеханической обработки демонстрируют сверхэластичность (СЭ).

Старение в мартенсите под нагрузкой приводит к увеличению температуры A_f (таблица) и соответственно температуры начала СЭ, уменьшению критических напряжений $\sigma_{\text{кр}}$ образования мартенсита. В кристаллах III при одинаковой температуре испытания $T_{\text{исп}} = 323 \text{ К}$ значение критических на-

пряжений составляет $\sigma_{\text{cr}}^{\text{III}} = 74$ МПа, что почти в 3 раза меньше, чем в кристалле I ($\sigma_{\text{cr}}^{\text{I}} = 199$ МПа). При исследовании СЭ было показано, что в кристаллах III при одинаковой величине обратимой деформации и температуре испытания $T = 373$ К наблюдается уменьшение почти в 2 раза величины механического гистерезиса $\Delta\sigma^{\text{III}} = 27$ МПа, характеризующего рассеяние энергии в циклах нагрузка/разгрузка, по сравнению с кристаллами I ($\Delta\sigma^{\text{I}} = 49$ МПа).

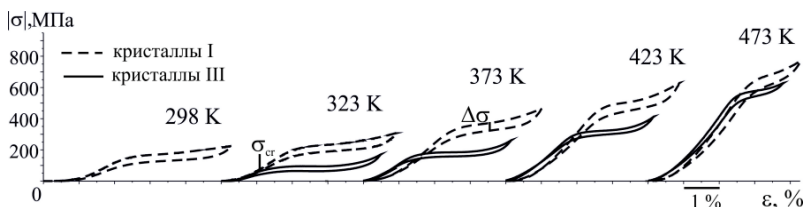


Рис. 2. Кривые $\sigma(\varepsilon)$ в циклах нагрузка/разгрузка при постоянной температуре испытания в исследуемых [001]-монокристаллах сплава $\text{Ni}_{51}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}\text{Co}_4$ при деформации сжатием

Таким образом, в [001]-монокристаллах ферромагнитного сплава $\text{Ni}_{51}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}\text{Co}_4$ старение в мартенсите под нагрузкой в течение 1 ч является эффективным способом для управления критическими напряжениями σ_{cr} образования мартенсита, величиной механического $\Delta\sigma$ и термического гистерезиса ΔT и наведения ДЭПФ с величиной обратимой деформации $|\varepsilon_{\text{ДЭПФ}}| = (2,7 \pm 0,3) \%$.

Автор выражает благодарность своим научным руководителям д.ф.-м.н. Е.Ю. Панченко и д.ф.-м.н., проф. Ю.И. Чумлякову.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zheng H., Xia M., Liu J., et al. Martensitic transformation of $\text{Ni}_{55,3}\text{Fe}_{17,6}\text{Ga}_{27,1}\text{Co}_x$ magnetic shape memory alloys // Acta Mater. – 2005. – V. 53. – P. 5125–5129.
2. Niendorf T., Krooß P., Somsen C. Martensite aging – avenue to new high temperature shape memory alloys // Acta Mater. – 2015. – V. 89. – P. 298–304.
3. Осипович К.С. Ориентационная зависимость термического и механического гистерезиса в монокристаллах сплава $\text{Ni}_{51}\text{Fe}_{27}\text{Ga}_{18}\text{Co}_4$ // Сб. науч. трудов XIV Междунар. конф. – 2017. – Т. 1: Физика. – С. 261–263.
4. 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.

Osipovich K.S. Influence of stress induced in martensite aging time on the functional properties of [001]-oriented single crystals of $\text{Ni}_{51}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}\text{Co}_4$ alloy

Осипович Ксения Сергеевна, магистрантка; Osipovich_k@mail.ru