

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ XV РОССИЙСКОЙ НАУЧНОЙ СТУДЕНЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

18–20 мая 2016 г., г. Томск, Россия

Томск
Издательский Дом Томского государственного университета
2016

Эффект памяти формы и сверхэластичность в монокристаллах NiMnGa

М.В. Пичкалёва, Е.Е. Тимофеева, Е.Ю. Панченко, Ю.И. Чумляков
Национальный исследовательский Томский государственный университет,
634050, г. Томск
E-mail: mariska_713@mail.ru

The shape memory effect and superelasticity in single crystals NiMnGa

M.V. Pichkaleva, E.E. Timofeeva, E.Yu. Panchenko, Yu.I. Chumlyakov
National Research Tomsk State University, 634050, Tomsk
E-mail: mariska_713@mail.ru

В настоящее время большой интерес представляют материалы с такими уникальными свойствами, как эффект памяти формы (ЭПФ) и сверхэластичность (СЭ). Особое место среди них занимают сплавы NiMnGa, испытывающие мартенситные превращения (МП) в ферромагнитном состоянии и проявляющие магнитный ЭПФ с обратимой деформацией до 6% [1, 2]. Для широкого практического применения данных материалов необходимы систематические исследования их функциональных свойств. Магнитные характеристики сплавов NiMnGa, в отличие от механических, изучены достаточно подробно. Поскольку поликристаллы NiMnGa очень хрупкие вследствие высоких значений параметра анизотропии [3], исследования данных материалов сводятся в основном к изучению монокристаллов. Таким образом, целью работы является исследование ЭПФ и СЭ в монокристаллах Ni₅₃Mn₂₅Ga₂₂ (ат. %) при деформации сжатием.

Монокристаллы Ni₅₃Mn₂₅Ga₂₂ (ат. %) выращены методом Бриджмена. Для исследования была выбрана ориентация <011>. МП под нагрузкой исследованы с использованием электромеханической машины Instron 5569 с записью кривых $\sigma(\epsilon)$. Температуры МП определены методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) с помощью калориметра DSC 404 F3.

На рис. 1 представлены ДСК кривые при охлаждении / нагреве. Исследования показали, что в <011>-монокристаллах наблюдается одностадийное МП. Характеристические температуры начала и конца прямого МП $M_s = 398$ К и $M_f = 356$ К и начала и конца обратного МП $A_s = 367$ К и $A_f = 416$ К намного выше $T_{комн}$, что может иметь большое практическое значение и сплавы могут быть использованы при высоких температурах, например в авиакосмической промышленности.

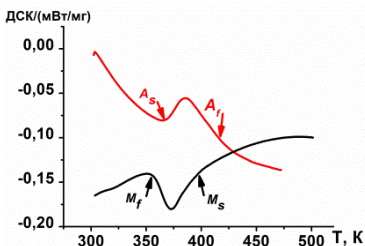


Рис. 1. ДСК кривые, полученные при охлаждении/нагреве, для монокристаллов $\text{Ni}_{53}\text{Mn}_{25}\text{Ga}_{22}$

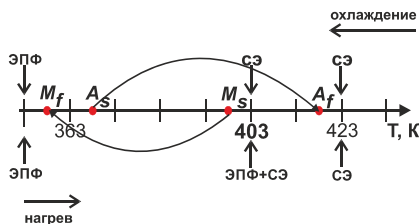


Рис. 2. Схема реализации ЭПФ или СЭ в зависимости от способа достижения температуры испытания

Известно [1], что температуры МП в сплавах NiMnGa сильно зависят от химического состава и электронной концентрации e/a . Экспериментальные значения температур МП в исследуемых монокристаллах $\text{Ni}_{53}\text{Mn}_{25}\text{Ga}_{22}$ близки к значениям для NiMnGa с таким же $e/a = 7,71$ из работы [1]. При охлаждении / нагреве МП характеризуются большими интервалами прямого $\Delta_1 = 42$ К и обратного МП $\Delta_2 = 49$ К и узким термическим гистерезисом $\Delta T = 18$ К. В других сплавах Гейслера Δ_1 и Δ_2 значительно меньше, например в монокристаллах $\text{Ni}_{54}\text{Fe}_{19}\text{Ga}_{27}$ составляют 1–5 К [4]. Из [5] следует, что обратимая составляющая нехимической свободной энергии ΔG_{rev} пропорциональна величинам Δ_1 и Δ_2 , а необратимая составляющая $\Delta G_{\text{irr}} \sim \Delta T$. Отношение $\Delta G_{\text{rev}}/2\Delta G_{\text{irr}} = 2,5 > 1$ и обратное МП начинается при температурах ниже, чем прямое, т.е. $A_s < M_s$. Следовательно, реализуется термоупругое МП 2-го типа по классификации Тонга–Веймана [Там же]. Значит, в ходе прямого МП происходит накопление обратимой энергии, которая не релаксирует и способствует обратному МП.

МП под нагрузкой исследованы в трех температурных интервалах (рис. 2). Независимо от способа достижения температуры испытания (охлаждение до $T_{\text{исп}}$ или нагрев до $T_{\text{исп}}$) при $T_{\text{исп}} < M_f$ наблюдается ЭПФ, и заданная деформация является обратимой только после нагрева (рис. 3, а). Аналогично при $T > A_f$ наблюдается эффект СЭ, и деформация полностью обратима после снятия нагрузки (рис. 3, б). Поскольку интервалы Δ_1 , Δ_2 – широкие, а $A_s < M_s$, то в температурном интервале $M_s < T_{\text{исп}} < A_f$ возможно наблюдать ЭПФ либо СЭ в зависимости от того, как была достигнута температура испытания. При охлаждении до $M_s < T_{\text{исп}} < A_f$ начальное состояние монокристаллов представляет собой аустенит, поскольку не достигнута температура M_s и под нагрузкой реализуется эффект СЭ с величиной критических напряжений $\sigma_{\text{cr}} = 120$ МПа при 403 К. При нагреве до $M_s < T_{\text{исп}} < A_f$ обратное МП еще не закончилось и наблюдается смесь двух фаз – аустенит и мартенсит. Поэтому под нагрузкой происходит переориентация вариантов мартенсита и частично превращение из аустенита в ориентированный

мартенсит, т.е. одновременно развивается СЭ и ЭПФ (рис. 3, в). Заданная деформация обратима полностью после разгрузки и последующего нагрева. Переориентация мартенситных вариантов требует меньших затрат энергии по сравнению с МП под нагрузкой (рис. 3, а, б), поэтому критические напряжения ниже $\sigma_{cr} = 45$ МПа при 403 К, чем при развитии СЭ.

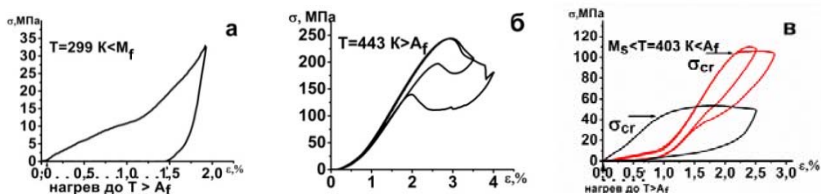


Рис. 3. Кривые $\sigma(\epsilon)$, демонстрирующие развитие ЭПФ и СЭ

Таким образом, при практическом использовании монокристаллов $Ni_{53}Mn_{25}Ga_{22}$ (ат. %) при деформации сжатием необходимо учитывать способ достижения рабочей температуры, в зависимости от которого наблюдается ЭПФ или СЭ с различной величиной критических напряжений.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ (МК-8884.2016.8) и гранта РФФИ (14-08-00946).

Литература

1. Pons J., Chernenko V.A., Santamarta R., Cesari E. Crystal structure of martensitic phases in Ni-Mn-Ga shape memory alloys // Acta mater. 2000. P. 3027–3038.
2. Karaca H.E., Karaman I., Basaran B. et al. On the stress-assisted magnetic-field-induced phase transformation in Ni_2MnGa ferromagnetic shape memory alloys // Acta Materialia. 2006. № 54. P. 233–245.
3. Карпук М.М., Костюк Д.А., Кузавко Ю.А. и др. Отражение и преломление акустических волн на границе диэлектрик – ферромагнитный сплав Гейслера // Физика металлов и металловедение. 2010. Т. 110, № 2. С. 138–150.
4. Тимофеева Е.Е., Панченко Е.Ю. и др. Закономерности развития термоупругих мартенситных превращений под сжимающей нагрузкой в [011]-монокристаллах ферромагнитного сплава NiFeGa // Известия вузов. Физика. 2011. № 12. С. 116–118.
5. Daroczi L., Palanki Z., Szabo S., Beke D.L. Stress dependence of non-chemical free energy contributions in Cu–Al–Ni shape memory alloy // Materials Science and Engineering. 2004. V. 378. P. 274–277.