

## СТРУКТУРНЫЕ ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ В $Ni_2MnGa$ , ИНДУЦИРОВАННЫЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫМ ОДНООСНЫМ СЖАТИЕМ

А.Н.Васильев, А.Кайпер, В.В.Кокорин\*, В.А.Черненко\*, Т.Такаги<sup>+1)</sup>,  
Дж.Тани<sup>+1)</sup>

Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова,  
119899 Москва, Россия

\*Институт Металлофизики АН Украины  
252680 Киев, Украина

<sup>+</sup>Institute of Fluid Science, Tohoku University,  
Sendai 980, Japan

Поступила в редакцию 13 июля 1993 г.

Измерены температурные зависимости низкосолевой магнитной восприимчивости, теплоемкости и скорости поперечного звука в монокристаллах ферромагнетика  $Ni_2MnGa$ , сжатых вдоль оси  $\langle 110 \rangle$  (относительная деформация  $\Delta L/L = 0,05$ ) и разгруженных при азотной температуре. Обнаружено, что восстановление размеров и формы кристаллов при отогреве происходит за счет последовательности структурных фазовых переходов первого рода, сопровождающихся четко выраженными особенностями исследованных физических свойств. Возникновение новых фаз в  $Ni_2MnGa$  обусловлено аномальной неустойчивостью кристаллической решетки этого соединения к смещениям атомов в направлении типа  $\langle 110 \rangle$  в плоскости (110).

Интерметаллическое ферромагнитное соединение  $Ni_2MnGa$  в ряду сплавов Гейслера выделяется тем, что при охлаждении ниже комнатной температуры испытывает структурное превращение из кубической типа  $L2_1$   $\alpha$ -фазы в тетрагональную  $\beta_1$ -фазу с отношением осей  $c/a = 0,94$ . Уже первые нейтронографические исследования [1] этого соединения выявили наличие дополнительных рефлексов, обусловленных длиннопериодными модуляциями кристаллической решетки в  $\beta_1$ -фазе, а последующие рентгенографические и дилатометрические измерения [2,3] позволили установить, что тетрагональная решетка  $Ni_2MnGa$  модулирована статической поперечной волной смещения с длиной волны, равной пяти постоянных решетки. Волновой вектор этой волны перпендикулярен плоскостям типа (110), а вектор поляризации ориентирован вдоль направления типа  $\langle 110 \rangle$ . Период статической волны смещений может быть изменен при низких температурах сжатием вдоль кристаллографического направления  $\langle 110 \rangle$ . С увеличением нагрузки пятислойная модуляция исходной фазы сменяется семислойной, и затем  $Ni_2MnGa$  переходит в немодулированную тетрагональную фазу. Поскольку структурные переходы в этом соединении носят гистерезисный характер, происходят при низких температурах и сопровождаются малыми изменениями объема, в  $Ni_2MnGa$  ярко проявляются эффекты памяти формы и сверхпластичности. Более того, поскольку структурные переходы в  $Ni_2MnGa$  происходят в ферромагнитной матрице, открывается возможность целенаправленного изменения размеров и формы этого вещества комбинацией температуры, магнитного поля и одноосного сжатия.

<sup>1)</sup>T.Takagi, J.Tani

Первые шаги по реализации данной программы предприняты в настоящей работе, в которой сообщается об измерениях ряда физических свойств фаз индуцированных низкотемпературным сжатием монокристаллов  $\text{Ni}_2\text{MnGa}$ . Измерения низкополевой магнитной восприимчивости  $\chi$ , теплоемкости  $C$  и скорости поперечного звука  $S$  проводились на образцах, сжатых вдоль направления  $\langle 110 \rangle$  и разгруженных при азотной температуре. Максимальная относительная деформация  $\Delta L/L$ , при которой не наблюдалось пластического течения образца, составляла около 5% и достигалась при давлении порядка 100 МПа. Для того чтобы не перейти этого предела, образец в низкотемпературном прессе размещался в ограничивающем кольце из термообработанной бериллиевой бронзы.

Постановка задачи предполагает проведение бесконтактных измерений, поскольку как во всем температурном интервале, так и, в особенности, при температурах фазовых переходов, состояние вещества чувствительно даже к малым механическим напряжениям. Если для проведения измерений  $\chi$  и  $C$  требование бесконтактности практически не вызывало затруднений – образец размещался в первом случае в катушке индуктивности, а во втором случае в камере термoанализатора, – то для измерений  $S$  стандартные акустические методики не подходят. Помимо того, что в месте контакта образца с пьезопреобразователем всегда возникают значительные напряжения, изменяющиеся с температурой: само создание при азотной температуре акустического контакта, способного выдерживать сильные изменения размеров и формы образца при отогреве, не представляется возможным. В связи с этим, для измерения температурной зависимости скорости поперечного звука использовалась методика бесконтактного возбуждения и приема упругих волн, основанная на эффекте прямого преобразования электромагнитных и акустических волн на границе металла во внешнем магнитном поле [4]. В процессе отогрева на температурных зависимостях исследованных физических свойств наблюдались аномалии, соответствовавшие обратной последовательности фазовых переходов: из немодулированной тетрагональной  $\beta_3$ -фазы в тетрагональную  $\beta_2$ -фазу с семислойной модуляцией ( $T_3 \sim 190$  К), затем из  $B_2$ -фазы в тетрагональную  $\beta_1$ -фазу с пятислойной модуляцией ( $T_2 \sim 230$  К) и, наконец, из  $\beta_1$ -фазы в кубическую  $\alpha$ -фазу ( $T_1 \sim 290$  К). Температуры фазовых переходов, определенные из различных физических измерений, совпадали с точностью до пяти градусов. Разброс их значений связан, главным образом, с тем, что сплавы Гейслера характеризуются чрезвычайно высокой чувствительностью к стехиометрии состава и даже малые вариации содержания компонент существенно смещают температуры фазовых переходов. Так, например, известные из литературы значения температуры Кюри  $T_C$   $\text{Ni}_2\text{MnGa}$  лежат в интервале 362 – 395 К [5].

Температурная зависимость низкополевой магнитной восприимчивости  $\chi$  показана на рис.1. Видно, что  $\beta_3$ -фаза характеризуется наибольшим значением  $\chi$ , сопоставимым с величиной восприимчивости высокотемпературной  $\alpha$ -фазы. Резкое снижение  $\chi$  в интервале температур 190 – 290 К обусловлено тем, что наличие статической волны смещений вдоль одного из направлений типа  $\langle 110 \rangle$  создает магнитную анизотропию в  $\beta_2$ - и  $\beta_1$ -фазах. Величина магнитной анизотропии меньше в  $\beta_2$ -фазе с семислойной модуляцией. Объемноцентрированная тетрагональная  $\beta_3$ -фаза и объемноцентрированная кубическая  $\alpha$ -фаза такой одномерной модуляцией не обладают. Падение  $\chi$  при  $T_C = 370$  К соответствует переходу  $\alpha$ -фазы в парамагнитное состояние.

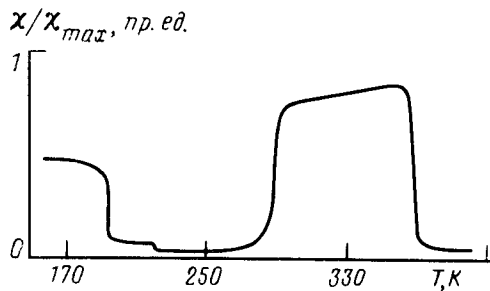


Рис.1

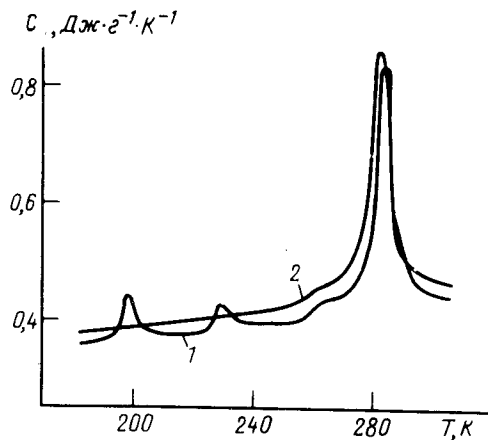


Рис.2

Рис.1. Температурная зависимость низкполевой магнитной восприимчивости  $\chi$  монокристалла  $\text{Ni}_2\text{MnGa}$ , сжатого на 5% вдоль оси  $\langle 110 \rangle$  и разгруженного при  $T = 77 \text{ K}$

Рис.2 Температурные зависимости теплоемкости  $C$  монокристалла  $\text{Ni}_2\text{MnGa}$ , сжатого на 5% вдоль оси  $\langle 110 \rangle$  и разгруженного при  $T = 77 \text{ K}$  (кривая 1) и ненагруженного образца (кривая 2)

Температурная зависимость теплоемкости сжатого и разгруженного при азотной температуре образца  $\text{Ni}_2\text{MnGa}$  показана на рис.2 (кривая 1). В процессе отогрева также наблюдалась описанная выше последовательность структурных переходов. Теплота переходов из  $\beta_3$ -фазы в  $\beta_2$ -фазу (0,37 Дж/г) и из  $\beta_2$ -фазы в  $\beta_1$ -фазу (0,175 Дж/г) на порядок меньше теплоты перехода из  $\beta_1$ - в  $\alpha$ -фазу. Наличие четко выраженной теплоты переходов указывает на то, что все эти структурные превращения в  $\text{Ni}_2\text{MnGa}$  являются фазовыми переходами первого рода. Кривая 2 на этом рисунке представляет собой температурную зависимость теплоемкости, полученную при охлаждении ненагруженного образца. Видно, что в такой постановке эксперимента максимумы, отражающие наличие низкотемпературных структурных превращений, отсутствуют.

Температурная зависимость скорости поперечного звука  $S$  в монокристалле  $\text{Ni}_2\text{MnGa}$ , распространявшегося вдоль направления  $\langle 110 \rangle$  и поляризованного вдоль  $\langle 110 \rangle$ , показана на рис.3. В данном случае волновой вектор звука был перпендикулярен оси сжатия, а вектор поляризации совпадал с ней. Согласно данным, приведенным на рис.1 и 2, скачкам  $S$  на рис.3 соответствуют переходы из  $\beta_3$ - в  $\beta_2$ -фазу ( $T_3 = 190 \text{ K}$ ) и из  $\beta_2$ - в  $\beta_1$ -фазу ( $T_2 = 230 \text{ K}$ ). Поскольку  $\beta_3$ -фаза обладает немодулированной тетрагональной решеткой и ее кристаллографическая ось  $\langle 110 \rangle$  совпадает с соответствующей осью  $\langle 110 \rangle$  в  $\alpha$ -фазе, измеренные значения скорости можно связать с величиной упругого модуля  $(C_{11} - C_{12})/2$ , характеризующего упругость решетки по отношению к сдвигу вдоль направления типа  $\langle 110 \rangle$  в плоскости (110). Качественно этот подход можно распространить и на модулированные тетрагональные фазы. Видно, что устойчивость решетки по отношению к сдвиговым напряжениям повышается при переходах из  $\beta_3$ - в  $\beta_2$ -фазу и из  $\beta_2$ - в  $\beta_1$ -фазу. Отметим, что на температурных зависимостях скорости поперечного звука и теплоемкости, помимо четко выраженных аномалий при структурных фазовых переходах,

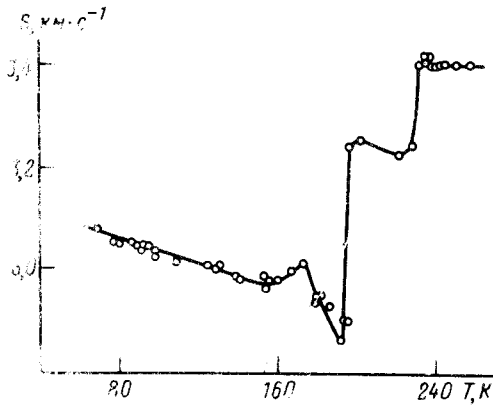


Рис. 3. Температурная зависимость скорости поперечного звука  $S$  в монокристалле  $Ni_2MnGa$ , сжатом на 5% вдоль оси  $\langle 110 \rangle$  и разгруженном при  $T = 77 K$

видеи также дополнительные особенности при некоторых других температурах, природа которых к настоящему времени не ясна.

В результате проведенных исследований физических свойств фаз, индуцированных одноосным низкотемпературным сжатием монокристаллов  $Ni_2MnGa$ , выяснено, что восстановление формы и размеров этого вещества при снятии нагрузки и последующем отогреве происходит за счет структурных фазовых переходов первого рода при четко определенных температурах. Возникновение новых фаз в  $Ni_2MnGa$ , обусловлено аномальной неустойчивостью кристаллической решетки этого соединения по отношению к смещениям атомов в направлении  $\langle 110 \rangle$  в плоскости  $(110)$ . Тесная взаимосвязь магнитных и упругих свойств в  $Ni_2MnGa$  и, в частности, существенное возрастание магнитной анизотропии в модулированных тетрагональных фазах по сравнению с немодулированной тетрагональной и кубической фазами открывает возможность управления размерами и формой этих кристаллов магнитным полем.

1. P.J. Webster, K.R.A. Ziebeck, S.L. Town, and M.S. Peak, *Phil. Mag.* **В49**, 295 (1984)
2. И.Н. Витенко, В.В. Кокорин, В.В. Мартынов, В.А. Черненко Препринт ИФМ АН Украины – 35/22 (1989).
3. V.V. Kokorin, V.V. Martynov, and V.A. Chernenko. *Scr. Met. et Mat.* **26**, 175 (1992).
4. А.Н. Васильев, В.В. Кокорин, Ю.И. Савченко, В.А. Черненко, *ЖЭТФ* **98**, 1437 (1990).
5. J. Soltys, *Acta Phys. Pol. A* **47**, 521 (1975).