

УДК 669.24'74'871:538.22

©1995

МАГНИТНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В СОЕДИНЕНИИ Ni_2MnGa *В.В.Кокорин, В.А.Черненко, В.И.Вальков, С.М.Коноплюк, Е.А.Хапалюк*Институт металлофизики Академии наук Украины,
252680, Киев, Украина

(Поступила в Редакцию 22 февраля 1995 г.)

В окончательной редакции 29 мая 1995 г.)

Обнаружены аномалии барических и температурных зависимостей намагниченности, магнитной проницаемости и магнетокалорического эффекта в монокристаллическом соединении Гейслера Ni_2MnGa при структурных превращениях, индуцированных сжатием.

Интерметаллид Ni_2MnGa имеет упорядоченную кристаллическую решетку типа Cu_2MnAl (структурный тип $L2_1$), то есть он относится к классу сплавов Гейслера. Среди обширного семейства сплавов Гейслера это соединение выделяется тем, что наряду с переходом пара-ферромагнетик в нем реализуется и мартенситное превращение, причем в зависимости от состава может быть как ситуация $T_c > M_s$, так и $M_s > T_c$, где T_c, M_s соответственно температуры магнитного и структурного переходов. Изучению особенностей физических свойств и структуры этих сплавов посвящен ряд работ [1-4]. Отличительной чертой мартенситного превращения в Ni_2MnGa является возможность получить при сжатии две новые фазы, что было обнаружено методами рентгеноструктурного анализа [1]. Учитывая, что структурные превращения в этом случае могут вызвать заметные изменения магнитных свойств, представляет интерес изучение магнитных превращений в рассматриваемом интерметаллиде. Кроме того, следует учитывать, что $Ni-Mn-Ga$ есть представитель нового класса сплавов с памятью формы (СПФ), а именно магнитных сплавов с термомеханической памятью, которые сочетают свойства, характерные для обычных СПФ (например, $Ni-Ti, Cu-Al-Ni$), с оригинальными магнитными характеристиками. Цель настоящей работы состоит в исследовании зависимостей намагниченности и начальной магнитной проницаемости соединения Ni_2MnGa от температуры и давления при одноосном сжатии. Изучался также магнетокалорический эффект (МКЭ) в низко- и высокотемпературных фазах. Изменения в проявлении МКЭ при мартенситном превращении ранее не рассматривались.

1. Материалы и техника эксперимента

Исследуемый сплав был выплавлен в индукционной печи в атмосфере аргона. Монокристаллы $\text{Ni}_2\text{Mn}_n\text{Ga}$ весом около 200 г были выращены из полученного слитка методом Бриджмена. Согласно рентгено-спектрального анализа, состав сплава несколько отличается от стехиометрического. Содержание компонент было равным (at.%): Ni-Mn — 23.6, Ga — 24.9. Кристаллографические направления в монокристалле определяли методом Лауэ. Ориентированные образцы вырезались электроискровым способом и представляли собой в случае измерений намагниченности (σ) или проницаемости (μ) цилиндра диаметром 2 мм, весом 40÷60 мг. Продольная ось цилиндра совпадала в пределах 5° с осью [110].

Значения удельной намагниченности σ измерялись как функции магнитного поля H и температуры T . Использовались методы измерения в импульсном магнитном поле [5] (время импульса $1 \mu\text{s}$, максимальное значение поля 160 kOe) и статический метод с применением электронных весов (максимальное поле $H = 15 \text{ kOe}$).

Первый метод был использован для выполнения исследований намагниченности предварительно сжатых образцов при $T = 77 \text{ K}$, поскольку обеспечивал регистрацию температурных зависимостей сразу после снятия нагрузки при нагреве образца, начиная с низких температур. Вторым методом регистрировали изменения намагниченности при нагреве или охлаждении в постоянном магнитном поле. Погрешности обеих методик составляют $\sim 1\%$ и $\sim 0.1\%$ соответственно. Стабильность поддержания температуры образца в каждой точке составляла $\pm 0.5 \text{ K}$. Зависимости относительных значений низкополевой магнитной проницаемости от величины одноосного давления p при постоянных значениях температуры исследовали методом трансформатора.

Магнетокалорический эффект ΔT при включении и выключении поля, равного 0.82 kOe, изучался при помощи методики, использованной в [6]. Регистрирующая термопара в данном случае помещалась между двумя идентичными пластинами сплава. Работоспособность методики контролировалась измерениями температурных зависимостей ΔT вблизи точки Кюри T_c гадолиния.

2. Результаты эксперимента и их обсуждение

Зависимость намагниченности, измеренной в поле $H = 15 \text{ kOe}$, от температуры представлена на рис. 1. На этом же рисунке показана полевая зависимость σ для двух температур $T_1 = 281 \text{ K}$ и $T_2 = 292 \text{ K}$, кривые 4, 5 соответственно, где $T_1 < M_s$, а $T_2 > M_s$. Кривые $\sigma(H)$ для температур T_1 и T_2 представляют собой полевые зависимости для низко- и высокотемпературных фаз соответственно. Можно видеть, что насыщение для низкотемпературной фазы (мартенсита) достигается при большем значении поля. Кривая 1 зависимости $\sigma(T)$ получена в процессе нагрева монокристалльного образца, который был ориентирован таким образом, что направление [110] совпадало с H . Можно видеть, что при $T = M_s = 285 \text{ K}$ монотонность изменения $\sigma(T)$ нарушается. В соответствии с зависимостями $\sigma(H)$ высокотемпературная фаза (аустенит) имеет меньшую намагниченность насыщения. Кривая 2

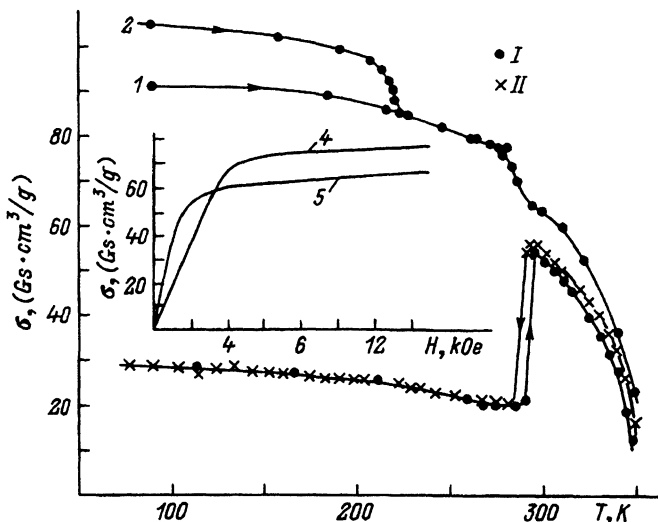


Рис. 1. Температурные зависимости намагниченности для монокристалла Ni_2MnGa при $H = 15$ (1, 2) и 0.82 kOe (3).

I — нагрев, II — охлаждение. 2 — после предварительного сжатия и разгрузки образца при 77 K. На вставке — намагниченность при 281 (4) и 292 K (5).

соответствует образцу, который при $T = 77$ K был подвергнут одноосному сжатию вдоль оси [110]. После снятия нагрузки производились измерения намагниченности в процессе нагрева. При $T \approx 220$ K происходит уменьшение σ до уровня, характерного для образца, который не снимался. Кривые 1 и 2 совпадают при $T > 220$ K. Различие в кривых 1 и 2 в низкотемпературной области вызвано тем, что в процессе одноосного сжатия образуется фаза с большей намагниченностью по сравнению с мартенситом, полученным при охлаждении без нагрузки. При $T \approx 220$ K происходит межмартенситный переход $\beta_1''' \rightarrow \beta_1'$ [1]. Ранее этот переход был отмечен по особенностям зависимостей низкополевой магнитной восприимчивости и теплоемкости от температуры [2]. По температурным зависимостям теплоемкости и дилатометрическим кривым наблюдается также переход $\beta_1'' \rightarrow \beta_1'$, но, согласно зависимостям $\sigma(T)$ (рис. 1), такой переход не обнаруживается, что обусловлено близкими значениями намагниченностей фаз β_1'' и β_1' . (Фаза β_1'' — высокотемпературная фаза, β_1' — мартенсит охлаждения, β_1'' и β_1''' — мартенситные фазы, которые возникают при сжатии).

Температурная зависимость намагниченности в поле $H = 0.82$ kOe представлена кривой 3 (рис. 1). Эта зависимость понадобится нам в дальнейшем при обсуждении магнетокалорического эффекта в Ni_2MnGa , изученного также в поле $H = 0.82$ kOe.

Как известно, при адиабатическом намагничивании изменяется температура магнетика. Максимальная величина ΔT наблюдается при $T = T_c$ (T_c — температура Кюри), где намагничивание происходит в основном за счет парапроцесса. Значительно меньшее значение ΔT можно наблюдать при $T \lesssim T_c$, где проявляется вклад, связанный с изменением намагниченности за счет процессов вращения в кристаллах с магнитной анизотропией [7].

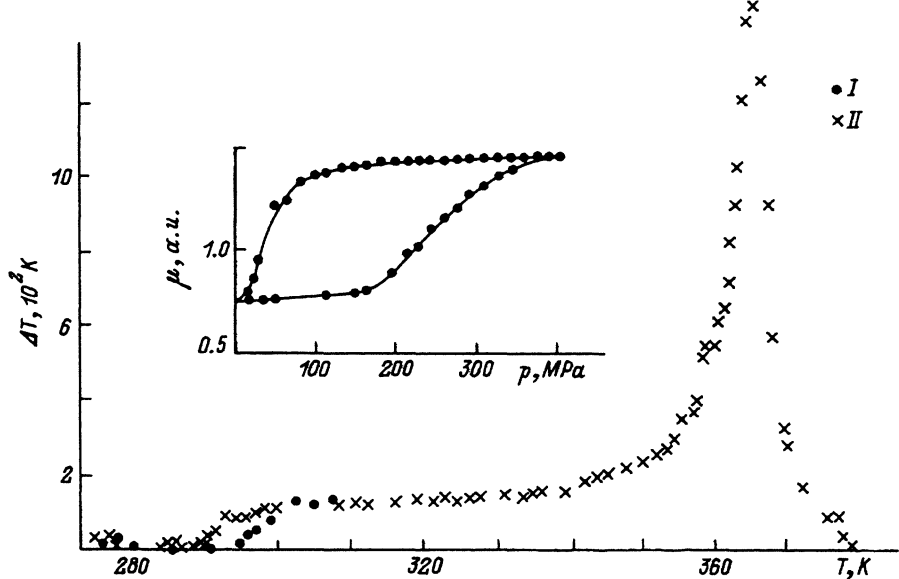


Рис. 2. Температурная зависимость ΔT за счет магнетокалорического эффекта для Ni_2MnGa . I — нагрев, II — охлаждение. На вставке — зависимость низкополевой магнитной проницаемости мартенситной β_1'' фазы в Ni_2MnGa от давления при сжатии в разгрузке вдоль направления [110] ($T = 287$ К).

На рис. 2 можно видеть зависимость $\Delta T(T)$ для монокристаллического образца Ni_2MnGa с $T_c = 365.5$ К. В температурном интервале между T_c и M_s величина $\Delta T \approx 10^{-2}$ К, что на порядок меньше, чем при $T = T_c$. В районе $T = M_s$ происходит уменьшение ΔT до практически нулевого уровня.

В соответствии с кривыми 3–5 (рис. 1) в поле $H = 0.82$ кОе образец не достигает насыщения. Для аустенитной фазы с соответствием с рис. 2 можно говорить о том, что в указанном поле намагничивание в основном осуществляется за счет процессов вращения.

При нагреве подъем ΔT до уровня высокотемпературной фазы происходит при $T = A_f > M_s$, то есть наблюдается гистерезис, что характерно для фазового перехода первого рода, которым является мартенситное превращение. Наблюдаемая зависимость $\Delta T(T)$ для полей, недостаточных для магнитного насыщения, по-видимому, является типичной для мартенситных превращений, так как мартенситная фаза содержит повышенную плотность дефектов кристаллического строения (дислокации, границы двойников), которые затрудняют перемещение границ магнитных доменов. В результате процесс вымагничивания за счет смещения доменных границ завершается в полях, значительно больше тех, которые достаточны для образования монодоменного состояния высокотемпературной фазы.

Согласно рис. 1 (кривая 2), образовавшаяся при сжатии фаза (β_1'''), которая сохраняется и после разгрузки, в процессе нагрева при $T = 220$ К спонтанно превращается в фазу с намагниченностью мартенсита охлаждения. Представляет интерес рассмотреть вопрос о воз-

возможности индуцирования сжатием β_1''' -фазы при $T > 220$ К. На вставке на рис. 2 помещена зависимость магнитной проницаемости от давления при $T = 287$ К. Можно видеть, что существует значение p_1 , при достижении которого μ образца заметно возрастает. При разгрузке существует давление $p_2 < p_1$, начиная с которого μ возвращается к исходному уровню. Давлению p_1 соответствует появление участков β_1''' -фазы в пределах фазы β_1' , а при $p = p_2$ начинается обратное превращение $\beta_1''' \rightarrow \beta_1'(\beta_1'')$. Следует отметить, что фазы β_1' и β_1'' имеют близкие значения μ [2] и в данных экспериментах они трудно различимы.

Представленная зависимость на врезке рис. 2 показывает возможность реализации под давлением межмартенситного $\beta_1'(\beta_1'') \rightarrow \beta_1'''$ перехода при температуре, когда β_1''' фаза не может существовать при $p = 0$. Учитывая, что при сжатии в процессе $\beta_1'(\beta_1'') \rightarrow \beta_1'''$ перехода происходит сокращение длины образца [1], а при разгрузке — восстановление первоначальной длины, то можно говорить, что в данном случае наблюдается явление «сверхупругости». Традиционно сверхупругость связывается с реализацией перехода мартенсит–аустенит при $T > A_f$. В данном случае это явление может быть зафиксировано при $T < M_s$ за счет межмартенситного фазового перехода.

Таким образом, структурные превращения в соединении Ni_2MnGa сопровождаются изменениями магнитных свойств, которые обусловлены появлением новых кристаллических структур.

Список литературы

- [1] Кокорин В.В., Мартынов В.А., Черненко В.А. ФТТ **33**, 4, 1250 (1991).
- [2] Васильев А.Н., Кайпер А., Кокорин В.В., Черненко В.А., Такаги Т., Тани Дж. Письма в ЖЭТФ **58**, 4, 297 (1993).
- [3] Васильев А.Н., Кокорин В.В., Савченко Ю.И., Черненко В.А. ЖЭТФ **98**, 4(10), 1437 (1990).
- [4] Fritsch G., Kokorin V.V., Kempf A. J. Phys: Cond. Mat. **6**, L107 (1994).
- [5] Лагутин А.С., Ожогин В.И. Сильные импульсные магнитные поля в физическом эксперименте. М. (1988). 192 с.
- [6] Кокорин В.В., Осипенко И.А., Миньков А.В. ФММ **57**, 1, 197 (1984).
- [7] Вонсовский С.В. Магнетизм. М. (1971). 1032 с.