

ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ В Ni_2MnGa ПРИ СЖАТИИ

В. В. Кокорин, В. В. Мартынов, В. А. Черненко

Обнаружена последовательность фазовых переходов, реализующихся при одноосном сжатии монокристаллов Ni_2MnGa вдоль направления $\langle 110 \rangle$.

Соединение Ni_2MnGa относится к группе так называемых сплавов Гейслера. При охлаждении в нем сначала устанавливается ферромагнитный порядок, а затем происходит структурный фазовый переход высокотемпературной β_1 фазы с кубической симметрией ($a=5.824 \text{ \AA}$) в β'_1 фазу с решеткой тетрагональной симметрии [1], при этом исходная ячейка приобретает размеры ($a=b=5.90 \text{ \AA}$, $c=5.54 \text{ \AA}$). Деформации решетки вдоль осей a , b и c составляют $\epsilon_1=\epsilon_2=0.013$, $\epsilon_3=-0.049$ соответственно. Структура низкотемпературной фазы представляет собой кристаллическую решетку, модулированную статической волной смещений [2]. Волновой вектор этой волны параллелен одному из двух направлений $[110]$, $[\bar{1}\bar{1}0]$, вектор поляризации e перпендикулярен k и совпадает с направлением типа $\langle 110 \rangle$, $|k|=2\pi/5d_{220}$, где d_{220} — расстояние между соседними плоскостями типа $\{220\}$, т. е. в низкотемпературной (пятыслоной) фазе плоскости $\{110\}$ смещены из регулярных положений в направлении типа $\langle 110 \rangle$. Электронно-микроскопическое исследование [2] показало, что и решетка высокотемпературной фазы неустойчива относительно сдвигов плоскостей $\{110\}$ вдоль направлений типа $\langle 110 \rangle$. В этом случае можно ожидать, что будут существовать значения таких сдвиговых деформаций, которые соответствуют новым метастабильным состояниям, т. е. возможны фазы с кристаллической решеткой, отличающейся от мартенситной фазы, возникающей при охлаждении. Существование такой модуляции говорит о возможности плоскостям типа $\{110\}$ занимать различные позиции относительно друг друга. Поиск новых фаз и является целью настоящей работы. Основным методом достижения этой цели было выбрано изучение структуры соединения Ni_2MnGa , подвергнутого воздействию сдвиговых механических напряжений. Величина этих напряжений определялась сжимающим усилием при одноосном нагружении.

Исследование проводили на монокристаллических образцах сплава Ni_2MnGa , которые имели температуру структурного перехода при охлаждении 278 К. Характерные графики деформации $\sigma(\epsilon)$ для различных температур нагружения приведены на рис. 1, а, б. Ось сжатия совпадала с направлением $\langle 110 \rangle$.

Если температура деформирования соответствует интервалу стабильности высокотемпературной фазы, то зависимость деформации ϵ от приложенного напряжения σ описывается кривыми рис. 1, а.

Как в процессе нагружения, так и разгрузки на кривых обнаруживаются участки с меньшим наклоном. При достижении значения σ , соответствующего такому участку, начинается структурное превращение, что подтверждалось рентгенографированием сжатых образцов.

Первой фазе, возникающей в процессе нагружения, соответствует орторомбическая кристаллическая решетка (β''_1) с параметрами $a=6.12 \text{ \AA}$,

$a=5.78 \text{ \AA}$, $c=5.54 \text{ \AA}$. Деформации решетки при $\beta_1 \rightarrow \beta_1''$ превращении — $\epsilon_1=0.051$, $\epsilon_2=-0.007$, $\epsilon_3=-0.049$. Эта новая решетка модулирована поперечной статической волной смещений с $|k|=2\pi/7 d_{220}$ (семислойная фаза). Направления k и e совпадают с направлениями волнового вектора и вектора поляризации фазы с пятислойной модуляцией, образующейся при охлаждении. Наличие семислойной модуляции подтверждается появлением на рентгенограммах соответствующей системы дополнительных отражений. Дальнейшее увеличение приложенного напряжения инициирует второй фазовый переход (рис. 1, а), приводящий к образованию β_1'' фазы, которая обладает решеткой с тетрагональной симметрией $a=6.44 \text{ \AA}$, $b=5.52 \text{ \AA}$, $c=5.52 \text{ \AA}$, дополнительных отражений, свидетельствующих о наличии модуляции волнами смещений, не обнаружено. Деформация решетки при $\beta_1'' \rightarrow \beta_1'$ фазовом переходе: $\epsilon_1=0.053$, $\epsilon_2=-0.045$, $\epsilon_3=0.004$.

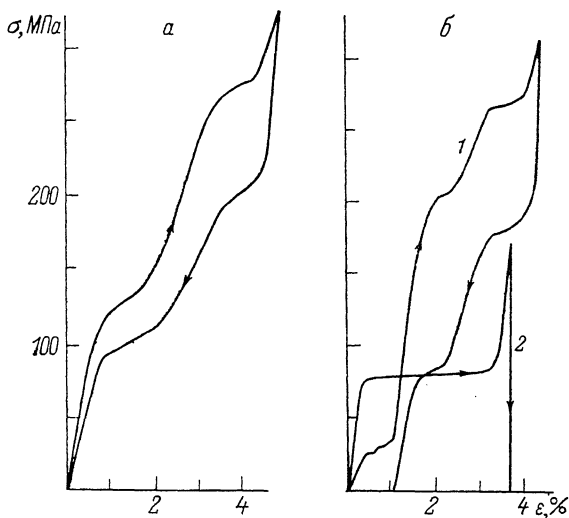


Рис. 1. Диаграммы деформирования при постоянных температурах в процессе сжатия монокристалла Ni_2MnGa вдоль направления параллельного оси $[011]$.

а — 290 К; б — 280 К — (1) и 77 К — (2).

При разгрузке наблюдается обратная последовательность фазовых переходов и после достижения $\sigma=0$ восстанавливается исходная высокотемпературная фаза.

На рис. 1, б (кривая 1) помещена диаграмма деформации при $T=280 \text{ K}$. В этом случае при нагружении вначале образуется фаза, совпадающая по структуре со структурой фазы охлаждения ненагруженных образцов. При температуре ниже 278 К сжатию подвергается тетрагональная пяти-слойная фаза (β_1'), формирующаяся в результате охлаждения. Образующаяся в ходе нагружения β_1'' фаза сохраняется и после разгрузки при деформации ниже 242 К, а после деформации при 77 К сохраняется и β_1' фаза (рис. 1, б, кривая 2).

Для определения температурных интервалов стабильности фаз, индуцированных сжатием, был проделан следующий опыт. Монокристаллический образец, ось которого совпадала с направлением $\langle 011 \rangle$ решетки исходной высокотемпературной фазы, после охлаждения до $T=77 \text{ K}$ был сжат ($\sigma \approx 25 \text{ кг/мм}^2$). После этого без отогрева он был помещен в дилатометр и в нем нагрет до комнатной температуры. Изменение длины этого образца при нагреве показано на рис. 2, кривая 1. Удлинение образца при нагреве происходит неравномерно. Каждому горизонтальному участку на кривой 1 рис. 2 отвечает область существования одной из фаз. Фазовые переходы происходят при температурах, которым соответствуют верти-

кальные участки (рис. 2). В процессе нагрева полностью восстанавливаются исходные (перед сжатием) размеры образца.

При ориентации оси сжатия вдоль [001] восстановление исходной длины после деформации при 77 К происходит при одном значении температуры, соответствующем переходу $\beta'_1 \rightarrow \beta_1$ (рис. 2, кривая 2). (В сжатом при $T \approx 293$ К (ось сжатия [001]) состоянии наблюдалась только одна β'_1 -фаза, что определено с помощью рентгеновской съемки [2]).

Отмеченная ориентационная зависимость фазового состава после сжатия может быть объяснена исходя из следующих соображений. Работа, затраченная на деформацию образца за счет фазовых переходов, должна быть положительной величиной ($A > 0$). Поэтому, учитывая, что в координатных осях, совпадающих с направлениями $\langle 100 \rangle$ кристаллической решетки исходной фазы, при ориентации оси сжатия вдоль направления

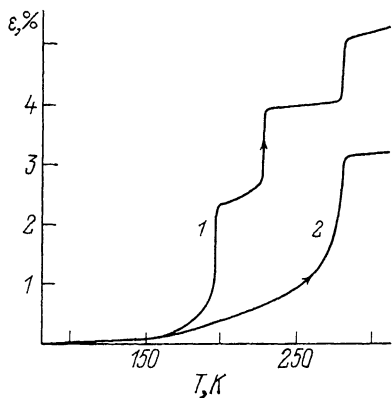


Рис. 2. Изменение длины образца в процессе нагрева.

Предварительно монокристалл был сжат при $T = 77$ К вдоль [011] — (1) и [001] — (2).

[011] работа может быть записана в виде $A = 1/2 \sigma (\epsilon_2 + \epsilon_3)$, где $\sigma < 0$ — величина внешнего сжимающего напряжения. Фазовые переходы, индуцированные сжатием, могут происходить только в случае, когда $\epsilon_2 + \epsilon_3 < 0$. Легко убедиться, что такое условие выполняется в последовательности переходов $\beta_1 \rightarrow \beta'_1 \rightarrow \beta''_1 \rightarrow \beta'''_1$.

При ориентации оси сжатия вдоль направления [001] работа, затраченная на образование новой фазы $A = \sigma \epsilon$, где ϵ — относительное изменение параметра решетки вдоль оси сжатия. Можно видеть, что $A > 0$ только для перехода $\beta_1 \rightarrow \beta'_1$. Переходы из β'_1 при сохранении ориентации оси сжатия вдоль [001] не сопровождаются заметным уменьшением параметров решетки вдоль оси сжатия.

Таким образом, соединение Ni_2MnGa при сжатии испытывает ряд фазовых структурных переходов. Фазы β'_1 и β''_1 реализуются только под нагрузкой. Индуцированные сжатием фазы стабильны при атмосферном давлении в своих интервалах температур.

Список литературы

- [1] Webster P. J., Ziebeck K. R. A., Town S. L., Peak M. S. Magnetic order and phase transformation in Ni_2MnGa . *Phil. Mag.* В. 1984. 49. N 3. P. 295—310.
- [2] Витенко И. Н., Кокорин В. В., Мартынов В. В., Черненко В. А. Мартенситные превращения в сплаве Гейслера — Ni_2MnGa // Препринт ИМФ 35.89. Киев, 1989. 22 с.

Институт металлофизики
Киев

Поступило в Редакцию
17 июля 1990 г.
В окончательной редакции
14 ноября 1990 г.