

ВЛИЯНИЕ МАГНИТОУПРУГОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НА СТРУКТУРНЫЕ ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ В КУБИЧЕСКИХ ФЕРРОМАГНЕТИКАХ

В. Д. Бучельников^{}, А. Н. Васильев^b, А. Т. Заяк^{ac}, П. Энтель^{c**}*

^a *Челябинский государственный университет
454021, Челябинск, Россия*

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

^c *Theoretical Low-Temperature Physics Gerhard-Mercator University
47048, Duisburg, Germany*

Поступила в редакцию 7 декабря 2000 г.

В рамках теории фазовых переходов Ландау проведен анализ влияния магнитоупругого взаимодействия на структурные превращения в кубических ферромагнетиках с положительной первой константой магнитной анизотропии. Показано, что в этом случае структурные переходы не сопровождаются переориентацией намагниченности. Фазовые диаграммы таких ферромагнетиков содержат либо точку окончания структурного перехода, либо критическую точку, в которой переход первого рода сменяется переходом второго рода. Магнитоупругое взаимодействие приводит также к появлению интервала параметров ферромагнетика, в котором существует связанный структурно-магнитный переход первого рода. Рассчитанная фазовая T - x -диаграмма сплавов Гейслера $\text{Ni}_{2+x}\text{Mn}_{1-x}\text{Ga}$ хорошо согласуется с экспериментальной фазовой диаграммой данных сплавов.

PACS: 75.10.-b, 75.50.-y

Магнитоупругое взаимодействие в ферромагнетиках позволяет инициировать в них структурные превращения с помощью магнитного поля. Особый интерес в этом плане представляют мартенситные превращения в ферромагнетиках, обладающих эффектами памяти формы и гигантской магнитострикции. Такими ферромагнетиками являются, например, сплавы Гейслера $\text{Ni}_{2+x}\text{Mn}_{1-x}\text{Ga}$, в которых с понижением температуры происходит переход из кубической в тетрагональную фазу [1–3]. Исследование влияния магнитострикции на структурные переходы в кубических ферромагнетиках с отрицательной первой константой магнитной анизотропии, когда намагниченность в исходной фазе направлена вдоль оси [111], проведено в [4, 5]. В этой ситуации структурные фазовые переходы сопровождаются появлением угловых магнитных фаз и переориентации

ей намагниченности. Из полученных недавно экспериментальных данных [6] следует, что в Ni_2MnGa стехиометрического состава первая константа анизотропии положительна, т. е. в исходной фазе намагниченность направлена вдоль оси [100]. В настоящей работе исследованы фазовые диаграммы для этого случая.

Для построения фазовых диаграмм кубического ферромагнетика выпишем выражение для свободной энергии, в котором учитываются лишь компоненты параметров порядка, ответственные за структурный и магнитный переходы, и которое обычно используется в рамках теории Ландау [3–5, 7]:

$$F = \frac{1}{2}a(e_2^2 + e_3^2) + \frac{1}{3}be_3(e_3 - 3e_2^2) + \frac{1}{4}c(e_2^2 + e_3^2)^2 + \\ + B \left[\frac{1}{\sqrt{2}}e_2(m_x^2 - m_y^2) + \frac{1}{\sqrt{6}}e_3(3m_z^2 - \mathbf{m}^2) \right] + \\ + K(m_x^2 m_y^2 + m_y^2 m_z^2 + m_z^2 m_x^2) + \frac{1}{2}\alpha \mathbf{m}^2 + \frac{1}{4}\delta \mathbf{m}^4. \quad (1)$$

^{*}E-mail: buche@cgu.chel.su

^{**}P. Entel, e-mail: entel@thp.uni-duisburg.de

Здесь e_i — линейные комбинации компонент тензора деформаций, $e_2 = (e_{xx} - e_{yy})/\sqrt{2}$, $e_3 = (2e_{zz} - e_{yy} - e_{xx})/\sqrt{6}$, a, b, c — линейные комбинации модулей упругости второго, третьего и четвертого порядков:

$$a = c_{11} - c_{12}, \quad b = (c_{111} - 3c_{112} + 2c_{123}),$$

$$c = (c_{1111} + 6c_{1112} - 3c_{1112} - 8c_{1123}),$$

$\mathbf{m} = \mathbf{M}/M_0$ — безразмерный вектор намагниченности, M_0 — намагниченность насыщения, B — постоянная магнитострикции, K — первая константа кубической анизотропии, α и δ — обменные постоянные. Вблизи точки Кюри $T = T_C$ обменную постоянную запишем в виде

$$\alpha = \alpha_0(T - T_C)/T_C.$$

Вблизи точки структурного фазового перехода $T = T_M$ обобщенный упругий модуль второго порядка можно записать в виде

$$a = a_0(T - T_M)/T_M.$$

В сплавах $\text{Ni}_{2+x}\text{Mn}_{1-x}\text{Ga}$ температуры структурного и магнитного фазовых переходов существенно зависят от состава. В связи с этим представляет интерес исследование фазовых диаграмм как при $T_M < T_C$ (составы, близкие к стехиометрии), так и при $T_M \sim T_C$ (составы с $x = 0.16-0.20$). Для определенности будем полагать в дальнейшем, что константа магнитострикции $B > 0$ и модуль упругости четвертого порядка $c > 0$.

Рассмотрим вначале случай, когда $T_M < T_C$, т. е. структурный переход происходит в ферромагнитной матрице. При этом в формуле (1) можно положить $\mathbf{m}^2 = 1$ и перейти от декартовых компонент намагниченности m_x, m_y, m_z к полярному θ и азимутальному φ углам этого вектора. Минимизация свободной энергии по $e_2, e_3, \theta, \varphi$ приводит к следующим равновесным состояниям.

1. Кубическая C и тетрагональная T фазы с намагниченностями вдоль оси $[001]$ и с деформациями, определяемыми из уравнений

$$e_2 = 0, \quad ae_3 + be_2^2 + ce_3^3 + \frac{\sqrt{6}}{9}B = 0, \quad (2)$$

устойчивы при $b \leq 0$ в области, ограниченной неравенством

$$a \geq \frac{\sqrt{6}}{6} \frac{Bc}{b} + \frac{2}{3} \sqrt{-bB\sqrt{6}}. \quad (3)$$

При $b \geq 0$ области существования этих фаз разделяются ветвями дискриминантной кривой

$$a^3 - \frac{b^2}{4c}a^2 - \frac{3\sqrt{6}}{2}abB + \frac{9}{2}cB^2 + \frac{\sqrt{6}}{3} \frac{b^3}{c}B = 0 \quad (4)$$

кубического уравнения (2). Внутри области, ограниченной ветвями дискриминантной кривой (4), одновременно устойчивы обе фазы.

2. Ромбическая фаза R с намагниченностью вдоль оси $[001]$ ($\theta = 0$) и с деформациями, определяемыми из уравнений

$$4cbe_3^2 - 2b^2e_3 + ab + \frac{\sqrt{6}}{3}Bc = 0, \quad (5)$$

$$e_2 = \pm \sqrt{-e_3^2 - \frac{a}{c} + e_3 \frac{2b}{c}},$$

устойчива при

$$a \leq \frac{b^2}{4c} - \frac{\sqrt{6}}{3} \frac{Bc}{b}, \quad b < - \left(\frac{16\sqrt{6}Bc^2}{9} \right)^{1/3}, \quad (6a)$$

и

$$a \leq \frac{\sqrt{6}}{9} \frac{Bc}{b} + \frac{2}{3} \sqrt{-\sqrt{6}bB}, \quad (6b)$$

$$- \left(\frac{16\sqrt{6}Bc^2}{9} \right)^{1/3} < b \leq 0.$$

Из соображений симметрии следует, что кроме рассмотренных состояний в ферромагнетике могут реализовываться также аналогичные фазы с намагниченностями вдоль осей $[100]$ и $[010]$.

Анализ искажений исходной кубической решетки в фазах C и T показывает, что эти фазы имеют одинаковую тетрагональную симметрию и различаются лишь величиной спонтанных деформаций. В фазе C эти деформации определяются искажениями кубической решетки за счет магнитострикции, а в фазе T — структурными искажениями при переходе в мартенситное состояние. Линии фазовых переходов между состояниями C, T и R определяются из условия равенства энергий фаз.

Фазовая диаграмма кубического ферромагнетика в координатах a, b при $T_M < T_C$ приведена на рис. 1. В зависимости от величин модулей упругости второго (a) и третьего (b) порядков в ферромагнетике возможна реализация следующих структурных превращений. При $b > 0$ на линии AE , определяемой уравнением

$$a = \frac{2}{9} \frac{b^2}{c} + \frac{\sqrt{6}Bc}{b}, \quad (7)$$

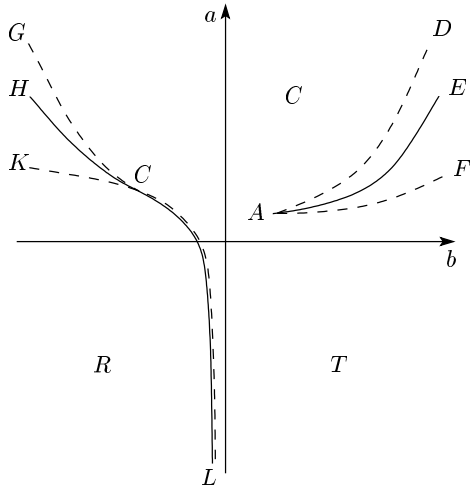


Рис. 1. Фазовая диаграмма кубического ферромагнетика при $T_M < T_C$ в координатах a, b (C — кубическая фаза с малыми тетрагональными искажениями, T — тетрагональная фаза, R — ромбическая фаза). Намагниченность во всех фазах направлена вдоль оси $[001]$. Сплошные линии — линии фазовых переходов, штриховые — линии потери устойчивости фаз

происходит фазовый переход первого рода из фазы C в фазу T . Этот переход сопровождается скачком деформаций e_3 и является мартенситным превращением. С точки зрения симметрии он является изоструктурным переходом и имеет точку окончания A с координатами $(18cB^2)^{1/3}, (9\sqrt{6}Bc^2)^{1/3}$. Левее точки A переход из фазы C в фазу T происходит плавно, не сопровождаясь скачком деформаций e_3 . При $b \leq 0$ на линии CH происходит мартенситное превращение (структурный фазовый переход первого рода) из кубической фазы C в ромбическую фазу R , сопровождаемое скачком деформаций e_2 и e_3 . На линии CL происходит структурный фазовый переход второго рода между этими фазами. Выражение для линии фазового перехода первого рода (CH) может быть найдено из условия равенства энергий фаз C и R . Уравнение линии фазового перехода второго рода (CL) определяется знаком равенства в формуле (3). Критическая точка окончания фазового перехода первого рода (C) имеет координаты $(\sqrt{6}/3 - 1/2)(B^2c)^{1/3}, -(16\sqrt{6}Bc^2/9)^{1/3}$. Координаты точек A и C определяются величиной магнито-стрикции B . При $B = 0$ фазовая диаграмма совпадает с диаграммой немагнитного кубического кристалла [8].

Рассмотрим теперь фазовую диаграмму кубического ферромагнетика для случая, когда темпе-

ратуры мартенситного T_M и магнитного T_C переходов становятся сравнимыми. В этой ситуации для нахождения равновесных состояний кубического ферромагнетика свободную энергию (1) следует минимизировать по отношению к переменным m_x, m_y, m_z, e_2 и e_3 . Для определенности будем полагать, что $b > 0$, а знаки остальных постоянных остаются такими же, как и в случае $T_M < T_C$.

Минимизации выражения (1) приводит к следующим равновесным состояниям ферромагнетика.

1. Кубическая парамагнитная фаза (PC),

$$m_x = m_y = m_z = 0, \quad e_2 = e_3 = 0, \quad (8)$$

устойчива при $\alpha \geq 0, a \geq 0$.

2. Тетрагональная парамагнитная фаза (PT),

$$m_x = m_y = m_z = 0, \quad e_2 = 0, \quad e_3 = -\frac{b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2c}, \quad (9)$$

устойчива при

$$\alpha \geq \frac{\sqrt{6}Bb}{3c}, \quad a \leq \frac{b^2}{4c}, \quad a \geq \frac{b^2}{4c} - \left(\frac{\sqrt{6}}{4} \frac{\alpha}{B} \sqrt{c} - \frac{b}{2\sqrt{c}} \right)^2. \quad (10)$$

3. Кубическая ферромагнитная (FC) и тетрагональная ферромагнитная (FT) фазы с намагниченностью вдоль $[001]$,

$$m_x = m_y = 0, \quad m_z^2 = -\frac{1}{\delta} \left(\alpha + \frac{2\sqrt{6}}{3} B e_3 \right), \quad (11)$$

и с деформациями, определяемыми из уравнений

$$e_2 = 0, \quad a e_3 + b e_3^2 + c e_3^3 + \sqrt{6} B m_z^2 / 3 = 0. \quad (12)$$

Фаза FC устойчива при

$$\alpha \leq 0, \quad \alpha \geq \frac{\sqrt{6}b}{54Bc^2} (2\delta b^2 + 12cB^2 - 9\delta ac) - \frac{\sqrt{6}}{27Bc^2} (\delta b^2 + 4cB^2 - 3\delta ac)^{3/2}, \quad (13)$$

а фаза FT устойчива при

$$\alpha \leq \frac{\sqrt{6}b}{54Bc^2} (2\delta b^2 + 12cB^2 - 9\delta ac) + \frac{\sqrt{6}}{27Bc^2} (\delta b^2 + 4cB^2 - 3\delta ac)^{3/2}, \quad (14)$$

$$a \leq \frac{b^2}{4c} - \left(\frac{\sqrt{6}}{4} \frac{\alpha \sqrt{c}}{B} - \frac{b}{2\sqrt{c}} \right)^2 \quad (\alpha \geq 0).$$

Область устойчивости фаз FC и FT ограничена также неравенствами

$$\begin{aligned} \alpha &\geq -\delta, \\ a &\geq -\frac{3c(\alpha + \delta)^2}{8B^2} + \frac{\sqrt{6}b(\alpha + \delta)}{4B} + \frac{4B^2}{3(\alpha + \delta)}, \end{aligned} \quad (15)$$

которые следуют из условия $m_z^2 \leq 1$.

Из соображений симметрии следует, что кроме данных состояний в кристалле могут реализовываться и другие равновесные фазы, энергии и области устойчивости которых совпадают с приведенными выше. Этими фазами являются тетрагональные парамагнитные фазы с деформациями вдоль осей $[100]$ и $[010]$, ферромагнитные кубические фазы с намагниченностями вдоль осей $[100]$ и $[010]$, а также тетрагональные фазы с деформациями и намагниченностью вдоль осей $[100]$ и $[010]$.

Так же как и в случае $T_M < T_C$, анализ искажений кубической решетки в фазах FC и FT , определяемых уравнениями (12), показывает, что с точки зрения симметрии фазы FC и FT имеют одинаковую тетрагональную симметрию. Данные фазы различаются величиной спонтанных деформаций e_3 . В фазе FC они в основном определяются магнито-стрикцией, а в фазе FT — структурными искажениями, которые возникают при переходе в мартенситное состояние.

Фазовая диаграмма кубического кристалла для случая $T_M \sim T_C$ в координатах a, α представлена на рис. 2. Из парамагнитной кубической фазы PC возможны следующие фазовые переходы. На линии BK , определяемой уравнением $a = b^2/4c$, имеет место структурный фазовый переход первого рода в тетрагональную парамагнитную фазу PT с большими искажениями решетки (мартенситное превращение). Вдоль линии DM ($\alpha = 0$) происходит магнитный фазовый переход второго рода в ферромагнитную кубическую фазу FC с малыми тетрагональными искажениями решетки. На линии DB имеет место связанный структурно-магнитный фазовый переход первого рода в ферромагнитную тетрагональную фазу FT с большими тетрагональными искажениями решетки. Уравнение этой линии следует из условия равенства энергий фаз PC и FT . Из парамагнитной тетрагональной фазы PT кроме указанного выше перехода $PT \rightarrow PC$ на линии BK может происходить изоструктурный магнитный фазовый переход второго рода в ферромагнитную тетрагональную фазу FT вдоль линии BH . Уравнение этой линии следует из второго условия устойчивости фазы FT в (14) при замене знака неравенства

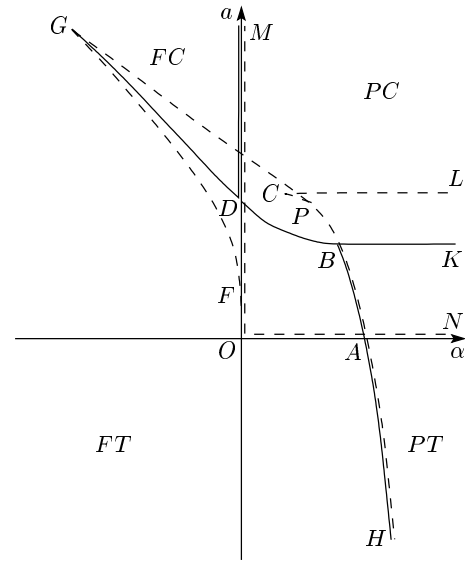


Рис. 2. Фазовая диаграмма кубического ферромагнетика при $T_M \sim T_C$ в координатах a, α (PC — парамагнитная кубическая фаза, PT — парамагнитная тетрагональная фаза, FC — ферромагнитная кубическая фаза с малыми тетрагональными искажениями, FT — ферромагнитная тетрагональная фаза). Намагниченность в фазах FC и FT направлена вдоль оси $[001]$. Сплошные линии — линии фазовых переходов, штриховые — линии потери устойчивости фаз

на знак равенства. Между ферромагнитными фазами FC и FT может происходить изоструктурный фазовый переход первого рода на линии GD . Уравнение этой линии имеет вид

$$a = \frac{2}{9} \frac{b^2}{c} + \frac{4}{3} \frac{B^2}{\delta} - \frac{\sqrt{6} B c \alpha}{6\delta}. \quad (16)$$

Данный переход сопровождается скачком деформаций e_3 и относится к мартенситному превращению. На диаграмме a - α он может иметь точку окончания G . Такая ситуация имеет место в случае, когда точка G находится правее линии устойчивости фаз FC и FT в (15) (для простоты эта линия не показана на фазовой диаграмме). Анализ неравенств (15) и уравнения (16) совместно с условиями (13) и (14) устойчивости фаз FC и FT показывает, что точка окончания фазового перехода $FT \rightarrow FC$ будет существовать лишь при больших значениях магнитоупругой постоянной $B \sim b^3/c^2$. В этом случае переход между фазами FT и FC левее точки G будет происходить плавно без скачка деформаций e_3 .

Область абсолютной устойчивости фазы PC ограничена линиями OM и ON . Для фазы PT эта

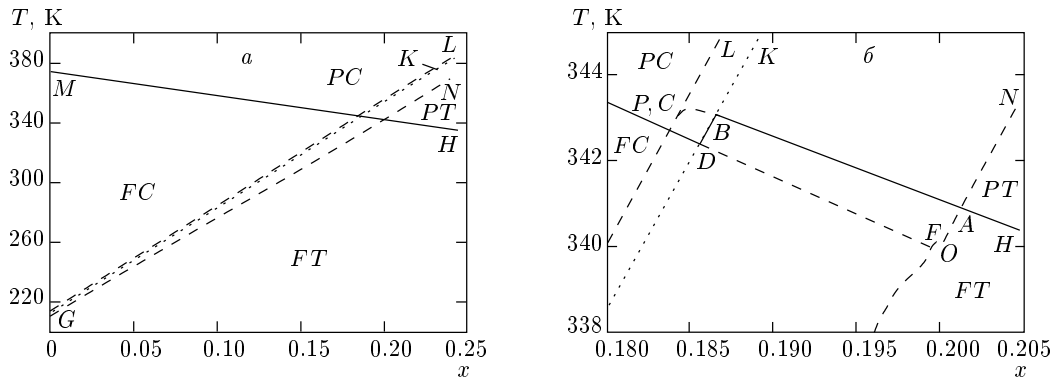


Рис. 3. Теоретическая фазовая T - x -диаграмма кубических ферромагнитных сплавов Гейслера $\text{Ni}_{2+x}\text{Mn}_{1-x}\text{Ga}$ при $0 \leq x \leq 0.25$ (а) и в области пересечения температур T_C и T_M в увеличенном масштабе (б). Сплошная линия — линия магнитного фазового перехода, точки — линия структурного перехода, штрихи — линии потери устойчивости фаз. Остальные обозначения совпадают с обозначениями рис. 2

область ограничена линиями LC и CH . Фаза FT абсолютно устойчива в области левее линии GFH , а фаза FC — выше линии GFM . Точки D и B являются критическими. В них линии фазовых переходов второго рода расщепляются на две линии фазовых переходов первого рода. Координаты этих точек следующие:

$$D \left(\frac{2}{9} \frac{b^2}{c} + \frac{4}{3} \frac{B^2}{\delta}, 0 \right), \quad B \left(\frac{2}{9} \frac{b^2}{c}, \frac{4\sqrt{6}}{9} \frac{Bb}{c} \right).$$

В экспериментальных работах по исследованию фазовых превращений в сплавах $\text{Ni}_{2+x}\text{Mn}_{1-x}\text{Ga}$ обычно восстанавливается фазовая диаграмма в координатах температура–концентрация (T - x) [3, 5]. В связи с этим для сравнения полученных здесь теоретических результатов с имеющимися экспериментальными данными приведем теоретическую фазовую T - x -диаграмму кубического ферромагнетика.

Из экспериментальных данных [3, 5] следует, что в сплавах $\text{Ni}_{2+x}\text{Mn}_{1-x}\text{Ga}$ температуры Кюри T_C и мартенситного превращения T_M изменяются с концентрацией практически по линейному закону. Используем эти результаты для построения теоретической фазовой a - α -диаграммы (рис. 2) в координатах T - x . С этой целью запишем коэффициенты a и α в свободной энергии (1) в виде

$$a = a_0(T - T_M)/T_M, \quad \alpha = \alpha_0(T - T_C)/T_C, \quad (17)$$

где $T_M = T_{M0} + \sigma x$, $T_C = T_{C0} - \gamma x$, T_{M0} и T_{C0} — температуры мартенситного и магнитного переходов при $x = 0$, а σ и γ — коэффициенты пропорциональности. Величины T_{M0} , T_{C0} , σ и γ определяются из эксперимента.

Для расчета фазовой T - x -диаграммы используем следующие численные значения параметров, входящих в (1) и (17) [3, 5, 6]:

$$\begin{aligned} a_0 &= 10^{11} \text{ эрг/см}^3, & \alpha_0 &= -10^9 \text{ эрг/см}^3, \\ T_{M0} &= 202 \text{ К}, & T_{C0} &= 375 \text{ К}, & \sigma &= 700 \text{ К}, \\ \gamma &= 175 \text{ К}, & b &= 3 \cdot 10^{11} \text{ эрг/см}^3, & & (18) \\ c &= 3 \cdot 10^{12} \text{ эрг/см}^3, & B &= 1.5 \cdot 10^7 \text{ эрг/см}^3, \\ K &= 4 \cdot 10^4 \text{ эрг/см}^3, & \delta &= 10^9 \text{ эрг/см}^3. \end{aligned}$$

Численно построенная фазовая T - x -диаграмма сплавов $\text{Ni}_{2+x}\text{Mn}_{1-x}\text{Ga}$ с использованием (17), (18) показана на рис. 3. В силу малости величины магнитоупругой постоянной B область на рис. 3а, отвечающая пересечению температур T_M и T_C , в выбранном масштабе не разрешается. На рис. 3б эта область представлена в большем масштабе. Все обозначения на рис. 3 сохранены такими же, что и на рис. 2. Из рис. 3 следует, что при выбранных значениях параметров область DB , в которой существует связанный структурно-магнитный фазовый переход первого рода, заключается в очень малом интервале концентраций вблизи $x \approx 0.19$. Данный интервал очень сильно зависит от величины магнитоупругой постоянной B . При увеличении B интервал существования связанного структурно-магнитного фазового перехода также увеличивается. Приведенная на рис. 3 фазовая диаграмма хорошо согласуется с экспериментальной T - x -диаграммой [3, 5] (см. соответственно рис. 5 и 4 в данных работах).

Проведенный анализ влияния магнитоупругого взаимодействия на фазовые диаграммы кубического ферромагнетика позволяет сделать следующие выводы.

В отличие от случая отрицательной константы кубической анизотропии ($K < 0$) структурные фазовые переходы при положительной первой константе анизотропии ($K > 0$) не сопровождаются переориентацией намагниченности. Это объясняется тем, что магнитоупругое взаимодействие уже в кубической фазе, строго говоря, понижает симметрию этой фазы до тетрагональной. Симметрия низкотемпературной фазы оказывается либо тетрагональной ($b > 0$), либо ромбической ($b < 0$). Из-за того что высокотемпературная и низкотемпературная фазы содержат одинаковые элементы симметрии (например, оси второго или четвертого порядков), переориентация намагниченности в случае $K > 0$ при структурных переходах не происходит. В том случае, когда симметрии высокотемпературной и низкотемпературной фаз полностью совпадают ($b > 0$), линия структурного фазового перехода может иметь точку окончания. Правее этой точки структурный переход сопровождается скачком деформаций и гистерезисом и носит характер мартенситного превращения. Левее этой точки такой переход не происходит, деформации плавно изменяют свой характер от квазикубических до тетрагональных и гистерезис отсутствует. При $b < 0$ симметрии высокотемпературной и низкотемпературной фаз не совпадают. В этом случае при больших значениях $|b|$ структурный переход между фазами является переходом первого рода (мартенситное превращение), а при малых значениях $|b|$ — переходом второго рода. Таким образом, на фазовой диаграмме при $b < 0$ имеется критическая точка, в которой происходит смена типа перехода. Координаты точки окончания структурного перехода при $b > 0$ и критической точки при $b < 0$

определяются постоянной магнитострикции B . Магнитоупругое взаимодействие приводит к тому, что в определенном интервале параметров кубического ферромагнетика реализуются связанные структурно-магнитные фазовые переходы первого рода. Величина интервала на фазовой диаграмме, в котором происходят такие переходы, определяется величиной магнитоупругого взаимодействия. Рассчитанная теоретическая фазовая T - x -диаграмма сплавов Гейслера $\text{Ni}_{2+x}\text{Mn}_{1-x}\text{Ga}$ хорошо согласуется с экспериментальной фазовой диаграммой данных сплавов.

ЛИТЕРАТУРА

1. P. J. Webster, K. R. A. Ziebeck, S. L. Town, and M. S. Peak, *Phil. Mag.* В **49**, 295 (1984).
2. D. S. J. Murray, M. Marioni, S. M. Allen et al., *Appl. Phys. Lett.* **77**, 886 (2000).
3. A. N. Vasil'ev, A. D. Bozhko, V. V. Khovailo et al., *Phys. Rev. B* **59**, 1113 (1999).
4. V. D. Buchelnikov, V. S. Romanov, and A. T. Zayak, *J. Magn. Magn. Mat.* **191**, 203 (1999).
5. А. Д. Божко, А. Н. Васильев, В. В. Ховайло и др., *ЖЭТФ* **115**, 1740 (1999).
6. R. Tickle and R. D. James, *J. Magn. Magn. Mat.* **195**, 627 (1999).
7. M. A. Fradkin, *Phys. Rev. B* **50**, 16326 (1994).
8. Ю. А. Изюмов, В. Н. Сыромятников, *Фазовые переходы и симметрия кристаллов*, Наука, Москва (1984).