

НЕКОЛЛИНЕАРНАЯ МАГНИТНАЯ СТРУКТУРА В СОЕДИНЕНИИ $\text{Er}_2\text{Fe}_{17}$

А. С. Андреевко, С. А. Никитин, Ю. И. Спичкин

Проведено исследование намагниченности и динамической восприимчивости интерметаллического соединения $\text{Er}_2\text{Fe}_{17}$ в области температур 80—350 К при гидростатическом давлении до 10 кбар. Установлено, что под действием гидростатического давления происходит трансформация ферримангнитной коллинеарной структуры в неколлинеарную. Построена P — T фазовая диаграмма, определены критические поля разрушения неколлинеарной структуры. Расчет обменных взаимодействий с учетом разницы объемов элементарных ячеек соединений $\text{Er}_2\text{Fe}_{17}$ и Y_2Fe_{17} показал, что величина междошрешеточных Er — Fe обменных взаимодействий достигает 1/4 величины от обменных взаимодействий внутри железной подрешетки.

Известно, что интерметаллические соединения R_2Fe_{17} (R — тяжелые редкоземельные металлы Lu , Y , La) проявляют инвариные свойства, которые находят свое объяснение в сильной зависимости обменных интегралов от расстояния между ионами железа и конкуренцией ферро- и антиферромагнитных взаимодействий в подсистеме Fe [$1-6$]. В частности, в соединении $\text{Lu}_2\text{Fe}_{17}$ эти механизмы приводят к появлению неколлинеарных магнитных структур [3]. В предыдущих работах [$7, 8$] нами было обнаружено, что под влиянием гидростатического давления уменьшение объема элементарной ячейки также приводит к появлению неколлинеарной магнитной структуры в соединении Y_2Fe_{17} . Гидростатическое давление, изменяющее соотношение между ферро- и антиферромагнитными взаимодействиями, существенно влияло также на характер магнитных фазовых переходов в аморфном сплаве $\text{Y}_{10}\text{Fe}_{81}$ [9].

Следует отметить, что промежуточные объемы элементарных ячеек между $\text{Lu}_2\text{Fe}_{17}$ ($v_{\text{эл}} = 583.8 \text{ \AA}^3$) и Y_2Fe_{17} ($v_{\text{эл}} = 594.9 \text{ \AA}^3$) имеют соединения $\text{Tm}_2\text{Fe}_{17}$, $\text{Er}_2\text{Fe}_{17}$, $\text{Ho}_2\text{Fe}_{17}$ и $\text{Dy}_2\text{Fe}_{17}$. Логично предположить, что под влиянием давления в этих соединениях также может индуцироваться неколлинеарная магнитная структура в подрешетке железа. Однако существенным отличием этих соединений от Y_2Fe_{17} и $\text{Lu}_2\text{Fe}_{17}$ является существование двух магнитных подсистем — редкоземельной и железной, — связанных антиферромагнитным взаимодействием. Это взаимодействие безусловно оказывает влияние на магнитную подсистему железа, и одной из задач данной работы было изучение роли междошрешеточного обмена в соединении $\text{Er}_2\text{Fe}_{17}$. В работе также исследовали влияние гидростатического давления на магнитную структуру поликристаллического соединения $\text{Er}_2\text{Fe}_{17}$.

1. Методика эксперимента. Результаты

Измерения намагниченности проводились в магнитном поле до 14 кЭ в области температур 78—300 К при гидростатическом давлении до 10 кбар. Описание установки приведено в работе [10]. Динамическая магнитная восприимчивость измерялась в переменном магнитном поле до 3 Э при частоте 30 Гц в том же температурном интервале и тех же давлениях.

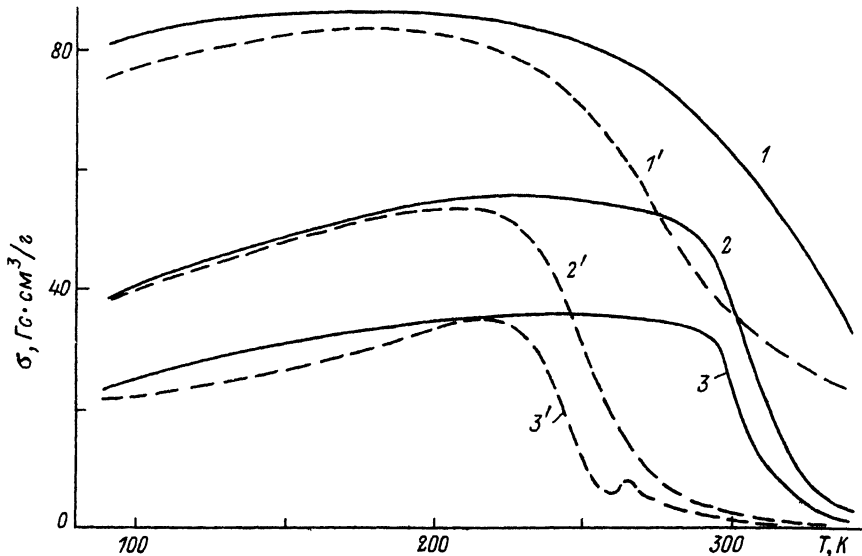


Рис. 1. Температурные зависимости удельной намагниченности $\sigma(T)$ соединения $\text{Er}_2\text{Fe}_{17}$ при атмосферном давлении (сплошные линии) и давлениях 10 кбар (штриховые линии) в поле 14 (1, 1'), 1 (2, 2') и 0.5 кЭ (3, 3').

Интерметаллическое соединение $\text{Er}_2\text{Fe}_{17}$ было получено методом электродуговой плавки на медном водоохлаждаемом поду с последующим гомогенизирующим отжигом. Содержание других фаз не превышало 1.5%.

На рис. 1 представлены температурные зависимости намагниченности $\sigma(T)$ соединения $\text{Er}_2\text{Fe}_{17}$ при атмосферном давлении и давлении 10 кбар. Ход кривых $\sigma(T)$ при атмосферном давлении близко совпадает с данными работы [11]. Температура Кюри, определенная по методу Белова—Горяги, при атмосферном давлении равнялась $\Theta = 316$ К. Под влиянием гидростатического давления температура Кюри смещалась в сторону более низких температур $\partial\Theta/\partial P = -5.4$ К/кбар, что также соответствует литературным данным [11–13].

Гидростатическое давление, кроме смещения температуры Кюри, приводит также к изменению характера кривых $\sigma(T)$. Из рис. 1 видно, что в малых полях на зависимостях $\sigma(T)$ в присутствии давления 10 кбар появляются особенности вблизи температуры 260 К (кривые 2', 3'). Аномальное поведение в этой области температур обнаружено также на зависимостях $\sigma(H)$ (рис. 2), измеренных в присутствии давления. Критические поля $H_{кр}$, при которых наблюдаются изломы на изотермах $\sigma(H)$, имеют зависимость от температуры (см. вставку к рис. 2). По полученным данным для $H_{кр}$ построена магнитная фазовая диаграмма на плоскости (H, T) .

Температурные зависимости динамической восприимчивости $\chi(T)$ в окрестности температуры Кюри при различных давлениях представлены на рис. 3. Резкое возрастание $\chi(T)$ при атмосферном давлении при понижении температуры связано с переходом соединения в магнитоупорядоченное состояние. По мере увеличения давления область резкого возрастания $\chi(T)$ смещается в сторону низких температур, а при давлениях $P > 2$ кбар на кривых появляются дополнительные аномалии (см. кривые 3–5; на кривой 2 аномалия менее выражена). При увеличении давления наблюдается общая тенденция смещения этой аномалии в сторону более низких температур.

Рис. 2. Изотермы намагниченности $\sigma(H)$ соединения $\text{Er}_2\text{Fe}_{17}$ при давлении 9.7 кбар. $T = 240$ (1), 255 (2), 274 К (3).

На вставке — фазовая $H-T$ диаграмма при 9.7 кбар. ПМ, ФМ и НМ — парамагнитная, ферромагнитная и неколлинеарная фазы соответственно.

На основании данных по изменению $\chi(T)$ при различных давлениях построена фазовая $T-P$ диаграмма (рис. 4). Ветвь 1—2—3 показывает смещение температуры Кюри, а участок 2—4 смещение аномалии на кривой $\chi(T)$ в результате приложения внешнего гидростатического давления.

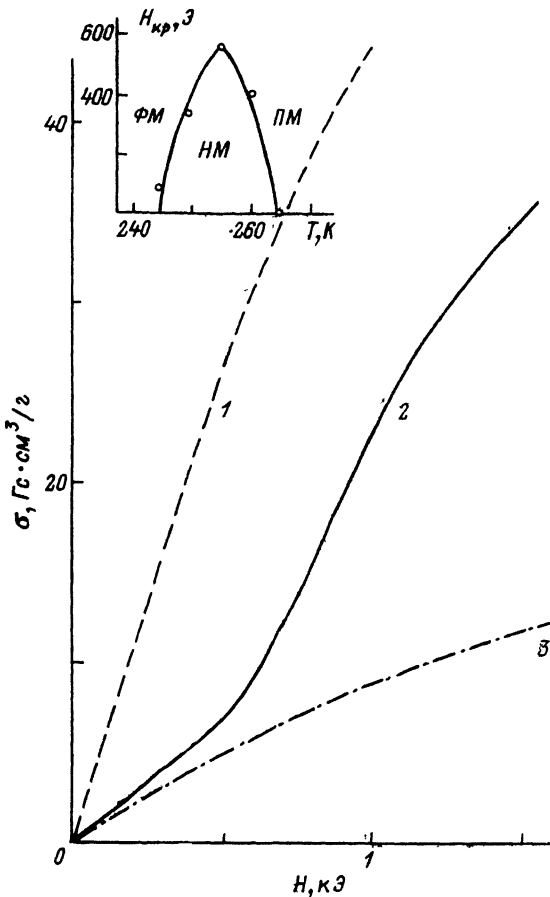
2. Обсуждение результатов

Кристаллическая структура соединений R_2Fe_{17} имеет гексагональную симметрию. Элементарная ячейка содержит 34 атома железа, которые занимают в решетке 4 неэквивалентные позиции (6g, 12j, 12k, 4f), а кратчайшие расстояния между этими атомами распределены в достаточно широком интервале (2.39—3.0 Å) [2]. Экспериментальные данные [11] указывают на то, что в соединениях Er-Fe намагниченности подрешеток эрбия и железа направлены антипараллельно друг другу. Магнитный момент, приходящийся на атом железа, в соединениях Er-Fe близок по величине к магнитному моменту свободного иона $\text{Fe } \mu_{\text{Fe}} \approx 2\mu_{\text{B}}$.

Рассмотрим полученные результаты в сравнении с данными измерений магнитных свойств в присутствии гидростатического давления в соединении Y_2Fe_{17} [7].

Температурные зависимости намагниченности и восприимчивости в присутствии давления в соединениях $\text{Er}_2\text{Fe}_{17}$ и Y_2Fe_{17} имеют ряд общих особенностей, которые позволяют предположить наличие в них индуцированной давлением фазы неколлинеарного упорядочения в подсистеме железа. Нейтронографические исследования в соединениях $\text{Lu}_2\text{Fe}_{17}$, $\text{Tm}_2\text{Fe}_{17}$ и CeFe_{17} [12, 14] подтверждают данное предположение. Изломы на кривых $\sigma(H)$ (рис. 2) также, по-видимому, соответствуют полю разрушения неколлинеарной структуры внешним магнитным полем. Причины возникновения неколлинеарной фазы, связанные с изменением соотношения между ферро- и антиферромагнитными обменными взаимодействиями в подрешетке железа, рассматривались в работе [7]. Рассмотрим некоторые количественные характеристики.

В соединении Y_2Fe_{17} неколлинеарная фаза возникала при высоких давлениях $P \approx 7.5$ кбар, в то время как в $\text{Er}_2\text{Fe}_{17}$ давление, индуцирующее неколлинеарное упорядочение, составляло лишь 2 кбар (см. таблицу). В соединении Y_2Fe_{17} на кривых $\sigma(H)$ в присутствии давления не наблюдали критического поля разрушения неколлинеарной структуры, а в $\text{Er}_2\text{Fe}_{17}$ при давлении $P = 9.7$ кбар обна-



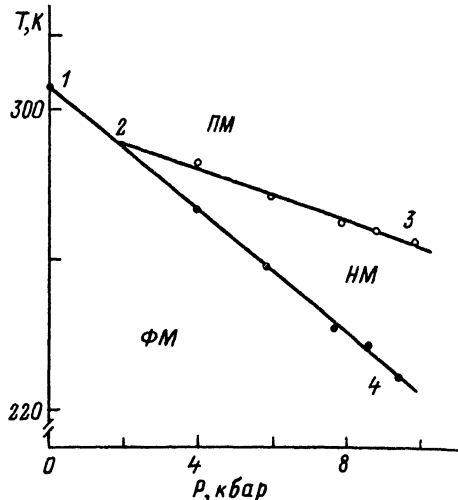
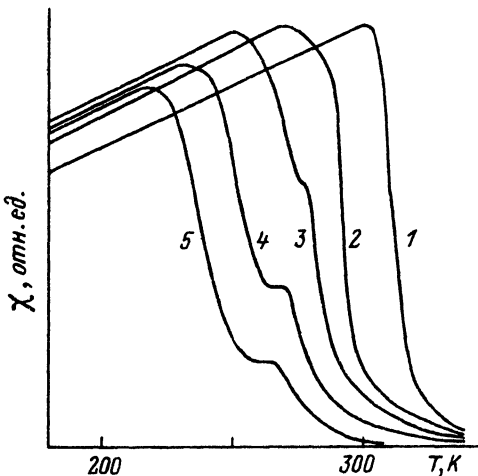


Рис. 3. Температурные зависимости начальной восприимчивости $\chi(T)$ соединения $\text{Er}_2\text{Fe}_{17}$ при атмосферном давлении (1) и давлениях 4 (2), 6 (3), 7.9 (4) и 9.7 кбар (5).

Рис. 4. Фазовая $T-P$ диаграмма соединения $\text{Er}_2\text{Fe}_{17}$.

ружено критическое поле $H_{\text{кр}} \approx 650$ Э. Поскольку, по данным работы [14], в $\text{Lu}_2\text{Fe}_{17}$ критическое поле перехода равнялось ≈ 2 кЭ, можно сделать вывод о том, что уменьшение объема кристаллической ячейки приводит к увеличению стабильности неколлинеарной структуры.

Как указывалось выше, соединение Y_2Fe_{17} является ферромагнетиком, а $\text{Er}_2\text{Fe}_{17}$ — ферримагнетиком. Гамильтониан, описывающий обменные взаимодействия в соединении $\text{Er}_2\text{Fe}_{17}$, очевидно, имеет вид

$$\mathcal{H}_{\text{обм}} = \mathcal{H}_{\text{Fe-Fe}}^* + \mathcal{H}_{\text{Fe-Fe}}^\Phi + \mathcal{H}_{\text{Er-Fe}} + \mathcal{H}_{\text{Er-Er}}. \quad (1)$$

Первое и второе слагаемые описывают ферро- и антиферромагнитные обменные взаимодействия внутри подрешетки железа, третье и четвертое — обменные взаимодействия между подрешетками Er—Fe и внутри подрешетки Er соответственно. Обменные взаимодействия внутри редкоземельной подсистемы малы, и последним слагаемым в выражении (1) можно пренебречь. Остальные три слагаемых могут иметь сложные зависимости от межатомных расстояний.

Очевидно, что в соединении Y_2Fe_{17} обменные взаимодействия будут определяться первыми двумя слагаемыми в выражении (1), так как иттрий является паулиевским парамагнетиком и не имеет собственного магнитного момента.

Обычно соотношения между внутривидовыми и междовидовыми обменными взаимодействиями в соединениях R-переходный металл оцениваются по сравнению с соединениями Y-переходный металл, не принимая во внимание отклонения в параметрах решеток этих соединений. Наши экспериментальные данные позволяют учесть это обстоятельство. В таблице приведены некоторые параметры соединений $\text{Er}_2\text{Fe}_{17}$ и Y_2Fe_{17} , откуда видно, что температуры Кюри и величина смещения температуры Кюри под давлением $\partial T_c / \partial P$ в этих соединениях приблизительно равны.

Для оценки междовидовых взаимодействий в соединении $\text{Er}_2\text{Fe}_{17}$ определим, какую величину температуры Кюри имело бы соединение Y_2Fe_{17} при

Состав	Объем элементарной ячейки, Å ³	θ, К	∂θ/∂P, К/кбар	Критическое давление появления неколлинеарной структуры, кбар	Максимальное критическое поле разрушения неколлинеарной структуры, Э
Y ₂ Fe ₁₇	594.89	320	-4.7	7.5	200
Er ₂ Fe ₁₇	588.35	316	-5.4	2.0	550

объеме элементарной ячейки, равном объему ячейки ErFe₁₇. Для этого воспользуемся термодинамическим соотношением

$$\Delta V/V = -P/\chi, \quad (2)$$

где χ — сжимаемость, равная, по данным работы [4], $\chi = -1.06 \cdot 10^{-3}$ кбар, а $\Delta V = V_{Y_2Fe_{17}} - V_{Er_2Fe_{17}}$.

Отсюда получим, что объем элементарной ячейки Y₂Fe₁₇ станет равным объему элементарной ячейки Er₂Fe₁₇ при давлении $P = 13,6$ кбар. Под таким давлением температура Кюри сместится у соединения Y₂Fe₁₇ на величину $P(\partial\theta/\partial P) = \Delta\theta = 64.14$ К (см. таблицу) и станет равной $\theta^P = 255.8$ К, что значительно ниже температуры Кюри соединения Er₂Fe₁₇. Разница температур Кюри, очевидно, определяется вкладом межподрешеточного обменного взаимодействия, который достигает для соединения Er₂Fe₁₇ величины, составляющей около четверти от обменных взаимодействий Fe—Fe. Этот результат указывает на необходимость тщательного учета изменения объема элементарной ячейки при расчете обменных взаимодействий в интерметаллических сплавах, содержащих большое количество ионов железа. В этом случае соотношение между ферро- и антиферромагнитными обменными взаимодействиями в подсистеме железа настолько сильно зависит от межатомного расстояния, что даже небольшое его изменение существенно сказывается на полученных результатах.

Таким образом, в настоящей работе впервые обнаружена неколлинеарная индуцированная внешним давлением структура в магнитной подсистеме железа в интерметаллическом соединении Er₂Fe₁₇. Показано, что уменьшение объема элементарной ячейки в ряду соединений R₂Fe₁₇ приводит к увеличению антиферромагнитных взаимодействий в подсистеме железа. Установлено, что межподрешеточное обменное взаимодействие стабилизирует коллинеарное упорядочение магнитных моментов ионов Fe. Расчет обменных взаимодействий, в котором была учтена разница объемов элементарных ячеек соединений Er₂Fe₁₇ и Y₂Fe₁₇, показал, что Er—Fe обмен достигает 1/4 величины от Fe—Fe обменных взаимодействий.

В заключение выражаем благодарность сотруднику НИИ физики и прикладной математики Уральского университета Н. В. Баранову за предоставленный образец Er₂Fe₁₇.

Список литературы

- [1] Givord D., Lemaire R., James J. J., Moreau J. M., Shan J. S. // IEEE Trans. Magn. 1971. V. 7. P. 657.
- [2] Givord D., Lemaire R. // IEEE Trans. Magn. 1974. V. 10. N 2. P. 109.
- [3] Gidnoux D., Givord D., Givord F., Lemaire R. // JMMM. 1977. V. 10. P. 288.
- [4] Gavigan J. P., Givord D., Li M. S., Voiron J. // Physica B. 1988. V. 149. P. 345.
- [5] Givord D. et al. // Physica B. 1985. V. 130. P. 323.
- [6] Inoue J. // Physica B. 1988. V. 149. P. 376.
- [7] Андреев А. С., Никитин С. А., Спичкин Ю. И., Тишин А. М. // ФТТ. 1991. Т. 33. № 8. С. 2463.
- [8] Никитин С. А., Тишин А. М., Спичкин Ю. И., Леонтьев П. И., Островский А. Ф. // ФТТ. 1991. Т. 33. № 3. С. 984.
- [9] Андреев А. С. // Тез. докл. XIX Всес. конф. по физике магнитных явлений. Ташкент, 1991.

- [10] Бездушный Р. В. // Автореф. канд. дис. М., МГУ, 1988.
[11] Buschou K. H. J., Vandergoot A. S. // Phys. Stat. Sol. 1969. V. 35. N 1. P. 515.
[12] Strnat K., Hoffer G., Ray A. E. // IEEE Trans. Magn. 1966. V. 2. N 3. P. 489.
[13] Buschou K. H. J. // Rep. Progr. Phys. 1977. V. 40. N 10. P. 1179.
[14] Givord D., Givord F., Lemaire R. // J. de Phys. 1971. V. 32. N 2—3. P. 668.

Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова

Поступило в Редакцию
3 марта 1992 г.
