

# Влияние высокого давления на корреляцию между структурными и магнитными свойствами соединений $Y_2Fe_{17-x}M_x$ ( $M = Si, Al; x = 1.7$ )

© В.И. Воронин, А.Г. Кучин, В.П. Глазков\*, Д.П. Козленко\*\*, Б.Н. Савенко\*\*

Институт физики металлов Уральского отделения Российской академии наук,  
620219 Екатеринбург, Россия

\* Российский научный центр „Курчатовский институт“,  
123182 Москва, Россия

\*\* Объединенный институт ядерных исследований,  
141980 Дубна, Московская обл., Россия

E-mail: Voronin@imp.uran.ru

(Поступила в Редакцию 10 июня 2003 г.)

Впервые методом нейтронной дифракции исследовано влияние высокого давления на кристаллическую структуру гексагональных интерметаллических соединений  $Y_2Fe_{17}$ ,  $Y_2Fe_{15.3}Al_{1.7}$  и  $Y_2Fe_{15.3}Si_{1.7}$ . Показано, что под давлением происходит изотропное сжатие параметров элементарной ячейки. Установлена корреляция между изменением температуры Кюри и расстоянием Fe–Fe в „гантельных“ позициях под давлением. Низкотемпературные исследования в условиях сжатия обнаружили эффект подавления магнитострикции в  $Y_2Fe_{17}$ .

Работа выполнена при поддержке ГНТП „Актуальные направления в физике конденсированных сред“ (Госконтракт № 40.012.1.1.11.50).

## 1. Введение

В настоящее время наблюдается повышенный интерес к исследованию интерметаллических соединений редкоземельных металлов с железом типа  $R_2Fe_{17}$ , что связано с возможностью их практического применения в качестве магнитных и магнитострикционных материалов. Свойства этих соединений во многом определяются реальной (дефектной) кристаллической структурой. Так, для  $Y_2Fe_{17}$  значение температуры Кюри ( $T_C$ ) перехода в ферромагнитное состояние, полученное в различных исследованиях, варьируется в довольно широком интервале (300–360 К). В работе [1] было показано, что такой разброс  $T_C$  связан с нарушением идеальности решетки. Внедряя в решетку различные элементы (дефекты атомного масштаба), например азот, углерод или водород [2–4], либо легируя подрешетку железа кремнием или алюминием [5–7], можно значительно повысить температуру Кюри и изменить величину магнитострикции [8].

Во всех этих работах варьировался химический состав образцов, и было трудно выделить в чистом виде конкретные структурные параметры, ответственные за изменения магнитных свойств. Влияние высокого давления на магнитные свойства  $Y_2Fe_{17-x}M_x$  ( $M = Si, Al$ ) исследовалось в работе [8], однако изменения структуры этих соединений под давлением не были изучены. В настоящей работе проведено исследование кристаллической структуры соединений  $Y_2Fe_{17-x}M_x$  ( $M = Si, Al$ ) при воздействии высоких давлений для выявления возможной корреляции между наблюдаемыми изменениями магнитных свойств и структурных параметров под давлением.

## 2. Образцы и методы исследования

Сплавы  $Y_2Fe_{17-x}M_x$  ( $M = Si, Al; x = 0, 1.7$ ) были получены методом левитации в индукционной печи, а затем подвергнуты гомогенизирующему отжигу при температуре 1300 К в течение 24 ч с последующей закалкой в воде. Для экспериментов под давлением использовались сплавы  $Y_2Fe_{17}$ ,  $Y_2Fe_{15.3}Al_{1.7}$  и  $Y_2Fe_{15.3}Si_{1.7}$ , структура которых ранее прецизионно исследовалась при комнатной температуре в отсутствие давления [1,9] методом нейтронной дифракции. В исследуемых образцах обнаружено небольшое количество примеси  $\alpha$ -Fe (< 5%).

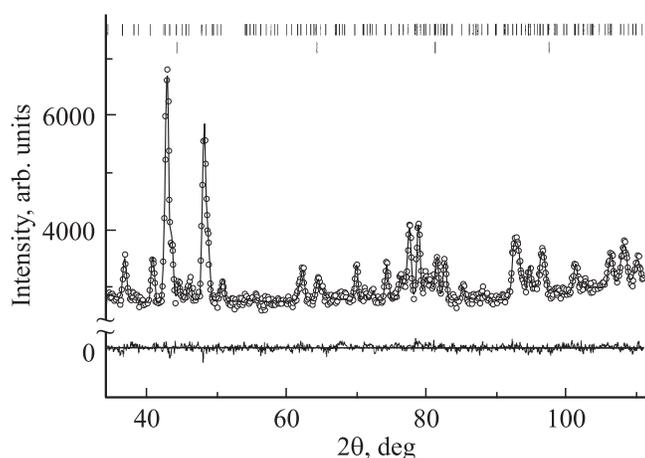
Кристаллическая структура сплавов исследовалась методом нейтронной дифракции. Эксперименты в диапазоне давлений до 1.0 GPa выполнялись с использованием нейтронного дифрактометра D7a, расположенного на горизонтальном канале реактора ИВВ-2М (г. Заречный, вблизи Екатеринбурга) [10]. Все нейтронограммы получены в угловом интервале 9–111° с шагом 0.1° (длина волны  $\lambda = 1.515 \text{ \AA}$ , угловое разрешение  $\Delta d/d = 0.003$ ). На дифрактометр была установлена камера высокого давления типа поршень–цилиндр, изготовленная из сплава Ti–Zr. Передающей средой служила жидкость фреон-111 [11]. Уточнение структурных параметров (параметров элементарной ячейки, координат атомов, чисел заполнения атомных позиций) было выполнено методом полнопрофильного анализа Ритвелда [12] с использованием программы „Fullprof“ [13]. Эксперименты при более высоких давлениях (в диапазоне до 4.5 GPa) проводились с использованием камер высокого давления с сапфировыми наковальнями [14] на спектрометре ДН-12 [15], расположенном на импульсном высокопоточном реакторе ИБР-2 (ЛНФ им. И.М. Франка, ОИЯИ, Дубна). Объем исследуемого материала в этом случае

составлял  $V \sim 2 \text{ nm}^3$ . Дифракционные спектры измерялись при угле рассеяния  $2\theta = 90^\circ$ . Для данного угла рассеяния разрешение дифрактометра  $\Delta d/d$  на длине волны  $\lambda = 2 \text{ \AA}$  было равно 0.015. Характерное время одного спектра составляло 20 ч. Давление в камере измерялось по сдвигу линии люминесценции рубина с точностью 0.05 ГПа. Для проведения экспериментов в области низких температур камера высокого давления помещалась в гелиевый рефрижератор.

### 3. Экспериментальные результаты

В работах [1,9] было показано, что в нормальных условиях соединения  $\text{Y}_2\text{Fe}_{17}$ ,  $\text{Y}_2\text{Fe}_{15.3}\text{Al}_{1.7}$  и  $\text{Y}_2\text{Fe}_{15.3}\text{Si}_{1.7}$  обладают гексагональной симметрией кристаллической решетки, а их реальная структура является разупорядоченным вариантом структуры типа  $\text{Th}_2\text{Ni}_{17}$ .

Нейтронный дифракционный спектр соединения  $\text{Y}_2\text{Fe}_{17}$ , измеренный при давлении  $P = 0.92 \text{ GPa}$ , показан на рис. 1. Спектры, полученные для этого и других исследуемых соединений ( $\text{Y}_2\text{Fe}_{15.3}\text{Al}_{1.7}$  и  $\text{Y}_2\text{Fe}_{15.3}\text{Si}_{1.7}$ ), имеют аналогичный характер. Для анализа экспериментальных данных использовалась модель разупорядоченной кристаллической структуры, предложенная в работах [1,9]. Структурные параметры  $\text{Y}_2\text{Fe}_{17}$ ,  $\text{Y}_2\text{Fe}_{15.3}\text{Si}_{1.7}$  и  $\text{Y}_2\text{Fe}_{15.3}\text{Al}_{1.7}$ , полученные при различных давлениях и комнатной температуре, представлены в табл. 1–3. Поскольку значения координат атомов в соединениях  $\text{Y}_2\text{Fe}_{15.3}\text{Si}_{1.7}$  и  $\text{Y}_2\text{Fe}_{15.3}\text{Al}_{1.7}$  близки к величинам, найденным для  $\text{Y}_2\text{Fe}_{17}$ , и слабо зависят от давления, в табл. 2 и 3 приведены только параметры элементарной ячейки для этих соединений.



**Рис. 1.** Участок нейтронного дифракционного спектра  $\text{Y}_2\text{Fe}_{17}$ , измеренный при давлении  $P = 0.92 \text{ GPa}$  и комнатной температуре и обработанный по методу Ритвельда. Показаны экспериментальные точки, вычисленный профиль и разностная кривая (внизу). Два ряда штрихов (сверху) показывают рассчитанные положения дифракционных пиков для структуры  $\text{Y}_2\text{Fe}_{17}$  и примеси  $\alpha\text{-Fe}$ , обнаруженной в образце в небольшом количестве.

**Таблица 1.** Экспериментальные структурные параметры соединений  $\text{Y}_2\text{Fe}_{17}$  при различных давлениях

Параметр	$P, \text{ GPa}$			$K, \text{ GPa}^{-1}$
	0	0.46	0.92	
$a, \text{ \AA}$	8.5023(9)	8.4872(9)	8.4778(8)	0.0031(4)
$c, \text{ \AA}$	8.3279(9)	8.3118(9)	8.3023(8)	0.0033(5)
$V, \text{ \AA}^3$	520.91(9)	518.50(9)	516.78(8)	0.0096(8)
$c/a$	0.9795	0.9793	0.9793	
Fe(4f) $z$	0.1066(9)	0.1077(12)	0.1078(11)	
Fe <sub>1</sub> (12j) $x$	0.328(3)	0.328(3)	0.325(2)	
	$y$	0.373(3)	0.369(3)	0.369(2)
Fe <sub>2</sub> (12j) $x$	0.290(7)	0.282(7)	0.281(5)	
	$y$	0.287(7)	0.279(7)	0.271(6)
Fe(12k) $x$	0.169(2)	0.169(2)	0.169(2)	
	$z$	-0.0133(6)	-0.0148(6)	-0.0164(5)
Fe(4e) $z$	0.100(9)	0.108(9)	0.106(8)	
$R_p$	1.79	1.56	1.59	
$R_{WP}$	2.44	1.97	2.04	
$R_B$	6.63	6.84	6.59	

Примечание.  $a, c, V$  — параметры и объем элементарной ячейки,  $x, y, z$  — относительные координаты атомов,  $K_i = (1/a_{i0})(da_i/dP)_T$  ( $a_i = a, c$ ) и  $K_V = (1/V_0)(dV/dP)_T$  — коэффициенты линейной и объемной сжимаемости элементарной ячейки,  $R_p, R_{WP}, R_B$  — факторы сходимости.

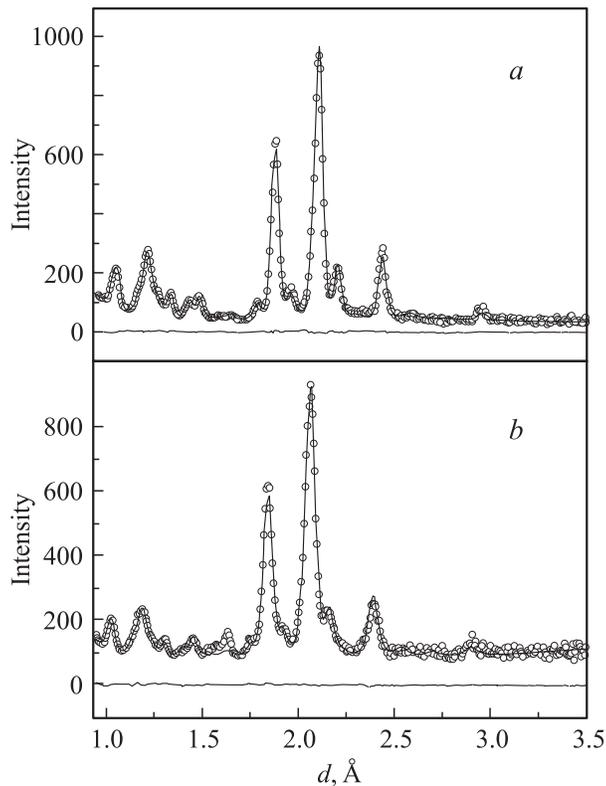
**Таблица 2.** Экспериментальные структурные параметры соединений  $\text{Y}_2\text{Fe}_{15.3}\text{Si}_{1.7}$  при различных давлениях

Параметр	$P, \text{ GPa}$					$K, \text{ GPa}^{-1}$
	0	0.15	0.31	0.61	0.79	
$a, \text{ \AA}$	8.4449	8.441	8.426	8.417	8.421	0.004(1)
$c, \text{ \AA}$	8.2966	8.29	8.274	8.265	8.271	0.0043(12)
$V, \text{ \AA}^3$	512.41	511.57	508.74	507.07	508.00	0.012(4)
$c/a$	0.9824	0.9821	0.9820	0.9819	0.9822	

**Таблица 3.** Экспериментальные структурные параметры соединений  $\text{Y}_2\text{Fe}_{15.3}\text{Si}_{1.7}$  при различных давлениях

Параметр	$P, \text{ GPa}$				$K, \text{ GPa}^{-1}$
	0	0.28	0.55	0.79	
$a, \text{ \AA}$	8.5261	8.515	8.521	8.502	0.0029(14)
$c, \text{ \AA}$	8.3344	8.321	8.323	8.312	0.0029(9)
$V, \text{ \AA}^3$	524.7	522.42	523.42	520.38	0.009(2)
$c/a$	0.9775	0.9772	0.9768	0.9777	

Для одного из образцов,  $\text{Y}_2\text{Fe}_{15.3}\text{Si}_{1.7}$ , были проведены дополнительные эксперименты в более широком диапазоне давлений до 4.5 ГПа. Нейтронные дифракционные спектры  $\text{Y}_2\text{Fe}_{15.3}\text{Si}_{1.7}$ , измеренные при давлениях 0 и 4.5 ГПа и комнатной температуре, показаны на рис. 2. Модель разупорядоченной структуры [1,9] хоро-



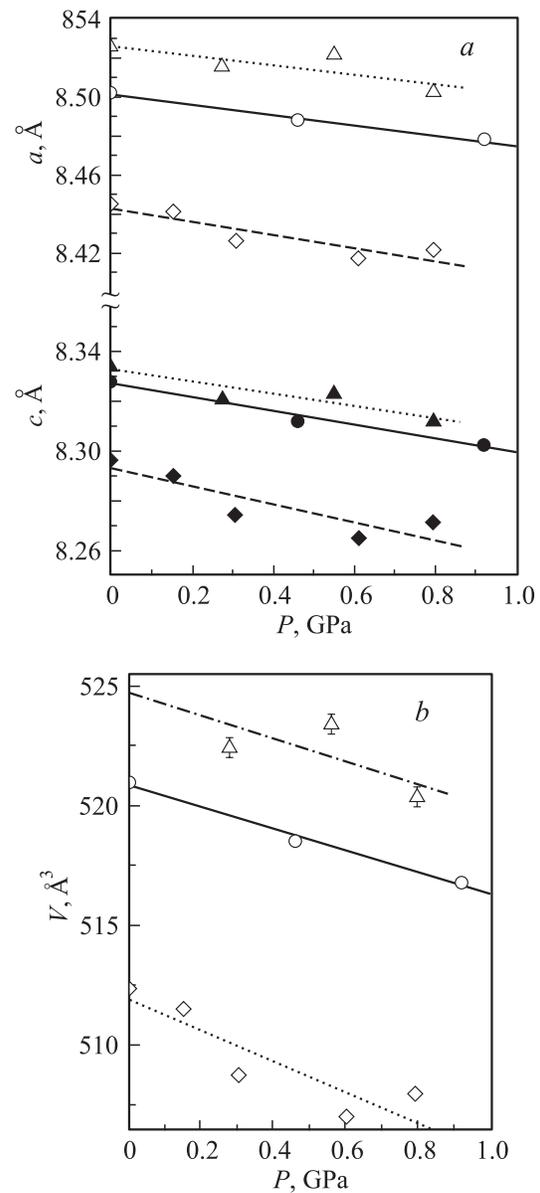
**Рис. 2.** Участки нейтронных дифракционных спектров  $\text{Y}_2\text{Fe}_{15.3}\text{Si}_{1.7}$ , измеренные при давлениях  $P = 0$  (*a*) и  $4.5$  ГПа (*b*) и комнатной температуре и обработанные по методу Ритвельда. Показаны экспериментальные точки, вычисленный профиль и разностная кривая (внизу).

шо описывает экспериментальные данные, полученные при высоких давлениях (рис. 2). Это свидетельствует об отсутствии структурных фазовых превращений в данном диапазоне давлений, что согласуется с результатами предыдущего исследования кристаллической структуры  $\text{Y}_2\text{Fe}_{15.3}\text{Si}_{1.7}$  при давлениях до  $2.0$  ГПа [16].

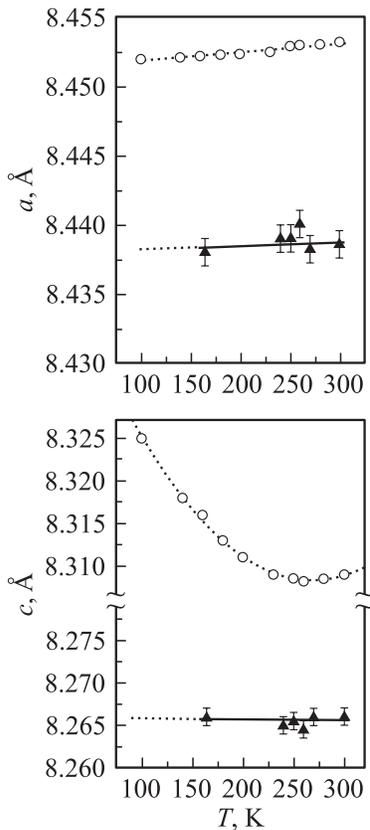
Зависимости параметров и объема элементарной ячейки соединений  $\text{Y}_2\text{Fe}_{17-x}\text{M}_x$  ( $M = \text{Si}, \text{Al}$ ) от давления показаны на рис. 3, *a* и *b*. Они имеют характер, близкий к линейному. Рассчитанные значения коэффициентов линейной сжимаемости параметров элементарной ячейки  $K_i = (1/a_{i0})(da_i/dP)_T$  ( $a_i = a, c$ ) и объемной сжимаемости  $K_V = (1/V_0)(dV/dP)_T$  представлены в табл. 1–3. Для всех исследуемых соединений коэффициенты  $K_a$  и  $K_c$  имеют примерно одинаковую величину, и отношение параметров элементарной ячейки  $c/a$  почти не изменяется при увеличении давления, что свидетельствует об их изотропной сжимаемости.

В работах [8,17–19] было показано, что соединения  $\text{R}_2\text{Fe}_{17}$  обнаруживают большой магнестрикционный эффект, который приводит к значительному росту параметра элементарной ячейки  $c$  при уменьшении температуры ниже  $270$  К. Для изучения влияния высокого давления на этот эффект были проведены нейтронные

дифракционные эксперименты при давлении  $P = 1$  ГПа в интервале температур  $150$ – $300$  К. На рис. 4 показаны температурные зависимости параметров элементарной ячейки соединения  $\text{Y}_2\text{Fe}_{17}$  при давлении  $P = 1$  ГПа и нормальном давлении (по данным работы [4]). Видно, что воздействие высокого давления приводит к существенному изменению температурной зависимости параметра элементарной ячейки  $c$ . При нормальном давлении с понижением температуры наблюдается заметное увеличение параметра  $c$ , в то время как при  $P = 1.0$  ГПа он незначительно уменьшается. Таким образом, приложение высокого давления приводит к подавлению магнестрикционного эффекта в  $\text{Y}_2\text{Fe}_{17}$ .



**Рис. 3.** Зависимость параметров (*a*) и объема (*b*) решетки соединений  $\text{Y}_2\text{Fe}_{17}$  (кружки),  $\text{Y}_2\text{Fe}_{15.3}\text{Al}_{1.7}$  (треугольники) и  $\text{Y}_2\text{Fe}_{15.3}\text{Si}_{1.7}$  (ромбы) от давления. Прямые линии соответствуют линейной интерполяции экспериментальных данных.



**Рис. 4.** Зависимость параметров решетки  $Y_2Fe_{17}$  от температуры при давлениях  $P = 0$  (светлые символы) и 1 GPa (темные символы).

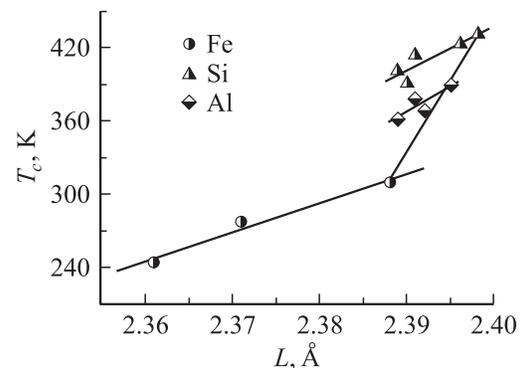
#### 4. Обсуждение результатов

Свойства соединений  $Y_2Fe_{17-x}M_x$  ( $M = Si, Al$ ) во многом определяются их реальной (дефектной) кристаллической структурой, которая является разупорядоченным вариантом гексагональной структуры типа  $Th_2Ni_{17}$  [1,8,9]. Разупорядочение связано с возникновением вакансий в  $2b$  узлах подрешетки  $Y$ . Происходит частичный обмен местами больших по объему атомов иттрия и связанных попарно небольших атомов железа в позиции  $4f$  (так называемых „гантелей“ железа). Кроме того, атомы Fe частично заполняют вакантные в идеальной решетке позиции  $4e$ , образуя дополнительные „гантельные“ позиции железа. Все это вызывает искажения внутри плоскости атомов железа, приводя к расщеплению позиции Fe  $12j$  на две. Степень разупорядочения зависит от конкретных условий синтеза образца и это объясняет тот факт, что температура Кюри  $T_C$  в  $Y_2Fe_{17}$  по данным разных авторов варьируется в довольно широком интервале (300–360 К). Как было показано, при легировании исходного соединения  $Y_2Fe_{17}$  атомы Al и Si с большей вероятностью замещают атомы железа в позициях  $12k$ ,  $4f$  и с меньшей вероятностью в позициях  $6g$  и  $12j$  [1,9]. Подобные изменения при

легировании Al и Si наблюдаются и в изоструктурном соединении  $Lu_2Fe_{17}$  [20].

Для анализа взаимосвязи структурных и магнитных свойств будем использовать модель локализованных моментов. В этой модели атомы Fe взаимодействуют ферромагнитно или антиферромагнитно, если расстояние между ними больше или меньше критического расстояния  $R_c \approx 2.45$  Å. В соединениях  $R_2Fe_{17}$  межатомные расстояния между ближайшими атомами железа близки к 2.45 Å, поэтому в них реализуются и ферромагнитное, и антиферромагнитное состояния. Среди этих расстояний наименьшую величину имеет расстояние между атомами железа в „гантельной“ позиции  $4f$ , поэтому предполагается, что поведение температуры Кюри сплавов  $R_2Fe_{17}$  существенно зависит от значения этого расстояния. Действительно, в наших работах [8,16,20,21] показано, что в соединениях  $R_2Fe_{17}$ , легированных Al и Si, величина  $T_C$  возрастает прямо пропорционально межатомному расстоянию Fe–Fe в „гантелях“. Было показано, что расстояние между атомами Fe в „гантельной“ позиции соединения  $Y_2Fe_{17}$  увеличивается при частичном замещении железа как алюминием, так и кремнием вследствие внутривещеточных смещений атомов. Такая же зависимость наблюдается и для изоструктурного гексагонального соединения  $Lu_2Fe_{17}$  [20] при легировании Al и Si. Более того, возрастание  $T_C$  с ростом межатомного расстояния Fe–Fe в „гантелях“ наблюдается и в соединениях с небольшим размером редкоземельных атомов, например в  $Ce_2Fe_{17}$  с ромбоэдрической решеткой при легировании Al и Si [21,22]. Таким образом, можно говорить о существовании общего для всех исследованных нами тройных соединений  $R_2Fe_{17-x}M_x$  параметра (межатомного расстояния Fe–Fe в „гантелях“), изменение которого коррелирует с изменением  $T_C$ .

На рис. 5 представлена зависимость температуры Кюри  $T_C$  от межатомного расстояния Fe–Fe в „гантелях“  $L$  для соединений  $Y_2Fe_{17-x}M_x$  ( $M = Si, Al$ ), рассчитанная



**Рис. 5.** Зависимость температуры Кюри  $T_C$  от межатомного расстояния Fe–Fe в „гантелях“  $L$  для соединений  $Y_2Fe_{17-x}M_x$  ( $M = Si, Al$ ), рассчитанная на основе структурных данных настоящей работы и данных по магнитным свойствам [8], полученных при воздействии высоких давлений до 1.0 GPa.

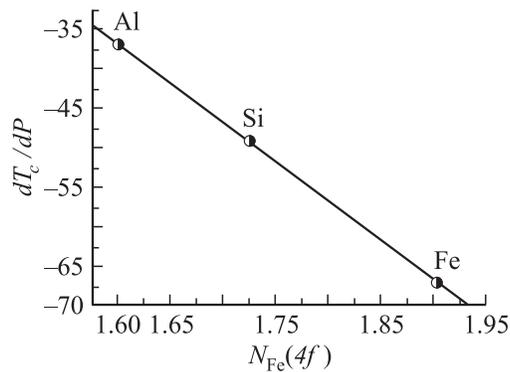


Рис. 6. Зависимость  $dT_c/dP$  от заполнения „гантельной“ позиции для соединений  $Y_2Fe_{17-x}M_x$  ( $M = Si, Al$ ).

на основе структурных данных настоящей работы и данных по магнитным свойствам [8], полученных при воздействии высоких давлений до 1.0 GPa (табл. 1 и 2). Видно, что наблюдается уменьшение  $T_c$  при сокращении расстояний между атомами железа в „гантелях“ для всех трех образцов. В то же время степень уменьшения  $T_c$  с уменьшением  $L$  зависит от легирующего элемента; она максимальна для нелегированного образца  $Y_2Fe_{17}$ . Этот факт можно понять, если вновь обратиться к результатам по легированию. В работах [1,9] показано, что минимальное количество атомов железа в „гантельных“ позициях наблюдается при легировании алюминием  $\approx 1.60$ , тогда как в образце с кремнием количество атомов Fe  $\approx 1.74$ , а в исходном образце их число  $\approx 1.91$ . Это отчетливо видно из рис. 6, где представлена зависимость  $dT_c/dP$  от заполнения „гантельной“ позиции всех трех образцов. Таким образом, чем больше суммарное количество атомов железа в „гантелях“, тем большее влияние давление оказывает на  $T_c$ .

Как уже отмечалось, в соединениях  $R_2Fe_{17}$  наблюдаются большие магнитообъемные эффекты [19], проявляющиеся в сильной зависимости температуры Кюри и магнитных свойств от объема. Спонтанная объемная магнитострикция этих соединений велика и сравнима по величине с объемной магнитострикцией инварных сплавов. Следует отметить, что обменная стрикция и изотропное магнитоупругое взаимодействие (МУВ) в гексагональных и кубических кристаллах имеют свои особенности. В частности, как показано в [19], в гексагональных соединениях  $R_2Fe_{17}$  спонтанные магнитоупругие деформации, не зависящие от направления вектора намагниченности, сильно анизотропны. Например, обменная стрикция параметра решетки  $c$  кристалла  $Y_2Fe_{17}$  в 4–5 раз превышает таковую для параметров  $a = b$ . Причины, приводящие к анизотропии обменной стрикции, в настоящее время до конца не ясны. Предполагалось, что такое поведение связано с анизотропией кристаллической решетки  $R_2Fe_{17}$  и, следовательно, с анизотропией упругих постоянных. Однако наши эксперименты показали, что под действием давления решетка сжимается

изотропно (отношение  $c/a$  остается практически постоянным). Таким образом, следует ожидать анизотропной зависимости обменных взаимодействий от расстояния, которая приводит к большой анизотропии спонтанной обменной магнитострикции  $(\Delta c/c)^m/(\Delta a/a)^m \approx 4$  [19] и большому различию магнитного вклада в линейную сжимаемость вдоль кристаллографических осей.

Магнитострикционный эффект в  $Y_2Fe_{17}$  связан с появлением ферромагнитного состояния, поэтому возможной причиной его подавления в области высоких давлений может быть уменьшение температуры Кюри из-за сокращения межатомного расстояния Fe–Fe в „гантельных“ позициях. В следующей работе мы проведем оценку величины некоторых эффектов изотропного МУВ в гексагональных кристаллах  $R_2Fe_{17}$  на основе феноменологической теории МУВ в ферромагнетиках.

## 5. Заключение

В настоящей работе проведено исследование кристаллической структуры интерметаллических соединений  $Y_2Fe_{17}$ ,  $Y_2Fe_{15.3}Al_{1.7}$  и  $Y_2Fe_{15.3}Si_{1.7}$  при высоких давлениях. Воздействие высокого давления приводит к изотропному сжатию кристаллической решетки, а гексагональная кристаллическая структура этих соединений сохраняется во всем исследуемом диапазоне давлений до 4.5 GPa.

Установлено, что главными факторами, влияющими на величину температуры Кюри  $T_c$  и ее производной по давлению  $dT_c/dP$ , в данных соединениях являются величина межатомного расстояния Fe–Fe в „гантельных“ позициях и степень их заполнения.

Причиной подавления магнитострикционного эффекта в  $Y_2Fe_{17}$  при воздействии высокого давления может являться уменьшение температуры Кюри под давлением. Можно предположить, что воздействие высокого давления также будет приводить к подавлению магнитострикционного эффекта в других соединениях типа  $R_2Fe_{17-x}M_x$ .

## Список литературы

- [1] В.И. Воронин, И.Ф. Бергер, А.Г. Кучин. ФММ **89**, 88 (2000).
- [2] J.M.D. Coey, H. Sun. J. Magn. Mater. **87**, L251 (1990).
- [3] X.P. Zhong, R.J. Radwanski, F.R. de Boer, T.H. Jacobs, K.H.J. Buschow. J. Magn. Mater. **86**, 333 (1990).
- [4] X.Z. Wang, K. Donnelly, J.M.D. Coey, B. Chevalier, J. Etourneau, T. Berlureau. J. Mater. Sci. **23**, 329 (1988).
- [5] B.G. Shen, L.S. Kong, F.W. Wang, L. Cao. Appl. Phys. Lett. **63**, 2288 (1993).
- [6] B.G. Shen, F.W. Wang, L.S. Kong, L. Cao, H.Q. Guo. J. Magn. Mater. **127**, L267 (1993).
- [7] A.G. Kuchin, N.I. Kourov, Yu.V. Knyazev, N.M. Kleinerman, V.V. Serikov, G.V. Ivanova, A.S. Ermolenko. Phys. Stat. Sol. (a) **155**, 479 (1996).

- [8] A.G. Kuchin, I.V. Medvedeva, V.S. Gaviko, V.A. Kazantsev. *J. Alloys Comp.* **289**, 18 (1999).
- [9] V.I. Voronin, I.F. Berger, A.G. Kuchin, D.V. Sheptyakov, A.M. Balagurov. *J. Alloys. Comp.* **315**, 82 (2001).
- [10] B.N. Goshchitskii, A.Z. Menshikov. *Neutron News* **7**, 12 (1996).
- [11] A.I. Ivanov, D.E. Litvin, B.N. Savenko, L.S. Smirnov, V.I. Voronin, A.E. Teplykh. *High Press. Res.* **14**, 209 (1995).
- [12] H.M. Rietveld. *J. Appl. Cryst.* **2**, 65 (1969).
- [13] J. Rodrigues-Carvajal. *Physica B* **192**, 155 (1993).
- [14] В.П. Глазков, И.Н. Гончаренко. *Физика и техника высоких давлений* **1**, 56 (1991).
- [15] V.P. Glazkov, V.L. Aksenov, D.V. Sheptyakov, V.A. Somenkov, V.A. Kudryashev, V.A. Trounov, B.N. Savenko, A.M. Balagurov, D.P. Kozlenko, I.V. Naumov, A.P. Bulkin. *Physica B* **265**, 258 (1999).
- [16] V.I. Voronin, A.E. Teplykh, I.V. Medvedeva, A.G. Kuchin, D.V. Sheptyakov, V.P. Glazkov, B.N. Savenko. *High Press. Res.* **17**, 193 (2000).
- [17] D. Givord, R. Lemaire. *IEEE Trans. Magn. Mag-10*, 109 (1974).
- [18] M. Brouha, K.H.J. Buschow, A.R. Miedema. *IEEE Trans. Magn. Mag-10*, 182 (1974).
- [19] А.В. Андреев, А.В. Дерягин, С.М. Задворкин, Н.В. Кудреватых, Р.З. Левитин, В.Н. Москалев, Ю.Ф. Попов, Р.Ю. Юмагужин. В сб.: *Физика магнитных материалов*. Калинин (1985). С. 21.
- [20] В.И. Воронин, И.Ф. Бергер, А.Г. Кучин. *ФММ* **93**, 39 (2002).
- [21] В.В. Сериков, Н.М. Клейнерман, А.Г. Кучин, В.И. Воронин. *ФММ* **94**, 59 (2002).
- [22] M. Artigas, D. Fruchart, O. Isnard, S. Miraglia, J.L. Soubeyroux. *J. Alloys Comp.* **270**, 28 (1998).