

## **Влияние гидрирования на магнитные свойства монокристаллов $R_2Fe_{16}M$ ( $R = Ce, Lu, Y; M = Fe, Mn, Si, Cr, Ni$ )**

**Е. А. Терёшина, С. А. Никитин, А. В. Андреев,  
И. С. Терёшина, В. Ивасечко, Г. Друлис**

Изучено влияние водорода на магнитные свойства соединений  $R_2(Fe,M)_{17}$  ( $R = Ce, Lu, Y; M = Fe, Mn, Si, Cr, Ni$ ). Особое внимание в работе уделено соединениям с Ce, поскольку ионы Ce обладают переменной валентностью. Были выполнены исследования температурной зависимости намагниченности в слабых магнитных полях соединений  $Ce_2Fe_{16}MH_y$ , а также, для сравнения, соединений  $Lu_2Fe_{16}MH_y$  и  $Y_2Fe_{16}MH_y$  ( $M = Fe, Mn, Si, Cr, Ni, 0 \leq y \leq 2$ ). Впервые измерения были проведены на монокристаллических образцах как исходных соединений, так и их гидридов, что позволило получить достоверные сведения об особенностях поведения температурной зависимости намагниченности и сделать выводы (используя данные нейтронографических исследований) о магнитной структуре и влиянии на нее водорода, внедренного в кристаллическую решетку.

**Ключевые слова:** редкоземельные интерметаллиды, гидриды, магнитные фазовые переходы.

In this work the influence of hydrogen on magnetic properties of  $R_2(Fe,M)_{17}$  ( $R = Ce, Lu, Y; M = Fe, Mn, Si, Cr, Ni$ ) compounds is reported. Special attention is given to the compounds with Ce because Ce ions might be in a mixed-valence state. Measurements of the temperature dependence of magnetization in weak magnetic fields were performed for  $Ce_2Fe_{16}MH_y$  compounds and compared with those for  $Lu_2Fe_{16}MH_y$  and  $Y_2Fe_{16}MH_y$  ( $M = Mn, Si, Cr, Ni, 0 \leq y \leq 2$ ). For the first time, investigation of the parent and hydrogenated compounds was carried out on single-crystalline samples. This allowed us to obtain reliable data on peculiarities of the temperature dependence of magnetization and drew conclusions (using the neutron diffraction data) on magnetic states affected by hydrogen intrusion.

**Key words:** rare-earth intermetallics, hydrides, magnetic phase transitions.

### **Введение**

Поиск новых материалов, способных значительным образом менять свои магнитные свойства под влиянием внешних факторов, таких как температура, магнитное поле, давление и которые могли бы служить рабочим элементом высокочувствительных датчиков в атомной, авиационной и космической промышленности, широко проводится в настоящее время во многих ведущих научно-исследовательских лабораториях мира. Особое внимание в атомной промышленности уделяется конструированию датчиков, способных работать в условиях агрессивной среды, содержащей водород, в широком интервале темпера-

тур, включая как низкие температуры, так и высокие, значительно превышающие комнатную температуру.

Известно [1], что большинство соединений  $R_2Fe_{17}$  (где R — редкоземельный металл (РЗМ)) являются ферромагнетиками с температурами Кюри ( $T_C$ ) порядка 300 – 450 К. Наличие столь невысоких (по сравнению с  $T_C = 1050$  К для чистого Fe) значений температур Кюри в этих соединениях обычно объясняют на основе классических представлений о зависимости энергии обменных взаимодействий от расстояний между ионами [2]. В соединениях  $R_2Fe_{17}$  расстояния между ионами Fe таковы, что наряду с положительными существуют отрицательные обменные взаимодействия.

Уникальные свойства интерметаллических соединений с церием изучаются давно и достаточно активно [3 – 5]. Ионы церия в  $R_2Fe_{17}$  обладают промежуточной валентностью ( $Ce^{3+}$  и  $Ce^{4+}$ ) и имеют наименьший размер среди РЗМ (как и ионы лютеция, вследствие лантаноидного сжатия). В результате этого в соединениях  $Ce_2Fe_{17}$  и  $Lu_2Fe_{17}$  расстояния между ближайшими атомами Fe оказываются настолько короткими, что отрицательные обменные взаимодействия доминируют над положительными. Нейтронографические исследования [6, 7], проведенные для соединений  $Ce_2Fe_{17}$  и  $Lu_2Fe_{17}$ , показали, что в данных соединениях в области магнитного упорядочения формируется сложная неколлинеарная (антиферромагнитная (АФМ)) структура, которая при понижении температуры трансформируется в коллинеарную ферромагнитную (ФМ). Температуры Нееля для соединений  $Ce_2Fe_{17}$  и  $Lu_2Fe_{17}$  равны 205 и 275 К, соответственно.

Влияние легирования на кристаллографические и магнитные параметры соединений  $R_2Fe_{17}$  ( $R = Ce, Lu$ ) также активно исследуются на протяжении двух последних десятилетий [3 – 5, 8 – 11]. Установлено, что в случае твердых растворов  $R_2Fe_{16}M$  (где  $M$  — атом замещения) важную роль в формировании магнитного порядка (ФМ или АФМ) играют свойства замещающего атома. Обнаружено, что замещение в  $R_2Fe_{17}$  ( $R = Ce, Lu$ ) одного атома Fe на атом Al сопровождается расширением кристаллической решетки (увеличением расстояний в парах Fe – Fe) и приводит к коллинеарному ферромагнетизму [9], в то время как замещение Fe на атом Mn в  $Ce_2Fe_{17}$ , наоборот, приводит к антиферромагнетизму [10], хотя объем элементарной ячейки также возрастает. Коллинеарный ферромагнетизм возникает в соединениях  $R_2Fe_{17}$  ( $R = Ce, Lu$ ) при замещении одного атома Fe на атом Si, несмотря на то, что кристаллическая решетка сжимается, и расстояния в парах Fe – Fe уменьшаются [11].

Как атомы замещения, так и атомы внедрения (такие как водород, азот, углерод и др.) в соединениях  $R_2Fe_{17}$  ( $R = Ce, Lu$ ) могут значительным образом изменять объем элементарной ячейки и, как следствие, их магнитные свойства [12]. Кроме того, располагаясь вблизи атомов Ce и меняя его ближайшее окружение, атомы внедрения могут оказывать влияние и на степень локализации 4f-электронов. Таким образом, в соединениях  $R_2(Fe, M)_{17}$  существуют как минимум два основных механизма: “объемный” и “электронный”, которые взаимосвязаны между собой и оказывают влияние на формирование магнитного порядка.

Целью данной работы было исследование влияния водорода на магнитные свойства двухпод-

решеточных магнетиков:  $R_2Fe_{16}M$ , где  $R = Ce, Lu, Y$ ;  $M = Fe, Mn, Si, Cr, Ni$ . Поскольку ионы Y и Lu не обладают магнитными моментами, а возможный наведенный магнетизм достаточно слаб [13], это позволило нам проанализировать поведение подрешетки железа. Впервые измерения проводили на монокристаллических образцах (приготовленных с использованием высокочистых металлов), как исходных соединений, так и их гидридов, что значительным образом повысило надежность полученных результатов.

Как уже отмечалось выше, исследование подобных материалов важны не только с фундаментальной, но и с практической точки зрения, поскольку данные материалы, демонстрирующие фазовые переходы из одного магнитного состояния в другое под воздействием внешних факторов, могут быть использованы в качестве элементов датчиков различного назначения (а именно, датчиков температуры, давления, наличия водорода в среде в концентрациях, опасных для жизнедеятельности и др.).

#### Методика эксперимента

Образцы  $Ce_2Fe_{16}M$  ( $M = Fe, Mn$ ),  $Lu_2Fe_{16}M$  ( $M = Fe, Mn, Si, Cr, Ni$ ),  $Y_2Fe_{16}M$  ( $M = Fe, Mn$ ) были приготовлены индукционной плавкой из высокочистых металлов с последующим отжигом слитков при 900°C в течение 3 дней. Из полученных слитков  $Ce_2Fe_{16}M$  и  $Y_2Fe_{16}M$  были извлечены монокристаллы весом в 2 – 3 мг. Монокристаллы  $Lu_2Fe_{16}M$  были выращены методом Чохральского и весили до 30 мг. Ориентировку кристаллов проводили методом Лауэ. Гидриды были приготовлены стандартным методом в вакуумных установках путем поглощения водорода металлом после короткой термической активации [12]. Температурную зависимость намагниченности измеряли вдоль главных кристаллографических осей с помощью PPMS-9 и SQUID магнитометров (Quantum Design, USA).

#### Результаты и обсуждение

Соединения  $R_2Fe_{17}$  образуются в двух достаточно близких модификациях кристаллической структуры: ромбоэдрической типа  $Th_2Zn_{17}$  для лёгких РЗМ ( $Ce_2Fe_{17}$ ), либо гексагональной структуры типа  $Th_2Ni_{17}$  для тяжёлых РЗМ и иттрия. Гидрирование и замещение атомов Fe другими элементами не приводит к изменению типа кристаллической структуры [8 – 12]. Параметры элементарной ячейки всех исследованных соединений  $R_2Fe_{16}M$  ( $R = Ce, Lu$  и Y;  $M = Fe, Mn, Si, Cr, Ni$ ) и их гидридов приведены в

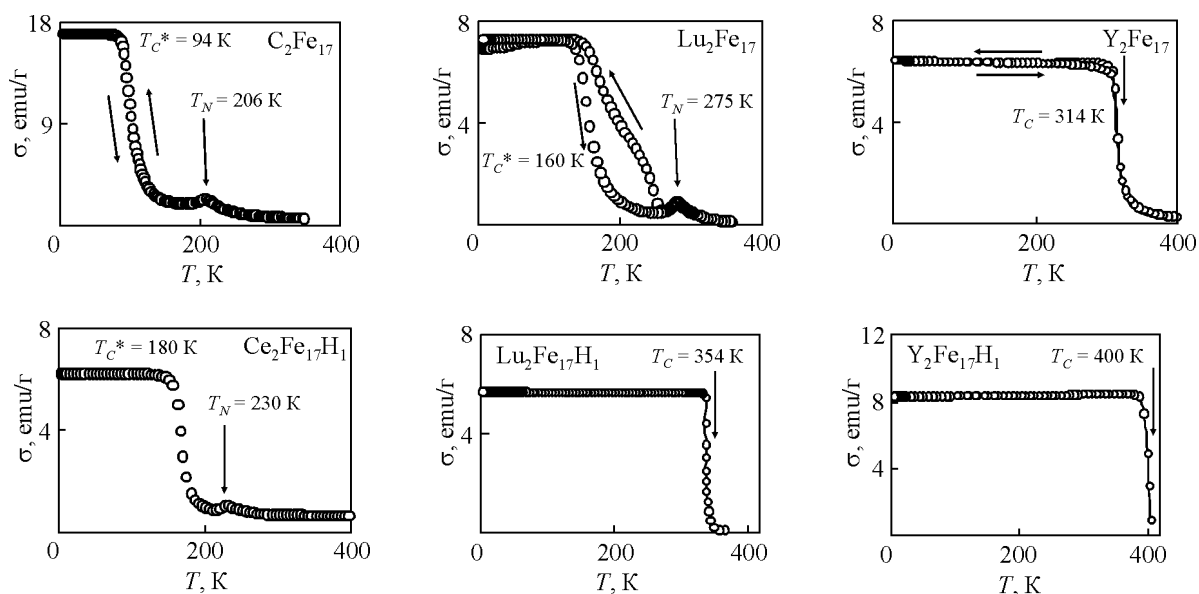


Рис. 1. Температурная зависимость намагниченности монокристаллов  $R_2Fe_{17}$  и  $R_2Fe_{17}H_1$  ( $R = Ce, Lu, Y$ ), измеренная вдоль оси  $a$  в магнитном поле 1 кЭ.

таблице. Видно, что замещение одного атома Fe на атомы Mn, Si, Cr, Ni в  $R_2Fe_{17}$  приводит к уменьшению объема элементарной ячейки ( $V$ ) (кроме случая  $Y_2Fe_{16}Mn$ , когда объем возрастает на 0,25 %), в то время как гидрирование всегда приводит к увеличению  $V$ . Причем, чем больше содержание водорода, тем больше изменение объема элементарной ячейки (относительное изменение объема элементарной ячейки при гидрировании  $\Delta V/V$  показано в таблице).

На рис. 1 показаны температурные зависимости намагниченности  $\sigma(T)$  соединений  $Ce_2Fe_{17}$ ,  $Lu_2Fe_{17}$ ,  $Y_2Fe_{17}$  и их гидридов, измеренные в относительно слабом внешнем магнитном поле ( $H = 1$  кЭ), другими словами, приведены результаты термомагнитного анализа. Видно, что соединения  $Ce_2Fe_{17}$  и  $Lu_2Fe_{17}$  демонстрируют по два магнитных фазовых перехода: 1) переход из ФМ в АФМ состояние при температурах  $T_C^* = 94$  и  $160$  К, соответственно ( $T_C^*$  определяли как температуру наиболее резкого падения намагниченности, то есть температура, где  $\left| \frac{d\sigma}{dT} \right|$  максимальна), и

2) переход из АФМ в парамагнитное состояние при температурах  $T_N = 206$  и  $275$  К, соответственно ( $T_N$  определяли по пику температурной зависимости намагниченности). Как уже отмечалось выше, сложное поведение температурной зависимости намагниченности  $\sigma(T)$  и магнитная структура этих соединений были подробно изучены с помощью магнитометрического и нейтронографического методов [6, 7]. Результаты наших исследований, а

именно, наличие широкого температурного гистерезиса намагниченности у соединения  $Lu_2Fe_{17}$ , значения температур магнитных фазовых переходов совпадают с результатами исследования [6, 7]. В отличие от  $Ce_2Fe_{17}$  и  $Lu_2Fe_{17}$  соединение  $Y_2Fe_{17}$  демонстрирует типичное для ферромагнетиков поведение. Температура Кюри  $Y_2Fe_{17}$  равна 314 К.

Из рис. 1 также видно, что гидрирование соединения  $Y_2Fe_{17}$  приводит к увеличению  $T_C$  (для  $Y_2Fe_{17}H_1$   $T_C = 400$  К). Введение одного атома водорода в кристаллическую решетку  $Lu_2Fe_{17}$  приводит к полному подавлению АФМ-состояний и индуцированию ФМ-состояний, также с достаточно высокой температурой Кюри ( $T_C = 354$  К). В гидриде  $Ce_2Fe_{17}H_1$  сложная неколлинеарная структура сохраняется, однако как  $T_N$ , так и  $T_C^*$ , сдвигаются в сторону более высоких температур ( $T_N$  становится равной 230 К, тогда как  $T_C^* = 180$  К).

Как уже указывалось выше, гидрирование сопровождается увеличением объема элементарной ячейки. Для понимания тех физических механизмов, которые ответственны за трансформацию магнитных свойств гидридов  $Ce_2Fe_{17}H_1$  и  $Lu_2Fe_{17}H_1$  представляло интерес проанализировать поведение гидридов в условиях приложенного внешнего гидростатического давления (при котором, наоборот, происходит уменьшение объема элементарной ячейки). На рис. 2 показана фазовая диаграмма гидрида  $Ce_2Fe_{17}H_1$  [14] и, для сравнения, для гидрида  $Lu_2Fe_{17}H_1$  (по результатам наших измерений). Видно, что в обоих случаях гидростатическое давление стремится либо

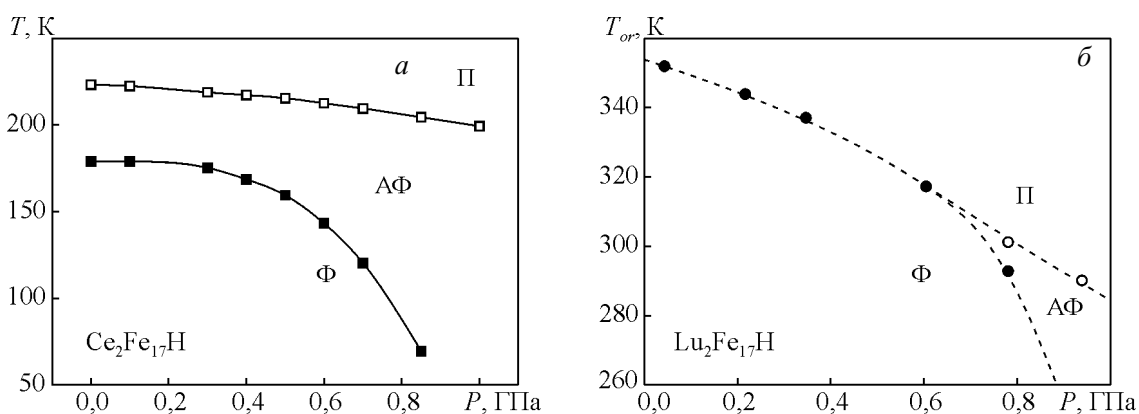


Рис. 2. Фазовая диаграмма гидридов  $Ce_2Fe_{17}H_1$  (а, по данным работы [14]) и  $Lu_2Fe_{17}H_1$  (б).

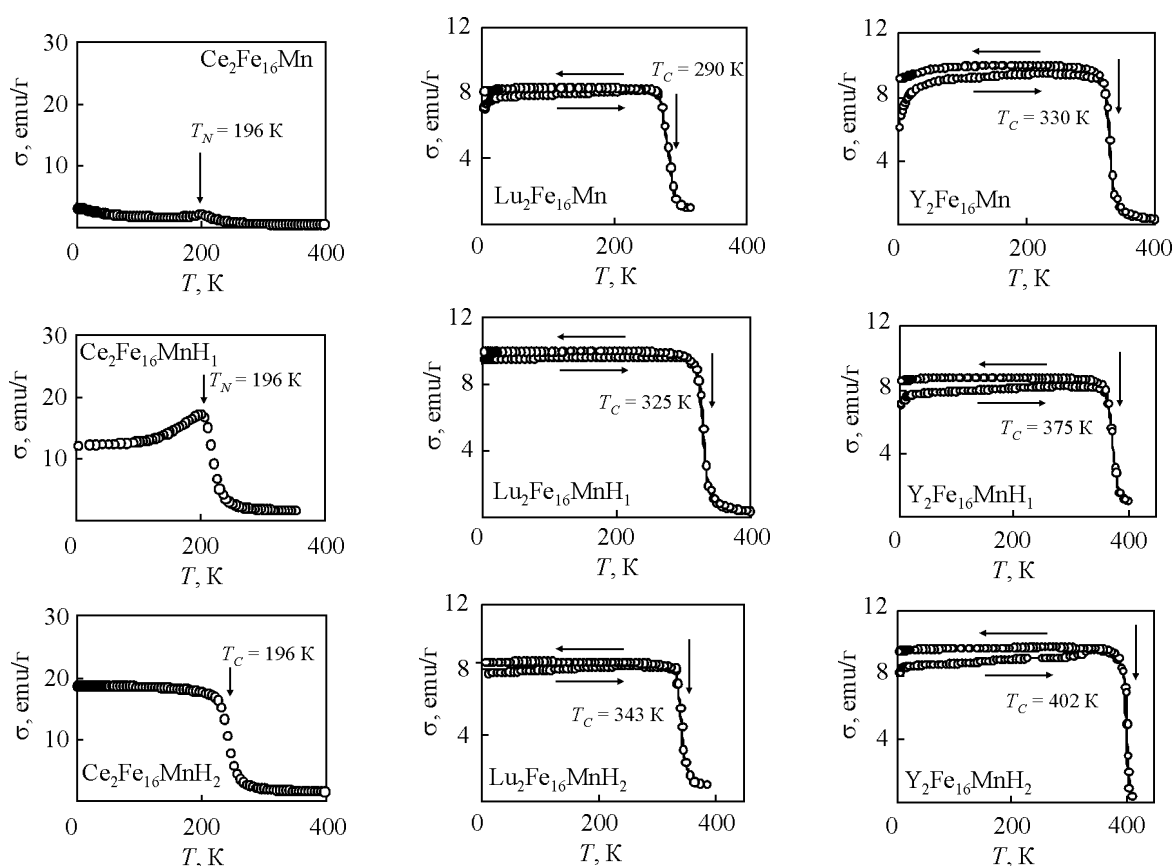


Рис. 3. Температурная зависимость намагниченности монокристаллов  $R_2Fe_{16}Mn$ ,  $R_2Fe_{16}MnH_1$  и  $R_2Fe_{16}MnH_2$  ( $R = Ce, Lu, Y$ ), измеренная вдоль оси  $a$  в магнитном поле 1 кЭ.

восстановить антиферромагнетизм (как в случае  $Lu_2Fe_{17}H_1$ ), либо расширить область температур, в которой наблюдаются АФМ-состояния (как в случае  $Ce_2Fe_{17}H_1$ ). Выполненный нами в работе [15] для гидрида  $Lu_2Fe_{17}H_1$  расчет скорости уменьшения температуры магнитного упорядочения ( $T_C$ ) с увеличением давления (уменьшением объема элементарной ячейки) показал, что и в данном соединении

наряду с объемным эффектом необходимо, по-видимому, учитывать эффект, связанный с изменением электронной структуры гидрида. Изменение электронной структуры происходит вследствие возрастания числа добавленных (от атомов водорода)  $s$ -электронов. Для объяснения более сложной (по сравнению с  $Lu_2Fe_{17}H_1$ ) фазовой диаграммы гидрида  $Ce_2Fe_{17}H_1$  можно предположить, что в данном соединении

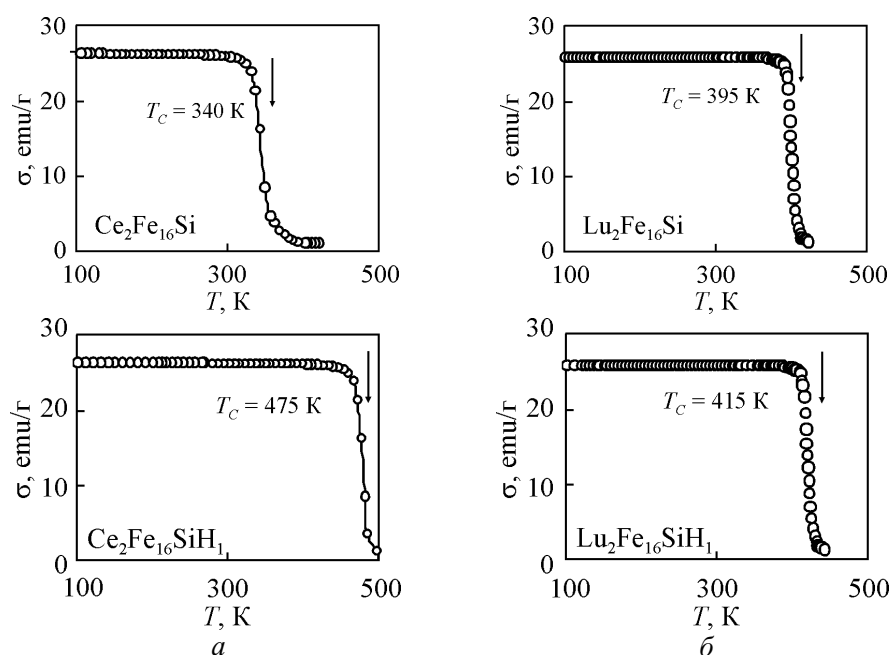


Рис. 4. Температурная зависимость намагниченности монокристаллов  $\text{Ce}_2\text{Fe}_{16}\text{Si}$  (а, по данным работы [17]) и  $\text{Lu}_2\text{Fe}_{16}\text{Si}$  (б) их гидридов, измеренная вдоль оси  $a$  в магнитном поле 1 кЭ.

изменение электронной структуры происходит еще и вследствие изменения валентности ионов Се.

Далее мы провели сравнительное исследование легированных марганцем составов  $\text{R}_2\text{Fe}_{16}\text{Mn}$ , где  $\text{R} = \text{Ce}, \text{Y}$  и  $\text{Lu}$  и их гидридов  $\text{R}_2\text{Fe}_{16}\text{MnH}_x$  с содержанием водорода  $x = 1$  и  $2$  (рис. 3). Прежде всего, было обнаружено, что замещение одного атома Fe на атом Mn приводит к уменьшению объема элементарной ячейки в случае  $\text{R} = \text{Ce}$  и  $\text{Lu}$  и, наоборот, к возрастанию  $V$  в случае  $\text{R} = \text{Y}$ . Анализ температурных зависимостей намагниченности этих же соединений показал, что данное легирование приводит к полному подавлению ФМ-состояний в соединении с церием ( $\text{Ce}_2\text{Fe}_{16}\text{Mn}$ ) и индуцированию АФМ неколлинеарной магнитной структуры во всей области температур магнитного упорядочения вплоть до  $T_N = 196$  К [16], тогда как соединения с иттрием и лютецием ( $\text{Lu}_2\text{Fe}_{16}\text{Mn}$  и  $\text{Y}_2\text{Fe}_{16}\text{Mn}$ ) являются ферромагнетиками с температурами Кюри 290 и 330 К, соответственно. Столь резкое отличие в поведении намагниченности  $\sigma(T)$  соединений  $\text{Ce}_2\text{Fe}_{16}\text{Mn}$ ,  $\text{Lu}_2\text{Fe}_{16}\text{Mn}$  и  $\text{Y}_2\text{Fe}_{16}\text{Mn}$  связано, по-нашему мнению, со свойствами подрешетки церия. Степень локализации 4f-электронов Се, возможно, изменяется при замещении одного атома Fe на атом Mn (кроме того, как было сказано выше, соединения с Се обладают ромбоэдрической структурой в отличие от соединений с Lu и Y), что приводит к изменению магнитного момента и радиуса ионов Се. Это и оказывает влияние на формирование АФМ-порядка в соединении  $\text{Ce}_2\text{Fe}_{16}\text{Mn}$ . В гидриде

$\text{Ce}_2\text{Fe}_{16}\text{MnH}_1$  сложная неколлинеарная магнитная структура сохраняется [10]. Впервые мы наблюдали, что гидрирование не привело к изменению температуры магнитного упорядочения ( $T_N = 196$  К). При концентрациях водорода  $x \geq 2$  наблюдалось полное подавление АФМ-состояний в  $\text{Ce}_2\text{Fe}_{16}\text{MnH}_x$ . Как видно из рис. 3, гидрид  $\text{Ce}_2\text{Fe}_{16}\text{MnH}_2$  демонстрирует ФМ-поведение (температура Кюри равна 240 К). Гидрирование соединений  $\text{Lu}_2\text{Fe}_{16}\text{Mn}$  и  $\text{Y}_2\text{Fe}_{16}\text{Mn}$  также приводит к увеличению температуры Кюри (рис. 3). Чем выше содержание водорода, тем выше  $T_C$ .

Нами также было изучено влияние гидрирования на магнитные свойства монокристаллов  $\text{Lu}_2\text{Fe}_{16}\text{M}$ , где  $\text{M} = \text{Ni}, \text{Cr}, \text{Si}$ . В этих соединениях (также как и в соединении  $\text{Lu}_2\text{Fe}_{16}\text{Mn}$ ) наблюдается полное подавление АФМ-состояний и индуцирование ФМ-состояния с достаточно высокими (почти на 100 К выше, чем  $T_N$ ) температурами Кюри (таблица). Видно, что все замещения атомов Fe на атомы Ni, Cr, Si приводят к уменьшению объема элементарной ячейки, в то время как гидрирование, наоборот, способствует его увеличению. Температура Кюри растет как в случае атомов замещения, так и в случае атомов внедрения, демонстрируя тот факт, что “объемный эффект” не является основным (доминирующим) для этих соединений.

На рис. 4 показана температурная зависимость намагниченности соединений  $\text{Ce}_2\text{Fe}_{16}\text{Si}$  [17] и  $\text{Lu}_2\text{Fe}_{16}\text{Si}$  (по результатам наших измерений). Из рис. 4 видно, что оба соединения демонстрируют

Таблица

Кристаллографические характеристики, температуры Кюри и Нееля соединений  $R_2Fe_{16}M$  (R = Ce, Lu и Y; M = Fe, Mn, Si, Cr, Ni) и их гидридов

Соединения	$a, \text{Å}$	$c, \text{Å}$	$V, \text{Å}^3$	$\Delta V/V, \%$	$T_C, \text{K}$	$T_N, \text{K}$
$Ce_2Fe_{17}$	8,490	12,413	774,8	—	—	206
$Ce_2Fe_{17}H_1$	8,520	12,411	780,2	0,7	—	230
$Lu_2Fe_{17}$	8,395	8,293	506,1	—	—	275
$Lu_2Fe_{17}H_1$	8,412	8,294	508,2	0,4	354	—
$Y_2Fe_{17}$	8,471	8,309	516,4	—	314	—
$Y_2Fe_{17}H_1$	8,488	8,311	518,5	0,4	400	—
$Ce_2Fe_{16}Mn$	8,488	12,402	773,8	—	—	196
$Ce_2Fe_{16}MnH_1$	8,516	12,400	778,8	0,6	—	196
$Ce_2Fe_{16}MnH_2$	8,559	12,405	787	1,7	240	—
$Lu_2Fe_{16}Mn$	8,378	8,291	504	—	290	—
$Lu_2Fe_{16}MnH_1$	8,418	8,321	510,6	1,3	325	—
$Lu_2Fe_{16}MnH_2$	8,456	8,322	515,3	2,2	343	—
$Y_2Fe_{16}Mn$	8,478	8,317	517,7	—	330	—
$Y_2Fe_{16}MnH_1$	8,504	8,329	521,6	0,7	375	—
$Y_2Fe_{16}MnH_2$	8,530	8,341	525,6	1,5	402	—
$Lu_2Fe_{16}Ni$	8,397	8,285	505,9	—	377	—
$Lu_2Fe_{16}NiH_1$	8,404	8,277	506,2	0,1	400	—
$Lu_2Fe_{16}NiH_{1.5}$	8,446	8,285	511,8	1,2	443	—
$Lu_2Fe_{16}Cr$	8,382	8,304	505,3	—	377	—
$Lu_2Fe_{16}CrH_1$	8,395	8,290	505,9	0,1	385	—
$Lu_2Fe_{16}CrH_{1.5}$	8,414	8,309	509,5	0,8	395	—
$Lu_2Fe_{16}Si$	8,380	8,277	503,4	—	395	—
$Lu_2Fe_{16}SiH_1$	8,399	8,271	505,3	0,4	415	—
$Lu_2Fe_{16}SiH_{1.5}$	8,413	8,275	507,2	0,8	433	—

ферромагнетизм во всей области магнитного упорядочения. Температуры Кюри составляют 340 и 395 К, соответственно. Следовательно, тип атомов замещения оказывает значительное влияние на формирование магнитного порядка в соединениях с церием: в зависимости от природы атомов замещения соединения  $Ce_2Fe_{16}M$  могут быть либо ферромагнетиками (например, в случае  $M = Si$ ), либо антиферромагнетиками (когда  $M = Mn$ ) во всем интервале температур магнитного упорядочения. Изученные же нами соединения  $Lu_2Fe_{16}M$  ( $M = Mn, Si, Cr, Ni$ ) и  $Y_2Fe_{16}M$  ( $M = Mn$ ) демонстрируют исключительно ФМ-тип упорядочения.

Из рис. 4 также видно, что введение одного атома водорода в кристаллическую решетку соединений  $R_2Fe_{16}Si$  ( $R = Ce, Lu$ ) приводит к увеличению температуры Кюри, причем если в случае соединения с лутецием это возрастание составляет всего 20 К/атом H, то в случае  $Ce_2Fe_{16}Si$  авторы работы [17] наблюдали гигантское изменение температуры Кюри, а именно  $\Delta T_C = 135$  К/атом H.

Таким образом, анализ полученных в данной работе результатов свидетельствует о том, что атомы внедрения в соединениях  $R_2Fe_{16}M$  ( $R = Ce, Lu, Y; M = Fe, Mn, Si, Cr, Ni$ ) способны значительным образом влиять как на тип магнитного порядка, так и

на температуры переходов из магнитоупорядоченного состояния в парамагнитное.

## Выводы

1. Впервые проведено сравнительное исследование влияния водорода на магнитные свойства монокристаллов  $R_2Fe_{16}M$  ( $R = Ce, Lu, Y; M = Fe, Mn, Si, Cr, Ni$ ), полученных с использованием высокочистых веществ.

2. Установлено, что атомы внедрения (водорода) оказывают существенное влияние на объем элементарной ячейки, приводя к его увеличению, в отличие от атомов замещения, которые могут как увеличивать, так и уменьшать  $V$ .

3. В соединении  $Ce_2Fe_{17}$  замещение одного атома Fe атомом Mn сопровождается уменьшением объема элементарной ячейки ( $V$ ) и индуцирует АФМ-структуру во всей области температур магнитного упорядочения ( $T_N = 196$  К). Введение водорода в кристаллическую решетку соединения  $Ce_2Fe_{16}Mn$  приводит к увеличению  $V$  и подавлению АФМ-состояния в гидридах  $Ce_2Fe_{16}MnH_x$  только при содержании водорода  $x \geq 2$ .

4. В соединении  $Lu_2Fe_{17}$  замещение атомов Fe атомами Mn, Si, Ni и Cr также сопровождается сжатием кристаллической решетки и приводит к полному подавлению АФМ и индуцированию ФМ-состояний с достаточно высокими температурами Кюри (290 – 395 К). Введение атомов водорода в кристаллическую решетку этих соединений вызывает как увеличение объема элементарной ячейки, так и увеличение температур Кюри (385 – 445 К).

5. Установлено, что в гидридах  $R_2Fe_{16}M$  ( $R = Ce, Lu, Y; M = Fe, Mn, Si, Cr, Ni$ ), при формировании магнитного порядка огромную роль играют объемные эффекты (вследствие увеличения расстояний между ионами Fe), а также эффекты, связанные с изменением электронной структуры. Изменение электронной структуры происходит как вследствие возрастания числа добавленных (от атомов водорода) s-электронов, так и, вследствие изменения валентности ионов Ce (в соединениях с церием).

*Работа поддержана грантом РФФИ № 10-03-00848.*

## Литература

- Garcia-Landa B., Algarabel P.A., Ibarra M.R., Kayzel F.E., Ahn T.H., Franse J.J.M.. Magnetization measurements on  $RE_2Fe_{17}$  single crystals. J. Magn. Magn. Mater., 1995, v. 140 – 144, p. 1085 – 1086.

- Вонсовский С.В. Магнетизм. М.: Наука, 1971, 1032 с.
- Makihara Y., Uwatoko Y., Matsuoka H., Kosaka M., Fukuda H., Fujii H. Magnetism in single crystal  $Ce_2Fe_{17}$  with two types of magnetic ground states. *J. Magn. Magn. Mater.*, 2004, v. 272 – 276, p. 551 – 552.
- Medvedeva I., Arnold Z., Kuchin A., Kamarad J. High pressure effect on magnetic properties and volume anomalies of  $Ce_2Fe_{17}$ . *J. Appl. Phys.*, 1999, v. 86, no. 11, p. 6295 – 6300.
- Isnard O., Miraglia S., Fruchart D., Giorgetti C., Pizzini S., Dartyge E., Krill G., Kappler J.P. Magnetic study of the  $Ce_2Fe_{17}H_x$  compounds: Magnetic circular x-ray dichroism, x-ray-absorption near-edge structure, magnetization, and diffraction results. *Phys. Rev. B*, 1994, v. 49, no. 22, p. 15692 – 15701.
- Givord D., Lemaire R. Magnetic transition and anomalous thermal expansion in  $R_2Fe_{17}$  compounds. *IEEE Trans. Mag.*, 1974, v. 10, p. 109 – 113.
- Givord D., Lemaire R., Moreau J.M., Roudaut E.X. X-ray and neutron determination of a so-called  $Th_2Ni_{17}$ -type structure in the lutetium-iron system. *J. Less Common Met.*, 1972, v. 29, no. 4, p. 361 – 369.
- Middleton D.P., Mishra S.R., Long Gary J., Pringle O.A., Hu Z., Yelon W.B., Grandjean F., Buscow K.H.J. A magnetic, neutron diffraction, and Mössbauer spectral study of the  $Ce_2Fe_{17-x}Si_x$  solid solutions. *J. Appl. Phys.*, 1995, v. 78, no. 9, p. 5568 – 5576.
- Кучин А., Ермоленко А., Храбров В. Магнитное состояние псевдобинарных сплавов  $Lu_2Fe_{15.3}M_{1.7}$  и  $Ce_2Fe_{15.3}M_{1.7}$  (M = Si или Al). *ФММ*, 1998, т. 86, № 3, с. 74 – 80.
- Nikitin S.A., Tereshina I.S., Pankratov N.Yu., Louchev D.O., Burkhanov G.S., Kuchin A.G., Iwasieczko W., Drulis H. Change of magnetic state in a  $Ce_2Fe_{16}Mn$  single crystal upon hydrogenation. *J. Alloys Comp.*, 2004, v. 365, p. 80 – 83.
- Tereshina I.S., Nikitin S.A., Louchev D.O., Tereshina E.A., Andreev A.V., Drulis H. Effect of hydrogenation on magnetic ordering temperature in  $Lu_2(Fe,Si)_{17}$  compounds. *J. Magn. Magn. Mater.*, 2006, v. 300, p. E497 – E499.
- Tereshina I.S., Nikitin S.A., Verbetsky V.N., Salamova A.A. Transformations of magnetic phase diagram as a result of insertion of hydrogen and nitrogen atoms in the crystalline lattice of  $R_2Fe_{17}$  compounds. *J. Alloys and Comp.*, 2002, v. 336, p. 36 – 40.
- Moze O., Caciuffo R., Gillon B., Calestani G., Kayzel F.E., Franse J.J.M. Polarized-neutron-diffraction study of the magnetization density in hexagonal  $Y_2Fe_{17}$ . *Phys. Rev. B*, 1994, v. 50, p. 9293 – 9299.
- Niziol S., Zach R., Bacmann M., Fruchart D., Isnard O., Miraglia S., Soubeyroux J.L. Magnetic properties of  $Ce_2Fe_{17}H_x$  hydrides under hydrostatic pressure. *J. Alloys Comp.*, 1997, v. 262 – 263, p. 202 – 205.
- Tereshina E.A., Yoshida H., Andreev A.V., Tereshina I.S., Koyama K., Kanomata T. Interplay between hydrogenation and pressure effects in magnetism of  $Lu_2Fe_{17}$  single crystal. *High Pressure Research*, 2006, v. 26, p. 485 – 488.
- Kuchin A.G., Pirogov A.N., Khrabrov V.I., Teplykh A.E., Ermolenko A.S., Belozerov E.V. Magnetic and structural properties of  $Ce_2Fe_{17-x}Mn_x$  compounds. *J. Alloys Comps.*, 2000, v. 313, p. 7 – 12.
- Artigas M., Fruchart D., Gasdeblay C., Isnard O., Miraglia S. Structural, magnetic and hydrogenation properties of  $R_2Fe_{17-x}Si_x$  compounds (R = rare earth element): II. Effects of hydrogen insertion on the magnetic properties (R = Ce, Nd;  $0 \leq x \leq 5$ ). *J. Alloys Comps.*, 1999, v. 291, p. 282 – 288.

**Терёшина Евгения Александровна** — Институт Физики Чешской Академии Наук, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник. Специалист в области магнитных явлений. Email: [teresha@fzu.cz](mailto:teresha@fzu.cz).

**Никитин Сергей Александрович** — Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, Физический факультет, доктор физико-математических наук, профессор, профессор. Специалист в области физики магнитных явлений. E-mail: [nikitin@phys.msu.ru](mailto:nikitin@phys.msu.ru).

**Андреев Александр Владимирович** — Институт Физики Чешской Академии Наук, доктор физико-математических наук, профессор. Специалист в области магнитных явлений. Email: [a.andreev@seznam.cz](mailto:a.andreev@seznam.cz).

**Терёшина Ирина Семеновна** — Институт металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова РАН (г. Москва), доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник. Специалист в области физики магнитных явлений. E-mail: [teresha@ultra.imet.ac.ru](mailto:teresha@ultra.imet.ac.ru).

**Ивасечко Вацек** — Институт низких температур и структурных исследований Польской Академии Наук, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник. Специалист в области гидридов. Email: [iwasiecz@int.pan.wroc.pl](mailto:iwasiecz@int.pan.wroc.pl).

**Друлис Генри** — Институт низких температур и структурных исследований Польской Академии Наук, доктор физико-математических наук, профессор. Специалист в области гидридов. Email: [H.Drulis@int.pan.wroc.pl](mailto:H.Drulis@int.pan.wroc.pl).