

## Структурные и магнитные фазовые превращения в сплавах псевдобинарной системы $(\text{Sm}_{1-x}\text{Tb}_x)\text{Fe}_2$

А. С. Илюшин, Е. В. Солодов, З. С. Умхаева

---

Методами низкотемпературной рентгеновской дифрактометрии поликристаллов изучены фазовый состав, атомно-кристаллическая структура и структурные и магнитные превращения в сплавах псевдобинарной системы  $(\text{Sm}_{1-x}\text{Tb}_x)\text{Fe}_2$ , синтезированных при давлении 8 ГПа. Определены кристаллоструктурные характеристики фаз и построена спин-ориентационная магнитная фазовая диаграмма системы  $(\text{Sm}_{1-x}\text{Tb}_x)\text{Fe}_2$  в координатах "состав – температура".

**Ключевые слова:** структурные и магнитные превращения, псевдобинарная система  $(\text{Sm}_{1-x}\text{Tb}_x)\text{Fe}_2$ , спин-ориентационная магнитная фазовая диаграмма.

---

Alloys of the of the pseudobinary system  $(\text{Sm}_{1-x}\text{Tb}_x)\text{Fe}_2$  were synthesized at a pressure of 8 GPa. Phase composition, atomic-crystal structure, and the magnetic and structural transformations in alloys were studied by the methods of low-temperature X-ray diffractometry of polycrystals and Mössbauer spectroscopy. Crystal structure characteristics of high pressure phases were defined and the spin-orientational magnetic phase diagram of the system  $(\text{Sm}_{1-x}\text{Tb}_x)\text{Fe}_2$  was built in the coordinates the "composition – temperature".

**Keywords:** magnetic and structural transformations, pseudobinary system  $(\text{Sm}_{1-x}\text{Tb}_x)\text{Fe}_2$ , spin-orientational magnetic phase diagram.

---

### Введение

В последние годы стали широко использоваться новые методы синтеза сплавов с использованием технологий синтеза, протекающего в экстремальных условиях. Одной из таких технологий является совместное воздействие на вещество высоких давлений и высоких температур. Благодаря этому, уже были получены такие выдающиеся по физико-химическим свойствам материалы, как искусственные алмазы и композиты на основе нитрида бора.

При использовании таких технологий в ряде случаев удается закристаллизовать вещества в таких структурных типах, которые не могут быть получены при обычных условиях синтеза [1, 2].

В последнее десятилетие нами было синтезировано при высоких давлениях и температурах большое количество псевдобинарных систем редкоземельных металлов с  $3d$ -переходными, а также и немагнитными металлами и проведено комплексное

изучение их фазового состава, атомно-кристаллической структуры, магнитных и сорбционных свойств, сверхтонких магнитных взаимодействий, а также изучены фазовые превращения в них [3]. Большинство из этих систем представляло собой псевдобинарные системы сплавов, изоструктурные фазам Лавеса C14 и C15.

Двойные интерметаллические соединения стехиометрии  $\text{RT}_2$ , кристаллизующиеся в структурных типах C14, C15 и C36, являются одними из самых распространенных интерметаллических соединений. Хотя они были открыты почти сто лет назад Дж. Фриофом, тем не менее, активный интерес к изучению их физико-химических свойств проявился только после того, как Ф. Лавес, определивший структуру интерметаллида  $\text{MgBi}_2$ , доказал родственность структурных типов трех представителей соединений  $\text{MgZn}_2$  (C14),  $\text{MgCu}_2$  (C15) и  $\text{MgNi}_2$  (C36) в отношении координации атомов. Эти структурные типы интерметаллических соединений получили название фаз Лавеса [4].

Усилиями металлургов и металлофизиков было открыто свыше трехсот интерметаллических соединений со структурами фаз Лавеса, причем было замечено, что большая их часть была обнаружена в системах переходных металлов. К началу 60-х годов XX века были сформированы основные представления о структурных эволюциях, протекающих в этих соединениях. Обширное обобщение большинства установленных закономерностей было сделано в монографии [5].

Соединения стехиометрии  $RT_2$  редкоземельных R-металлов с  $3d$ -переходными T-металлами кристаллизуются только в двух структурных типах фаз Лавеса с гексагональной (C14) и с кубической (C15) симметрией.

Массовый интерес физиков к этим объектам возник во второй половине 60-х годов, благодаря обнаружению у редкоземельных фаз Лавеса выдающихся магнитных свойств и, в частности, открытию так называемой “гигантской” магнитострикции [6–10]. С этого времени редкоземельные фазы Лавеса стали одними из популярнейших объектов исследования как физиками-экспериментаторами, так и физиками-теоретиками.

Первых привлекала возможность выявлять на этих объектах разнообразные фазовые превращения (структурные и магнитные) и управлять ими с помощью атомного замещения или путем изменения температуры. Наличие же во многих фазах Лавеса в качестве из компонентов мессбауэровских изотопов (в частности, таких широко распространенных как  $^{57}\text{Fe}$  и  $^{119}\text{Sn}$ ) привлекло многочисленных физиков-ядерщиков к их исследованию методами резонансного поглощения гамма-квантов.

Для теоретиков эти интерметаллические соединения стали, благодаря их относительно простой структуре, удобными моделями для проведения теоретических расчетов с использованием современных квантово-механических представлений [11, 12].

Создание нового класса веществ, представляющего собой фазы высокого давления, существенно расширило спектр объектов исследования и дало возможность физикам и химикам ставить новые задачи. Известно [6–10], что редкоземельные фазы Лавеса, сформированные из магнитных металлов, могут быть как ферромагнетиками, так и ферри-магнетиками. Чаще всего, их представляют в виде двух подрешеточных магнетиков — одна подрешетка состоит из редкоземельных R-ионов, а другая — из  $3d$ -переходных T-ионов.

Большинство соединений стехиометрии  $RT_2$  обладают коллинеарными магнитными структурами, у которых магнитные моменты R и T подрешеток

параллельны друг другу, причем для легких редкоземельных элементов суммарные магнитные моменты  $M_R$  и  $M_T$  редкоземельной и  $3d$ -переходной подрешеток направлены в одну и ту же сторону, поэтому полный магнитный момент равен:

$$M_{RT_2} = M_R + 2M_T.$$

Для тяжелых редкоземельных элементов суммарные магнитные моменты  $M_R$  и  $M_T$  редкоземельной и  $3d$ -переходной подрешеток антипараллельны, поэтому полный магнитный момент равен:

$$M_{RT_2} = M_R - 2M_T.$$

В первом случае температура их магнитного упорядочения будет температурой Кюри  $T_C$ , а во втором — температурой Нееля  $T_N$ .

Соединения стехиометрии  $RT_2$  легких редкоземельных металлов с  $3d$ -переходными, как правило, при обычных методах синтеза не кристаллизуются в структурных типах фаз Лавеса. Однако, используя методику синтеза при высоких давлениях и температурах, такие фазы можно получить.

Редкоземельные магнитострикционные материалы, созданные на основе эффекта гигантской магнитострикции в редкоземельном интерметаллическом соединении  $TbFe_2$  на протяжении нескольких десятилетий продолжают привлекать внимание металлофизиков и металлургов.

Поиск возможности управлять такими параметрами как магнитострикция и магнитоэлектрическая анизотропия путем синтеза многокомпонентных сплавов приводит к необходимости детального изучения магнитных и структурных превращений при изоморфных замещениях редкоземельных атомов R-подрешетках фаз Лавеса.

Перспективными с точки зрения управления магнитострикционными свойствами сплавов являются системы, позволяющие не только изменять величину коэффициента спонтанной магнитострикции, но в случае необходимости и его знак. Одной из таких систем и оказалась система  $(Sm_{1-x}Tb_x)Fe_2$ .

В данной работе нами была предпринята попытка методом синтеза при высоких давлениях и температурах получить сплавы псевдобинарной системы  $(Sm_{1-x}Tb_x)Fe_2$  для того, чтобы путем изоморфного замещения атомов самария атомами тербия в R-подрешетке менять тип магнитного порядка с ферромагнитного для  $SmFe_2$  на ферримагнитный для  $TbFe_2$ .

Цели настоящей работы:

— синтез сплавов псевдобинарной системы  $(Sm_{1-x}Tb_x)Fe_2$  при высоких давлениях и температуре для кристаллизации их в кубической фазе Лавеса C15, обеспечив непрерывное изоморфное замещение в

R-подрешетке легких магнитных редкоземельных атомов тяжелыми;

— определение фазового состава сплавов, их атомно-кристаллической структуры и кристаллоструктурных параметров и установление их зависимости от состава;

— изучение их магнитных свойств и построение их спин-ориентационной магнитной фазовой диаграммы в координатах “состав – температура”.

### Экспериментальная часть.

Аппаратура для синтеза сплавов при высоких температурах и давлениях, разработанная, сконструированная и изготовленная в Институте физики высоких давлений им. Л. Ф. Верещагина РАН (ИФВД РАН), описана в [13].

Синтез сплавов псевдобинарной системы  $(Sm_{1-x}Tb_x)Fe_2$  был осуществлен при давлении 8 ГПа и температуре 2000 °С в камере типа “Тороид” по методике, разработанной в ИФВД РАН А.П. Цвященко [14]. Экспериментальные детали конкретных манипуляций, относящихся непосредственно к синтезу систем с редкоземельными металлами, подробно описана в [15, 16].

Нами были синтезированы сплавы псевдобинарной системы  $(Sm_{1-x}Tb_x)Fe_2$  следующих составов:  $x = 0; 0,1; 0,2; 0,25; 0,3; 0,4; 0,5; 0,75; 1,0$ .

Основным методом исследования была выбрана рентгеновская дифрактометрия поликристаллов при комнатной и низких температурах на дифрактометре ДРОН 3М с использованием фильтрованного излучения от железного анода. Оригинальная низкотемпературная гелиевая приставка проточного типа к рентгеновскому дифрактометру, сконструированная и изготовленная А.П. Перовым в МГУ, описана в [17]. Она обеспечивала возможность записи рентгендифракционных спектров сплавов в автоматическом режиме при температурах в интервале от 5 до 300 К. В ряде случаев рентгеновские методы исследования дополняли методами мессбауэровской спектроскопии и магнитных измерений [18, 19]. Детальные описания этих методик даны в [20, 21].

Рентгеновский фазовый анализ сплавов псевдобинарной системы  $(Sm_{1-x}Tb_x)Fe_2$ , проведенный при комнатной температуре на порошковых образцах, показал, что сплавы всех синтезированных составов рентгеновски однофазны и их атомно-кристаллическая структура изотипна структуре кубической фазы Лавеса С15.

Измерения параметров элементарных ячеек сплавов псевдобинарной системы  $(Sm_{1-x}Tb_x)Fe_2$  показали, что параметр  $a$  с увеличением концент-

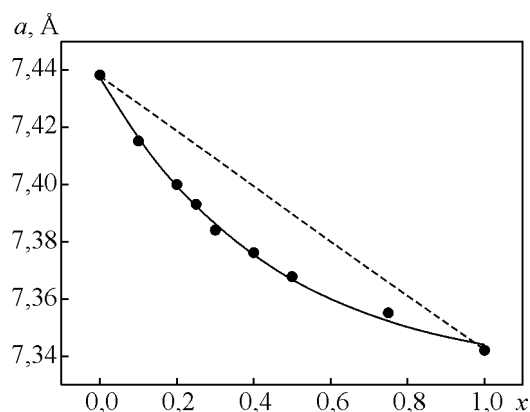


Рис. 1. Концентрационная зависимость  $a(x)$  для сплавов псевдобинарной системы  $(Sm_{1-x}Tb_x)Fe_2$ .

рации атомов тербия в системе от  $x = 0$  до  $x = 1$  монотонно уменьшается от 7,438 до 7,342 Å, а объем  $V_{RT_2}$ , приходящийся на формульную единицу  $RT_2$ , от 17,08 до 16,49 Å<sup>3</sup>.

Концентрационная зависимость  $a(x)$  для сплавов псевдобинарной системы  $(Sm_{1-x}Tb_x)Fe_2$  приведена на рис. 1.

Видно, что уменьшение величины  $a(x)$  с ростом  $x$  происходит монотонно, но нелинейно, и эта кривая демонстрирует отрицательное отклонение от правила Вегарда. Соответствующая зависимость показана на рис. 1 штриховой линией. Концентрационная зависимость объема  $V_{RT_2}(x)$  демонстрирует аналогичное поведение.

Детальное изучение профилей дифракционных максимумов на дифрактограммах порошковых образцов сплавов показало, что их форма отличается от формы профилей эталонных образцов интерметаллида  $YFe_2$ . Все дифракционные максимумы уширены, а в ряде случаев и расщеплены на составляющие. Такие трансформации формы дифракционных максимумов вызваны небольшими (порядка  $10^{-3}$ ) искажениями кубической атомно-кристаллической структуры сплавов.

В [22] одним из авторов настоящей статьи была разработана методика прецизионных рентгеновских исследований магнитных фазовых превращений дисторсионного типа в редкоземельных фазах Лавеса, позволяющая устанавливать в магнетиках кубической симметрии тип формирующегося в них магнитного порядка.

Проведенный с использованием этой методики анализ характера трансформации рентгенодифракционных спектров сплавов системы  $(Sm_{1-x}Tb_x)Fe_2$ , обнаруживающейся уже при комнатной температуре, показал, что кубическая структура всех сплавов

претерпела ромбоэдрические искажения. Это было вызвано тем, что спонтанный магнитный момент  $\mathbf{M}_{RT_2}$ , ориентированный вдоль кристаллографической оси типа  $\langle 111 \rangle$ , вызвал деформацию кристалла по этому направлению за счет спонтанной магнитострикции. Эти выводы об ориентации спонтанного магнитного момента были подтверждены и данными, полученными методом мессбауэровской спектроскопии.

Необходимо обратить внимание на следующее обстоятельство. В сплавах псевдобинарной системы  $(Sm_{1-x}Tb_x)Fe_2$ , составы которых находятся в пределах от  $x = 0$  до  $x = 0,4$  исходная кубическая ячейка C15 слегка сжата вдоль направления  $\langle 111 \rangle$ , поэтому величины ромбоэдрических искажений  $\varepsilon_{rh}$ , представляющие собой углы отклонения осей ромбоэдра от осей куба:

$$\varepsilon_{rh} = 90^\circ - \alpha$$

имеют отрицательный знак, то есть  $\varepsilon_{rh} < 0$ .

В сплавах, составы которых находятся в пределах от  $x = 0,5$  до  $x = 1$ , кубическая ячейка C15, в отличие от предыдущего случая, растянута вдоль направления  $\langle 111 \rangle$  так, что  $\varepsilon_{rh} > 0$ .

В [23] показано, что в первом приближении величины и знаки ромбоэдрических искажений  $\varepsilon_{rh}$ , выраженные в радианах, совпадают с величинами и знаками коэффициентов спонтанной магнитострикции сплавов  $\lambda_{111}$ .

Таким образом, по рентгенодифракционным данным установлено, что уже при комнатной температуре атомно-кристаллическая структура сплавов псевдобинарной системы  $(Sm_{1-x}Tb_x)Fe_2$  не является кубической, а слегка искажена либо за счет сжатия, либо за счет растяжения кристалла вдоль оси  $\langle 111 \rangle$ . Причиной этого является спонтанная магнитострикция кристаллов, обусловленная тем, что вектор спонтанного магнитного момента  $\mathbf{M}_{RT_2}$  ориентирован вдоль кристаллографической оси  $\langle 111 \rangle$ .

Зависимость величины ромбоэдрических искажений  $\varepsilon_{rh}$  от концентрации атомов тербия в псевдобинарной системе  $(Sm_{1-x}Tb_x)Fe_2$  представлена на рис. 2. Эта зависимость практически линейна, причем, прямая пересекает ось абсцисс вблизи состава  $x \approx 0,45$ , где  $\varepsilon_{rh}$  меняет знак. Аналогичным образом ведет себя и концентрационная зависимость коэффициента спонтанной магнитострикции  $\lambda_{111}$ . Величина  $\lambda_{111}$  для  $SmFe_2$  при комнатной температуре равна  $-1500 \cdot 10^{-6}$ , а для  $TbFe_2$  —  $+1800 \cdot 10^{-6}$ .

Объяснение данному экспериментальному факту может быть дано, исходя из модели двухподрешоточного магнетика с коллинеарными магнитными моментами подрешеток. Известно [6 – 10], что дис-

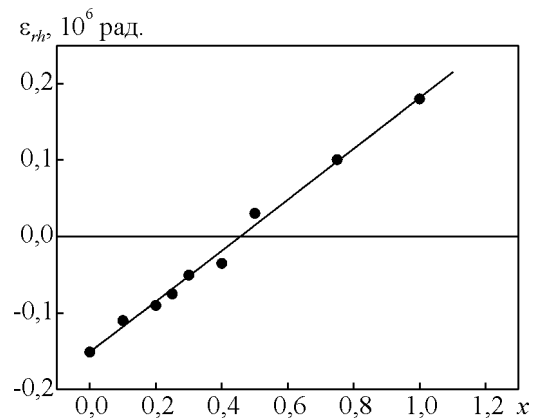


Рис. 2. Зависимость величины ромбоэдрических искажений  $\varepsilon_{rh}$  от концентрации атомов тербия в псевдобинарной системе  $(Sm_{1-x}Tb_x)Fe_2$ .

торсионные фазовые превращения в редкоземельных фазах Лавеса  $RFe_2$  обусловлены, главным образом, ориентацией магнитного момента редкоземельного R-иона и обменными магнитными взаимодействиями R- и Fe-подрешеток.

У легких редкоземельных ионов направление магнитного момента  $\mathbf{M}_R$  совпадает с направлением магнитного момента  $\mathbf{M}_{Fe}$ , а у тяжелых —  $\mathbf{M}_R$  и  $\mathbf{M}_{Fe}$  направлены в противоположные стороны. При этом величина спонтанной деформации кристаллов  $RFe_2$  целиком зависит от природы R-иона. В сплавах смешанных составов типа  $R'_{1-x}R''_xFe_2$  по мере изменения относительных концентраций легких и тяжелых редкоземельных ионов происходит конкуренция обменных магнитных взаимодействий “R’ – Fe” и “R” – Fe”, приводящая при определенных значениях  $x_{Comp}$  к их полной взаимной компенсации и последующей смене типа магнитного порядка: с ферромагнитного на ферримагнитный.

По разные стороны от  $x_{Comp}$  доминируют разные типы магнитного порядка: при  $x < x_{Comp}$  — ферромагнитный, при  $x > x_{Comp}$  — ферримагнитный.

Следующий шаг — изучение трансформации рентгенодифракционных спектров сплавов псевдобинарной системы  $(Sm_{1-x}Tb_x)Fe_2$  при изменениях температуры от 300 до 5 К.

Проведенное исследование показало, что рентгенодифракционные спектры всех сплавов составов  $0,5 \leq x \leq 1$  не изменяют вида профилей дифракционных максимумов. Основное отличие заключалось лишь в величинах расщеплений дифракционных максимумов, возрастающих с понижением температуры. Это указывало на то, что во всем исследованном температурном интервале от 300 до 5 К структуры

сплавов остаются ромбоэдрически искаженными, то есть в них сформирован ферримагнитный порядок с ориентацией вектора  $\mathbf{M}_{RT_2}$  вдоль оси  $\langle 111 \rangle$ .

Более интересную трансформацию дифракционных спектров при охлаждении демонстрировал сплав  $\text{SmFe}_2$ . При понижении температуры от 300 до 180 К структура сплава оставалась ромбоэдрической, однако величина ромбоэдрических искажений увеличивалась почти в два раза, оставаясь отрицательной по знаку.

В интервале температур от 106 до 5 К характер трансформации рентгенодифракционного спектра свидетельствовал о возникновении в нем ромбических искажений. Это указывало на то, что там произошла переориентация магнитного момента  $V_{RT_2}(x)$  от оси  $\langle 111 \rangle$  к оси  $\langle 110 \rangle$ , то есть в сплаве  $\text{SmFe}_2$  произошел спин-ориентационный магнитный фазовый переход.

В интервале температур от 180 до 106 К наблюдаемая рентгенодифракционная картина указывала на появление в сплаве  $\text{SmFe}_2$  так называемой “угловой” магнитной фазы, когда направление вектора спонтанного магнитного момента не совпадало ни с направлением  $\langle 111 \rangle$ , ни с направлением  $\langle 110 \rangle$ , а лежало в плоскости  $(110)$  между этими направлениями.

Подобная же трансформация рентгенодифракционных спектров была обнаружена нами при низкотемпературном рентгенографировании сплавов псевдобинарной системы  $(\text{Sm}_{1-x}\text{Tb}_x)\text{Fe}_2$  составов  $x = 0,1; 0,2; 0,25; 0,3; 0,4$ . Отличие заключалось лишь в точках появления угловых и ромбических фаз.

Отметим, что на кривых температурных зависимостей параметра  $a(T)$  и  $V_{RT_2}(T)$  в точках смены направления вектора магнитного момента  $\mathbf{M}_{RT_2}$  наблюдали небольшие аномалии. По этим аномалиям

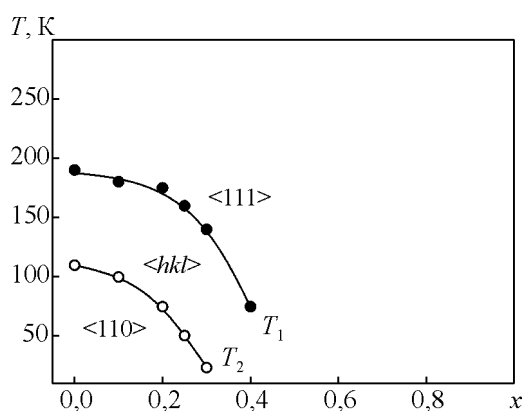


Рис. 3. Магнитная спин-ориентационная фазовая диаграмма системы  $(\text{Sm}_{1-x}\text{Tb}_x)\text{Fe}_2$ .

и были уточнены температурные границы формирования магнитоупорядоченных фаз с разными типами магнитного порядка и была построена итоговая магнитная спин-ориентационная фазовая диаграмма системы  $(\text{Sm}_{1-x}\text{Tb}_x)\text{Fe}_2$  (рис. 3).

Из рис. 3 видно, что в псевдобинарной системе  $(\text{Sm}_{1-x}\text{Tb}_x)\text{Fe}_2$  в температурном интервале от 5 до 300 К имеются три фазовые области, а именно: область сплавов с ромбоэдрической структурой и ориентацией вектора  $\mathbf{M}_{RT_2}$  вдоль оси  $\langle 111 \rangle$ , область сплавов с ромбической структурой и ориентацией вектора  $\mathbf{M}_{RT_2}$  вдоль оси  $\langle 110 \rangle$  и область, в которой структура сплава имеет сложные искажения (область угловых магнитных фаз).

## Выводы

Проведенное исследование показало, что в сплавах псевдобинарной системы  $(\text{Sm}_{1-x}\text{Tb}_x)\text{Fe}_2$  в интервале температур от 5 до 300 К происходят магнитные спин-ориентационные фазовые переходы, сопровождающиеся трансформациями атомно-кристаллической структуры с формированием низкосимметричных модификаций.

Установлено, что причиной появления низкосимметричных модификаций является спонтанная магнитострикция, а между типом искажения атомно-кристаллической структуры и типом магнитного порядка существует однозначная взаимосвязь.

Спиновая переориентация в сплавах этой системы сопровождается и возникновением угловых магнитных фаз, что приводит к сложным искажениям их атомно-кристаллической структуры.

Комбинация в одной и той же псевдобинарной системе сплавов  $(\text{Sm}_{1-x}\text{Tb}_x)\text{Fe}_2$  в одной из подрешеток ионов легких и тяжелых редкоземельных металлов позволило выявить составы таких сплавов, у которых почти полностью скомпенсирована магнитокристаллическая анизотропия.

Перспективным направлением в поисках сплавов с оптимальными магнитоориентационными характеристиками для конкретных температурных интервалов должны стать синтез и комплексное исследование сплавов с тремя редкоземельными элементами в Р подрешетке систем типа  $\text{Sm}_{1-x-y}\text{Tb}_x\text{R}_y\text{Fe}_2$ .

*В заключение считаем своим приятным долгом выразить благодарность кандидату физико-математических наук, старшему научному сотруднику ИФВД А.В. Цвященко за помощь в приготовлении сплавов.*

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.*

## Литература

1. Стронг Г. Высокотемпературные методы при высоких давлениях. М.: Мир, 1964, 192 с.
2. Шиняев А.Я. Фазовые превращения и свойства сплавов при высоком давлении. М.: Наука, 1973, 155 с.
3. Pyushin A.S. Structure and physical properties of high pressure phases in rare earth intermetallic systems  $R(Fe_{1-x}M_x)_2$  and  $R'_{1-x}R''_xFe_2$ . J. of Guandong Non-ferrous Metals, 2005, v. 15, no. 2 – 3, p. 74 – 81.
4. Лавес Ф. Факторы, определяющие кристаллическую структуру. Сб. Интерметаллические соединения. М.: Металлургия, 1970, с. 139 – 196.
5. Теслюк М.Ю. Металлические соединения со структурами фаз Лавеса. М.: Металлургия, 1966, 239 с.
6. Белов К.П. Редкоземельные магнетики и их применение. М.: Наука, 1980, 224 с.
7. Тейлор К. Интерметаллические соединения редкоземельных металлов. М.: Мир, 1974, 266 с.
8. Wallace W.E. Rare Earth Intermetallics. Academic Press N.-Y. 1973, 159 p.
9. Белов К.П. Магнитоупорядоченные явления и их приложения. М.: Наука, 1987, 155 с.
10. Илюшин А.С. Основы структурной физики редкоземельных интерметаллических соединений. М.: МГУ, 2005, 174 с.
11. Wallace W.E., Sankar S.G., Rao V.U.S. Crystal Field Effects in Rare Earth Intermetallic Compounds. Structure and Bonding, 1977, v. 33, p. 1 – 55.
12. Звездин А.К., Матвеев В.М., Мухин А.А., Попов А.И. Редкоземельные ионы в магнитоупорядоченных кристаллах. М.: Наука, 1985, 296 с.
13. Khvostansev L.G. et al. Device of toroid type for high pressure generation. High Temp.-High Press., 1977, v. 9, p. 637 – 642.
14. Tsvyaschenko A.V. High pressure synthesis of  $RE_6Cu_{23}$  compounds (RE-, Tb, Dy, Yb, Lu). J. Less-Common Metals, 1984, v. 99, p. L9 – L12.
15. Илюшин А.С., Русаков В.С., Никанорова И.А. и др. Исследование структурных переходов в квазибинарной системе  $Dy(Fe_{1-x}Mn_x)_2$ , синтезированные при высоких давлениях. ФТТ, 1996, т. 33, № 9, с. 28 – 75.
16. Терра Ф., Илюшин А.С., Никанорова И.А., Авдеева И.А. Поглощение водорода в сплавах псевдодвойной системы  $Dy(Fe_{1-x}Mn_x)_2$ . Металлы, 1996, № 4, с. 159 – 171.
17. Перов А.П. Низкотемпературная приставка к рентгеновскому дифрактометру. Приборы и техника эксперимента, 1984, № 3, с. 227 – 229.
18. Abd-El-Aal M.M., Pyushin A.S., Chechernikov V.I., Pechennikov A.V. Magnetic properties and spontaneous distortion in Phase Laves intermetallic compounds. Acta Physica Hungarica, 1987, v. 63, no. 1, p. 69 – 72.
19. Илюшин А.С., Кахадзе С.О. Мёссбауэровское и рентгеновское исследование спиновой ориентации в сплавах системы  $Tb_{1-x}Sm_xFe_2$  синтезированных при высоких давлениях. Сб. “Взаимодействие мёссбауэровского излучения с веществом” МГУ, 1988, с. 12 – 14.
20. Русаков В.С. Мёссбауэровская спектроскопия локально неоднородных систем. Алматы, 2000, 430 с.
21. Чечерников В.И. Магнитные измерения. М.: Изд-во Моск. ун-та. 1969, 196 с.
22. Бондарькова Г.В., Илюшин А.С., Никанорова И.А. Структура и магнитоупругие свойства редкоземельных фаз Лавеса типа C15. Вестник моск. университета, Серия 3, Физика, астрономия, 1991, т. 32, № 5, с. 88 – 90.

Статья поступила в редакцию 15.04.2013 г.

**Илюшин Александр Сергеевич** — Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Физический факультет, доктор физико-математических наук, профессор. Специалист в области физики конденсированного состояния. E-mail: sols146i@phys.msu.ru.

**Солодов Евгений Викторович** — Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Физический факультет, ведущий программист. Специалист в области физики конденсированного состояния. E-mail: solodov@phys.msu.ru

**Умхаева Зарган Сайпундиновна** — Чеченский государственный университет, кандидат физико-математических наук, профессор. Специалист в области физики магнитных явлений.