

05

## Локальная атомная и магнитная структура нанокристаллического сплава $\text{Fe}_{75}\text{Cr}_{10}\text{V}_{15}$

© В.С. Покатилов<sup>1</sup>, Т.Г. Дмитриева<sup>1</sup>, В.В. Покатилов<sup>1</sup>, Н.Б. Дьяконова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики, Москва, Россия

<sup>2</sup> Государственный научный центр „ЦНИИчермет им. И.П. Бардина“, Москва, Россия

E-mail: pokatilov@mirea.ru

(Поступила в Редакцию 30 января 2012 г.)

Кристаллическая, локальная атомная и магнитная структура, отожженных при 440–473 °С в течение 5 min сплавов  $\text{Fe}_{75}\text{Cr}_{10}\text{V}_{15}$ , исследована методами рентгенографии и эффекта Мессбауэра на ядрах  $^{57}\text{Fe}$ . При температуре отжига  $T_a = 440^\circ\text{C}$  в сплаве выделяются нанокристаллы фазы  $\alpha\text{-Fe}$  ( $\sim 1\%$ ) в аморфной матрице. Полная кристаллизация аморфного сплава наблюдается при  $T_a = 473^\circ\text{C}$ , причем образуются нанокристаллы  $\alpha\text{-Fe}$  размером  $26 \pm 2$  nm и тетрагонального борида  $t\text{-Fe}_3\text{V}$  размером  $47 \pm 2$  nm. Обнаружено, что атомы хрома входят как в нанокристаллы типа  $\alpha\text{-Fe}$ , так и в нанокристаллы  $t\text{-Fe}_3\text{V}$ . Восстановленные из мессбауэровских спектров функции распределения сверхтонких полей в нанокристаллическом сплаве  $\text{Fe}_{75}\text{Cr}_{10}\text{V}_{15}$  (при  $T_a = 473^\circ\text{C}$ ) показали, что существует три разрешенных состояния атомов железа в фазе  $\alpha\text{-Fe}$  и три равновероятных кристаллографических неэквивалентных состояния железа в фазе  $t\text{-(Fe,Cr)}_3\text{V}$ . Определена концентрация хрома  $x \sim 10$  at.% в фазе  $\alpha\text{-Fe(Cr)}$ . Замещение атомов железа атомами хрома в  $t\text{-Fe}_3\text{V}$  существенно уменьшает локальные магнитные моменты атомов железа.

### 1. Введение

Многочисленные экспериментальные данные, полученные при использовании методов, основанных на сверхтонких взаимодействиях (ядерный магнитный резонанс, эффект Мессбауэра и др.), показали, что в аморфных ферромагнитных металлических сплавах на основе Fe–V имеется локальный ближний атомный и магнитный порядок [1–9]. Структура аморфно-нанокристаллических и нанокристаллических сплавов, формирующаяся при кратковременных отжигах аморфных сплавов вблизи температуры кристаллизации, остается мало изученной. Однако такие материалы представляют значительный интерес как для исследования природы физических свойств сплавов в аморфно-нанокристаллическом и нанокристаллическом состояниях, так и в связи с поиском новых материалов с необходимыми физическими (например, магнитными) свойствами. Особый интерес представляют аморфно-нанокристаллические и нанокристаллические сплавы на основе Fe–V и Fe–V–Si, содержащие примеси переходных атомов, так как эти примеси позволяют формировать определенную нанокристаллическую структуру и получать уникальные магнитные свойства сплавов, например такие, как у сплава типа „finemet“ [10]. Однако влияние примесных  $d$ -атомов на локальную атомную и магнитную структуру, состав нанокристаллических фаз в аморфно-нанокристаллических и нанокристаллических сплавах на основе Fe–V или Fe–V–Si практически не исследовалось.

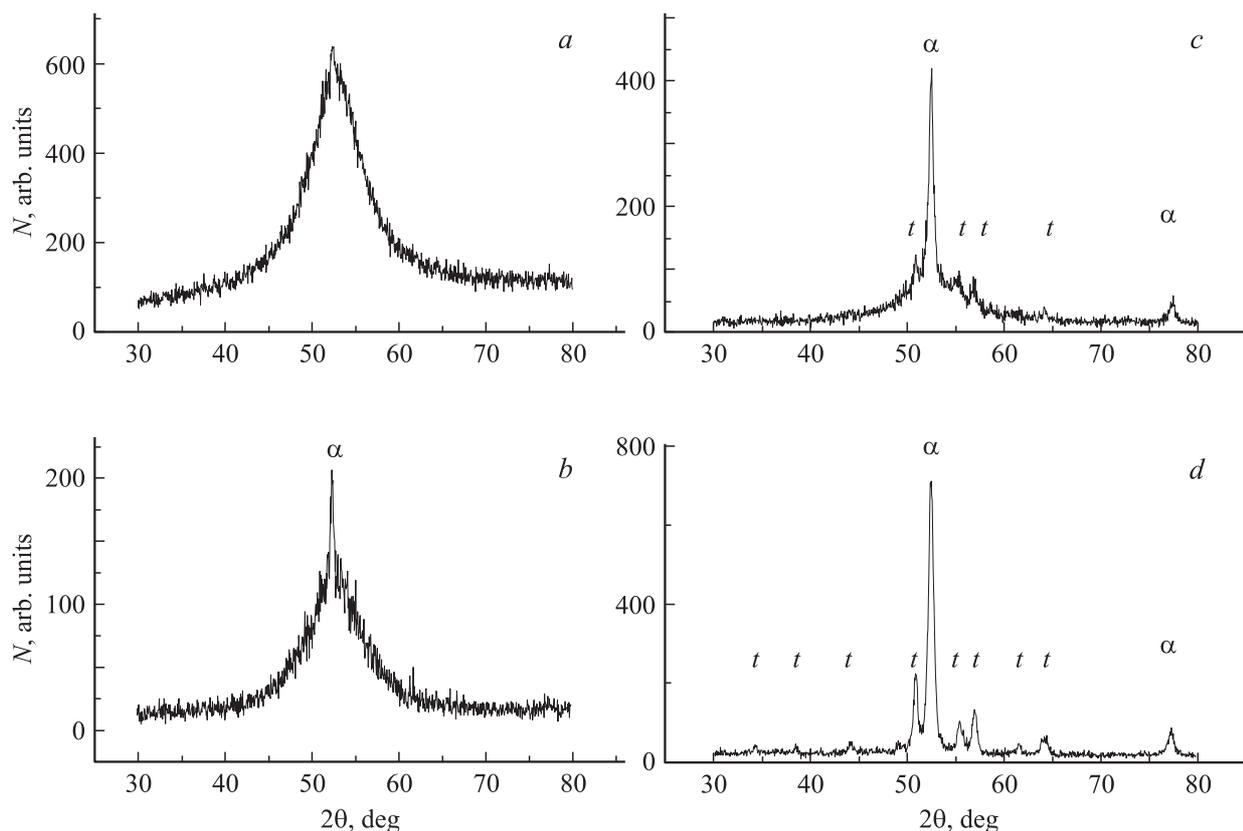
Цель настоящей работы — исследование влияния атомов хрома на кристаллическую структуру, локальный атомный и магнитный порядок нанокристаллических сплавов  $\text{Fe}_{75}\text{Cr}_{10}\text{V}_{15}$ .

### 2. Образцы и методы исследования

Аморфные сплавы  $\text{Fe}_{75}\text{Cr}_{10}\text{V}_{15}$  были приготовлены методом сверхбыстрой закалки расплава на вращающийся стальной диск (методом спиннингования). Отжиг полученных лент аморфных сплавов шириной 10 mm и толщиной  $\sim 20$   $\mu\text{m}$  проводился в интервале температур 400–473 °С. Заданная температура печи поддерживалась с точностью  $\pm 1^\circ\text{C}$ . Нагрев, отжиг и закалка образцов проводились в высокочистом аргоне. После достижения заданной температуры печи  $T_a$  образцы транспортировались в нагретую зону печи, выдерживались в течение 5 min и затем закачивались в воду. Для каждой температуры отжига использовался отдельный аморфный образец.

Рентгенографический анализ исследуемых образцов проводился на дифрактометре Geigerflex фирмы Rigaku. Был проведен химический и рентгеноспектральный анализ полученных образцов. Содержание бора, железа и хрома определялось с точностью не хуже 0.2 at.%.

Локальная атомная и магнитная структура сплавов  $\text{Fe}_{75}\text{Cr}_{10}\text{V}_{15}$  исследовалась с помощью мессбауэровского спектрометра на постоянной скорости в геометрии поглощения (спектрометр MS1104em, разработка НИИ физики ЮФУ, (Ростов-на-Дону) при комнатной температуре с помощью источника  $^{57}\text{Co(Rh)}$ ). Все мессбауэровские спектры корректировались с учетом вклада нерезонансной части, а также эффекта поглощения мессбауэровских гамма-квантов (эффект толщины образца), когда интенсивность поглощения превышала 5–6%. Учет толщины образца (поглощения гамма-квантов) проводился по методу, описанному в [11]. Восстановление функций распределений сверхтонких полей (СТП) из мессбауэ-



**Рис. 1.** Рентгеновские спектры сплавов  $Fe_{75}Cr_{10}B_{15}$ , полученные после отжига при различных температурах  $T, ^\circ C$ :  $a$  — 440,  $b$  — 450,  $c$  — 460,  $d$  — 473.

ровских спектров проводилось по программе DISTRI-M (многоядерное восстановление распределения параметров сверхтонкого взаимодействия), а модельная обработка спектров — по программе SPECTR [12].

### 3. Экспериментальные данные и их обсуждение

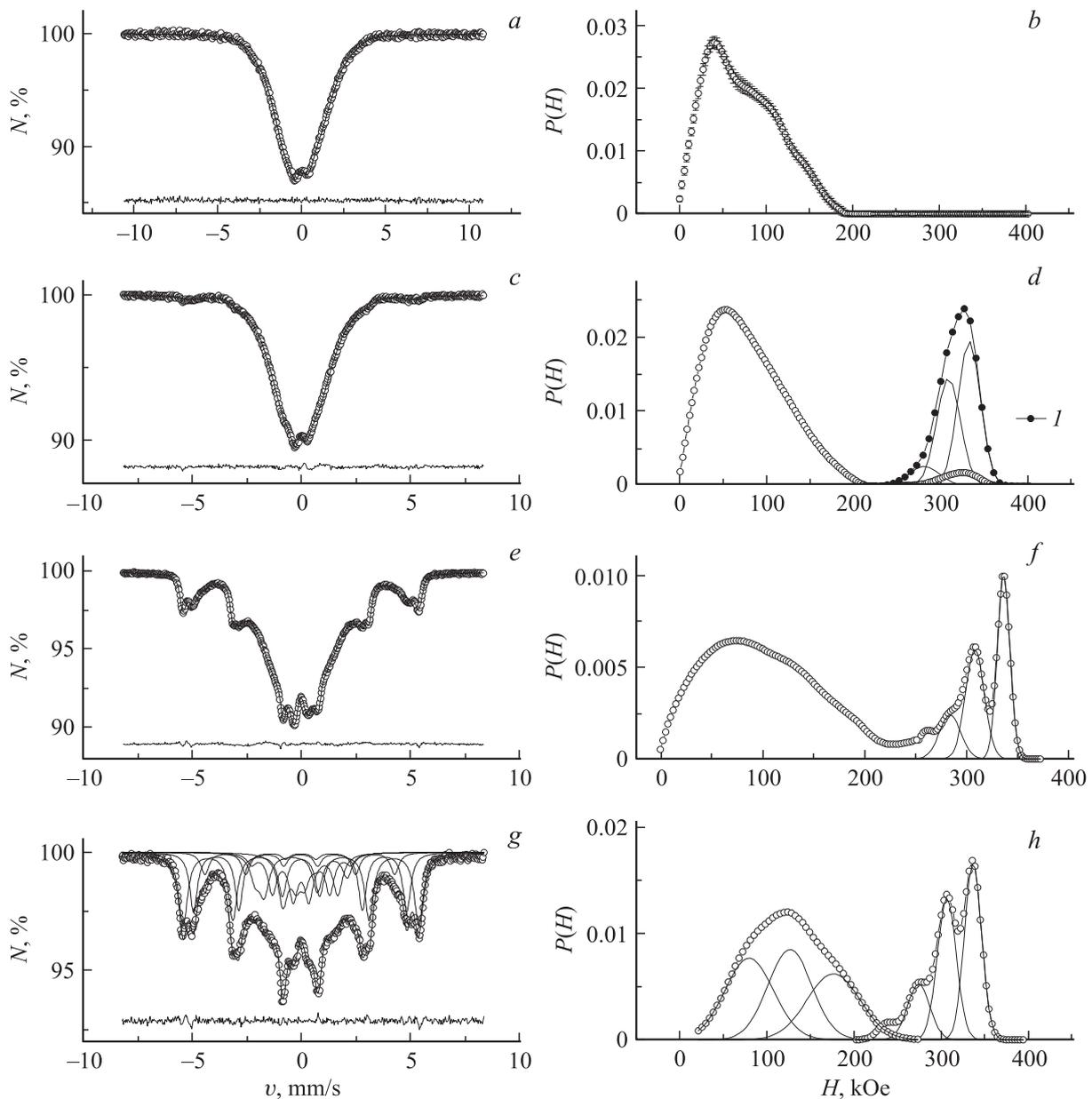
Рентгенограммы исследуемых аморфных, аморфно-нанокристаллических и нанокристаллических образцов приводятся на рис. 1. Образцы  $Fe_{75}Cr_{10}B_{15}$ , отожженные при 425 и 440 $^\circ C$  в течение 5 min почти полностью аморфны. На рентгенограмме сплава, отожженного при 440 $^\circ C$ , наблюдается аморфное гало с немного изменившейся формой максимума — с несколько заострившимся кончиком. Обнаружено, что при таких сравнительно низких температурах отжига наблюдаются наночастицы с очень малой объемной долей ( $\sim 1\%$ ), но не очень маленькие по размеру ( $\sim 30 \pm 5$  nm). После отжига быстро закаленных лент при температурах 450–455 $^\circ C$  основной массив сплава остается аморфным, но на рентгенограммах появляются линии  $\alpha$ -Fe, свидетельствующие о начале кристаллизации. Интенсивность линий  $\alpha$ -Fe растет с повышением температуры отжига, при температуре 460 $^\circ C$  дополнительно появляются линии тетрагональной ( $t$ ) фазы  $Fe_3B$ . При этом интен-

сивность аморфного гало уменьшается; так, например, объемная доля аморфной фазы после пятиминутного отжига при 460 $^\circ C$  составляет  $\sim 70\%$ . При температуре отжига 473 $^\circ C$  образец содержит только нанокристаллы фаз  $\alpha$ -Fe (55–60%) и  $t$ - $Fe_3B$  (45–40%).

Оценка размера нанокристаллов в сплаве, отожженном при 473 $^\circ C$ , проводилась по ширине линий на рентгенограмме с поправками на расщепление дублета  $\alpha 1$ – $\alpha 2$  и инструментальное уширение, которое оценивалось по ширине линий эталона. Для этого экспериментальное распределение интенсивности в зависимости от угла рассеяния  $2\theta$  аппроксимировалось (методом наименьших квадратов) суммой двух функций вида

$$I(x) = \frac{A}{\left(1 + 1.66 \frac{(x-C)^2}{B^2}\right)^2}, \quad (1)$$

расстояние между которыми, а также соотношения интенсивностей и ширин соответствуют спектральным линиям  $\alpha 1$  и  $\alpha 2$ . Число 1.66 введено для того, чтобы параметр  $B$ , характеризующий ширину линии, представлял собой ширину на половине высоты максимума. Предполагалось, что все уширения линий связаны с малым размером нанокристаллов. Размер нанокристаллов



**Рис. 2.** Мессбауэровские спектры на ядрах  $^{57}\text{Fe}$  при комнатной температуре в нанокристаллических сплавах  $\text{Fe}_{75}\text{Cr}_{10}\text{B}_{15}$  (слева) и восстановленные функции распределений СТП  $P(H)$  (справа).  $a, b$  — отжиг в режиме  $440^\circ\text{C}/5 \text{ min}$ ,  $c, d$  —  $450^\circ\text{C}/5 \text{ min}$ ,  $e, f$  —  $460^\circ\text{C}/5 \text{ min}$ ,  $g, h$  —  $473^\circ\text{C}/5 \text{ min}$ .  $I$  — распределение СТП  $P(H)$ , увеличенное в 10 раз по оси ординат. На части  $g$  приведена также модельная обработка спектра по программе SPECTR.

вычислялся по формуле Шеррера

$$D = \frac{\lambda}{(B - b) \cos \Theta}, \quad (2)$$

где  $B$  — ширина линии образца (в радианах),  $b$  — ширина линии эталона,  $\lambda$  — длина волны излучения. Длины волн  $\lambda(\alpha 1) = 1.78892 \text{ \AA}$ ,  $\lambda(\alpha 2) = 1.79278 \text{ \AA}$ . Размер нанокристаллов, оцененный по ширине линий (110) и (200) для  $\alpha\text{-Fe}$  с поправками на инструментальное уширение и дублет  $\alpha 1-\alpha 2$ , составляет  $26 \pm 3 \text{ nm}$ . Это нижняя оценка для размера нанокристаллов, так как в уширение линии (110) может вносить вклад линия (330)

от фазы  $t\text{-Fe}_3\text{B}$ , причем линия (200) может быть уширена из-за микронскажений. Размер нанокристаллов  $t\text{-Fe}_3\text{B}$  оценивается как  $47 \pm 3 \text{ nm}$ .

Данные электронной спектроскопии и рентгенографии отожженных аморфных сплавов  $\text{Fe}_{75}\text{Cr}_{10}\text{B}_{15}$ , опубликованные в литературе (см., например [13,14]), показали, что продолжительные отжижки выше температуры кристаллизации приводят к образованию фаз  $t\text{-Fe}_3\text{B}$  и  $\alpha\text{-Fe}$ , однако доказательства того, что атомы хрома входят в фазы  $\alpha\text{-Fe}$  и  $t\text{-Fe}_3\text{B}$  не приводятся.

На рис. 2 приведены мессбауэровские спектры отожженных сплавов  $\text{Fe}_{75}\text{Cr}_{10}\text{B}_{15}$ , измеренные при комнат-

ной температуре, а также восстановленные функции распределения СТП  $P(H)$ . Рис. 2 иллюстрирует эволюцию выделения кристаллической фазы в аморфной ленте в зависимости от температуры отжига. Как видно из рисунка, увеличение температуры отжига приводит к существенному изменению мессбауэровских спектров и, следовательно, локального магнитного состояния атомов железа в сплавах  $Fe_{75}Cr_{10}B_{15}$ . Наблюдается увеличение доли площади  $S_a$  (от общей площади  $S$  спектра), обусловленной ядрами  $^{57}Fe$  в нанокристаллической фазе  $\alpha$ -Fe (область СТП 250–350 кОе), при одновременном уменьшении доли площади  $S_{am}$ , обусловленной ядрами  $^{57}Fe$  в аморфной матрице. Из распределений СТП  $P(H)$  оценены  $S_a$  для нанокристаллов фазы  $\alpha$ -Fe при отжигах в течение 5 min при 450, 460, 473°C. Они равны 3, 23 и 55% соответственно. Данные эффекта Мессбауэра показали, что сплав  $Fe_{75}Cr_{10}B_{15}$  после отжига при 473°C состоит из нанокристаллов  $t$ -Fe<sub>3</sub>B (диапазон СТП 0–200 кОе) и  $\alpha$ -Fe (диапазон СТП 250–350 кОе). Отношение площадей в распределениях СТП  $P(H)$  фаз  $\alpha$ -Fe и  $t$ -Fe<sub>3</sub>B составляет 55 : 45 ( $\pm 5$ ) и совпадает с данными, полученными методом рентгенографии.

Из распределений СТП, измеренных при температуре отжига 473°C, видно, что в нанокристаллической фазе  $\alpha$ -Fe наблюдается, как минимум, три разрешенных состояния атомов железа, обусловленных тем, что атомы хрома входят в фазу  $\alpha$ -Fe и замещают атомы железа, образуя фазу  $\alpha$ -Fe(Cr). Обозначим состояния атомов железа в нанокристаллах  $\alpha$ -Fe(Cr), имеющие  $n$  примесных атомов хрома в первой координационной сфере (КС), как Fe( $n$ ). Атомы железа в нанокристаллах  $\alpha$ -Fe(Cr) имеют в первой КС следующее окружение: 1) первый пик (СТП  $H = 330.5$  кОе для Fe(0)) обусловлен атомами железа, содержащими восемь атомов Fe в первой КС; 2) второй пик ( $H = 305.4$  кОе для Fe(1)) — атомами железа, имеющими семь атомов Fe и один атом Cr в первой КС; 3) третий пик ( $H = 282.3$  кОе для состояния Fe(2)) — атомами железа с шестью атомами Fe и двумя примесными атомами Cr в первой КС.

Определим количество хрома в нанокристаллах фазы  $\alpha$ -Fe(Cr) при первой полной кристаллизации аморфного сплава, которая происходит при отжиге с температурой 473°C. Полагая, что атомы хрома случайно распределены в первой КС атомов железа, оценим концентрацию атомов хрома в нанокристаллах  $\alpha$ -Fe. Вероятность  $P_{AB}$  обнаружения  $N_i$  атомов  $B$  (атомов хрома) на расстоянии  $R_i$  от атома  $A$  (атома железа) в  $i$ -сфере равна

$$P_{AB} = C_{Z_i}^{N_i} x^{N_i} (1-x)^{Z_i-N_i}, \quad (3)$$

$$C_{Z_i}^{N_i} = \frac{Z_i!}{N_i!(Z_i - N_i)!}, \quad (4)$$

где  $R_i$  — радиус  $i$ -й координационной сферы;  $x$  — концентрация атомов  $B$ ;  $Z_i$  — координационное число  $i$ -й сферы. В табл. 1 приведены вероятности  $P_{AB}$  и экспериментальные парциальные доли площадей для состояний

**Таблица 1.** Сверхтонкие поля  $H$  и парциальные доли площадей для состояний атомов железа в нанокристаллах сплава  $Fe_{75}Cr_{10}B_{15}$  после отжига при различных температурах в течение 5 min

Фаза	Состояние железа	450°C		460°C		473°C		$P_{AB}$ , %
		$H$ , кОе	$S_a$ , %	$H$ , кОе	$S_a$ , %	$H$ , кОе	$S_a$ , %	
$t$ -(Fe,Cr) <sub>3</sub> B	Fe <sub>1</sub>	—	—	—	—	78.65	34	
	Fe <sub>2</sub>	—	—	—	—	125.55	34	
	Fe <sub>3</sub>	—	—	—	—	175.7	32	
$\alpha$ -Fe(Cr)	Fe(0)	332.5	52	335.88	44	336.28	44	43
	Fe(1)	308.5	38	307.78	39	306.15	38	38
	Fe(2)	280.8	10	283.57	17	273.68	18	15

железа Fe(0), Fe(1) и Fe(2) в нанокристаллах  $\alpha$ -Fe(Cr). Вероятность  $P_{AB}$  рассчитывалась для составов  $x = 8, 9, 10, 11, 12$  at.% хрома в фазе  $\alpha$ -Fe(Cr). Сравнение экспериментальных долей  $S_a$  и рассчитанных вероятностей для сплава со случайным распределением атомов показывает, что имеется хорошее согласие между значениями  $S_a$  и  $P_{AB}$  при содержании хрома  $x \approx 10$  at.%. Полученные данные также позволяют сделать вывод, что атомы хрома действительно замещают атомы железа в нанокристаллах  $\alpha$ -Fe(Cr) и образуют твердый раствор атомов хрома в нанокристаллической фазе  $\alpha$ -Fe(Cr).

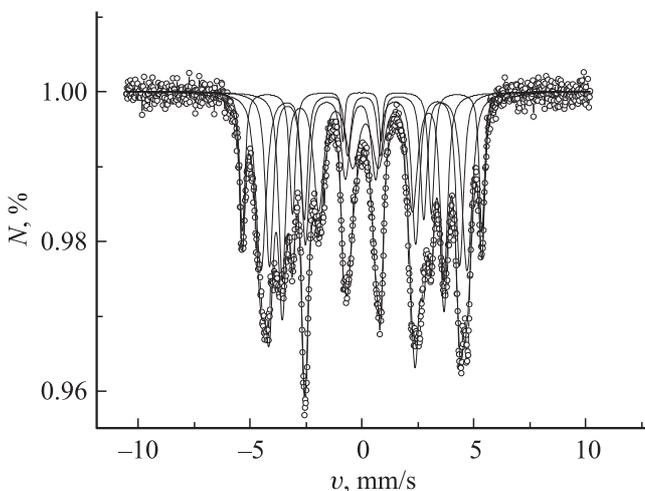
На рис. 2,  $h$  показано распределение СТП для нанокристаллического борида  $t$ -Fe<sub>3</sub>B в отожженном сплаве  $Fe_{75}Cr_{10}B_{15}$ , а также его разложение на три гауссовских парциальных спектра для трех локальных состояний атомов железа в тетрагональном бориде  $t$ -Fe<sub>3</sub>B в соответствии с тем, что тетрагональный борид содержит три неэквивалентных состояния атомов железа [8]. СТП для этих состояний равны  $H(1) = 78.65$  кОе,  $H(2) = 125.55$  кОе и  $H(3) = 175.7$  кОе.

Для уточнения СТП на ядрах  $^{57}Fe$  в нанокристаллах  $\alpha$ -Fe и  $t$ -Fe<sub>3</sub>B, содержащих атомы хрома, была проведена модельная обработка мессбауэровского спектра нанокристаллического сплава  $Fe_{75}Cr_{10}B_{15}$  (по программе SPECTR). Предполагалось, что в сплаве содержатся шесть наиболее вероятных состояний атомов железа в соответствии с данными рис. 2,  $h$ : в нанокристаллах фазы  $\alpha$ -Fe имеются три наиболее вероятные состояния атомов железа с разным числом атомов хрома в первой КС; в метастабильной фазе  $t$ -Fe<sub>3</sub>B наблюдаются три неэквивалентных кристаллографических состояния атомов железа. Мессбауэровский спектр и результат модельной обработки приведены на рис. 2,  $g$ . Спектр представлен в виде экспериментальных точек, а парциальные компоненты — в виде линий для шести состояний атомов железа в нанокристаллических фазах: три в фазе  $\alpha$ -Fe и три в фазе  $t$ -Fe<sub>3</sub>B. В табл. 1 содержатся полученные значения СТП и доли площадей для шести локальных состояний атомов железа в каждой из нанокристаллических фаз ( $\alpha$ -Fe(Cr) и  $t$ -(FeCr)<sub>3</sub>B). Заметим, что сверхтонкие параметры, полученные при восстанов-

лении функций распределений СТП  $P(H)$  (рис. 2, *h*) и модельной обработке мессбауэровского спектра сплава  $\text{Fe}_{75}\text{Cr}_{10}\text{V}_{15}$ , отожженного при  $473^\circ\text{C}$ , совпали в пределах ошибки.

Для экспериментального доказательства того факта, что атомы хрома в нанокристаллическом сплаве  $\text{Fe}_{75}\text{Cr}_{10}\text{V}_{15}$  входят в фазу  $t\text{-Fe}_3\text{B}$ , был измерен мессбауэровский спектр аморфного сплава  $\text{Fe}_{75}\text{V}_{25}$ , отожженного при  $520^\circ\text{C}$  в течение 20 min (рис. 3). Рентгенографические измерения показали, что после отжига произошла полная кристаллизация, и сплав содержал кристаллические фазы  $\alpha\text{-Fe}$  и  $t\text{-Fe}_3\text{B}$  в соотношении 17 : 83. Согласно [3], в метастабильной фазе  $t\text{-Fe}_3\text{B}$  содержатся три неэквивалентных кристаллографических состояния атомов железа. СТП на ядрах  $^{57}\text{Fe}$  для состояний атомов железа в фазе  $\alpha\text{-Fe}$  равно  $H = 331.5\text{ кОе}$ , а СТП для атомов железа в фазе  $t\text{-Fe}_3\text{B}$  приведены в табл. 2. СТП для трех неэквивалентных кристаллографических состояний атомов железа в фазе  $t\text{-Fe}_3\text{B}$  совпадают со СТП для данной фазы, измеренными в работе [3]. Заметим, что в фазе  $t\text{-Fe}_3\text{B}$  три различных атома железа содержат разное количество атомов железа и бора в ближайших координационных сферах:  $\text{Fe}_1$  ( $H_1 = 223.7\text{ кОе}$ ) —  $10\text{Fe} + 4\text{B}$ ,  $\text{Fe}_2$  ( $H_2 = 263.2\text{ кОе}$ ) —  $10\text{Fe} + 3\text{B}$ ,  $\text{Fe}_3$  ( $H_3 = 285.2\text{ кОе}$ ) —  $12\text{Fe} + 2\text{B}$ . Сравнение значений СТП в фазе  $t\text{-Fe}_3\text{B}$ , полученных из мессбауэровских спектров для отожженного сплава  $\text{Fe}_{75}\text{Cr}_{10}\text{V}_{15}$  (табл. 1), и СТП в фазе  $t\text{-Fe}_3\text{B}$  (табл. 2) показывает, что замещение 10 at.% железа хромом в сплаве  $\text{Fe}_{75}\text{Cr}_{10}\text{V}_{15}$  приводит к значительному уменьшению СТП для каждого состояния атомов железа. Из приведенных выше данных следует, что в нанокристаллических сплавах  $\text{Fe}_{75}\text{Cr}_{10}\text{V}_{15}$  (после отжига при температуре  $473^\circ\text{C}$ ) атомы хрома замещают атомы железа в нанокристаллах фазы  $t\text{-Fe}_3\text{B}$  в трех кристаллографических неэквивалентных состояниях атомов железа.

СТП на ядрах  $^{57}\text{Fe}$  в сплавах на основе  $\text{Fe-B}$  пропорциональны локальному магнитному моменту атома



**Рис. 3.** Мессбауэровский спектр (точки) и модельная обработка по программе SPECTR (сплошные линии) аморфного сплава  $\text{Fe}_{75}\text{V}_{25}$  отожженного при  $520^\circ\text{C}$ .

**Таблица 2.** Сверхтонкие поля и локальные магнитные моменты атомов железа в фазах  $t\text{-Fe}_3\text{B}$  и  $t\text{-(Fe,Cr)}_3\text{B}$  (для трех локальных состояний атомов железа)

№ п/п	$t\text{-Fe}_3\text{B}$		$t\text{-(Fe,Cr)}_3\text{B}$	
	$H, \text{кОе}$ ( $\pm 0.3$ )	$\mu, \mu_B$ ( $\pm 0.04$ )	$H, \text{кОе}$ ( $\pm 0.3$ )	$\mu, \mu_B$ ( $\pm 0.04$ )
1	223.7	1.49	79.2	0.53
2	263.2	1.76	124.4	0.83
3	285.2	1.90	189.0	1.26

железа  $\mu(\text{Fe})$  [8]

$$H = D_p \mu(\text{Fe}), \quad (5)$$

где  $D_p$  — константа поляризации. Согласно [8] для аморфных сплавов  $\text{Fe-B}$ , метастабильных и стабильных боридов на основе железа, константа  $D_p = -150\text{ кОе}/\mu(\text{Fe})$ . В табл. 2 приведены оцененные по формуле (5) локальные магнитные моменты атомов железа. Из табл. 2 видно, что атом хрома сильно возмущает магнитные моменты атомов железа в  $t\text{-(Fe,Cr)}_3\text{B}$ . Следует отметить, что влияние атомов хрома на локальные магнитные моменты атомов железа  $\mu(\text{Fe})$  в нанокристаллической фазе  $t\text{-(Fe,Cr)}_3\text{B}$  по сравнению с  $\mu(\text{Fe})$  в фазе  $t\text{-Fe}_3\text{B}$  значительнее для тех состояний атомов железа, которые содержат большее количество бора в ближайшей координационной сфере. Так, например, для состояния  $\text{Fe}_1$  в  $t\text{-Fe}_3\text{B}$   $\mu_1(\text{Fe}) = 1.49\mu_B$ , в  $t\text{-(Fe,Cr)}_3\text{B}$   $\mu_1(\text{Fe}) = 0.53\mu_B$ , а для состояния  $\text{Fe}_3$  в  $t\text{-Fe}_3\text{B}$   $\mu_3(\text{Fe}) = 1.9\mu_B$ , в  $t\text{-(Fe,Cr)}_3\text{B}$   $\mu_3(\text{Fe}) = 1.26\mu_B$ .

## 4. Заключение

Исследование влияния кратковременных отжигов на локальную атомную и магнитную структуру аморфных сплавов  $\text{Fe}_{75}\text{Cr}_{10}\text{V}_{15}$ , полученных методом сверхбыстрой закалки из расплава, показало, что уже при температуре отжига  $440^\circ\text{C}$  в аморфной матрице начинают формироваться нанокристаллы фазы  $\alpha\text{-Fe}$  размером  $\sim 30\text{ nm}$ . Полная кристаллизация аморфного сплава  $\text{Fe}_{75}\text{Cr}_{10}\text{V}_{15}$  происходит при температуре отжига  $473^\circ\text{C}$ , и сплав содержит нанокристаллы фаз  $\alpha\text{-Fe(Cr)}$  и  $t\text{-(Fe,Cr)}_3\text{B}$ . Размер нанокристаллов фазы  $\alpha\text{-Fe}$  составляет  $26 \pm 3\text{ nm}$ , а для фазы  $t\text{-Fe}_3\text{B}$  —  $47 \pm 3\text{ nm}$ . Обнаружены три разрешенных состояния атомов железа в нанокристаллической фазе  $\alpha\text{-Fe(Cr)}$ , различающиеся количеством атомов хрома в первой КС атомов железа, и три неэквивалентных кристаллографических состояния атомов железа в фазе  $t\text{-(Fe,Cr)}_3\text{B}$ . Замещение атомов железа атомами хрома в фазе  $t\text{-(Fe,Cr)}_3\text{B}$  приводит к существенному уменьшению локальных магнитных моментов для состояний атомов железа в зависимости от количества атомов железа и бора в ближайших координационных сферах.

## Список литературы

- [1] I. Vincze, D.S. Bondreaux, M. Tegze. *Phys. Rev. B* **19**, 4896 (1979).
- [2] В.С. Показилов. *Металлофизика*, **5**, 96 (1983).
- [3] J.C. Ford, J.I. Budnick, W.A. Hines, R. Hasegawa. *J. Appl. Phys.* **55**, 6, 2286 (1984).
- [4] Y.D. Zhang, W.A. Hines, J.I. Budnick, M. Dhoi, F.H. Sanches, R. Hasegawa. *J. Magn. Mater.* **61**, 162 (1986)
- [5] V. Pokatilov, N. Dyakonova. *Hyperfine Interaction* **59**, 525 (1990).
- [6] В.С. Показилов. *ФТТ* **51**, 134 (2009).
- [7] В.С. Показилов, Т.Г. Дмитриева. *Изв. РАН. Сер. физ.* **73**, 8, 1159 (2009).
- [8] P. Panissod, J. Durand, J.I. Budnick. *Nucl. Instrum. Meth.* **199**, 99 (1982).
- [9] В.С. Показилов. *ДАН СССР* **257**, 95 (1981).
- [10] Y. Yoshizawa, S. Oguma, K. Yamauchi. *J. Appl. Phys.* **64**, 6044 (1988).
- [11] М.А. Чуев, *Письма в ЖЭТФ* **82**, 573 (2005).
- [12] В.С. Русаков. *Мексбауэровская спектроскопия локально неоднородных систем*. Изд-во Ин-та ядерной физики, Алматы (2000). 430 с.
- [13] А.М. Глезер, Б.В. Молотилов, В.П. Овчаров, О.Л. Утевская, Ю.Е. Чичерин. *ФММ* **64**, 6, 1106 (1987).
- [14] М.А. Дроздова, А.М. Глезер, Ю.И. Красавин, А.А. Савин. *ФММ* **67**, 5, 896 (1989).