

# Исследование быстрозакаленных кристаллических и аморфных сплавов Fe–В методом ядерного магнитного резонанса

© В.С. Покатилов

Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики  
(Технический университет),  
119494 Москва, Россия

E-mail: pokatilov@mirea.ru

(Поступила в Редакцию 26 марта 2007 г.)

Аморфные и микрокристаллические сплавы Fe–В в области составов 4–25 at.% В, полученные сверхбыстрой закалкой расплава, исследованы методом импульсного ядерного магнитного резонанса (ЯМР) на ядрах  $^{11}\text{В}$  при 4.2 К. Образцы сплавов приготавливались как из естественной смеси изотопов, так и из смеси изотопов  $^{56}\text{Fe}$  и  $^{11}\text{В}$ . Измерены спектры ЯМР в зависимости от содержания бора. Максимальные значения сверхтонких полей (СТП) на ядрах  $^{11}\text{В}$   $H_{\text{max}}$  лежат в области значений 25–29 кОе и перекрывают значения СТП ядер  $^{11}\text{В}$  в тетрагональной и орторомбической фазах  $\text{Fe}_3\text{В}$ , а также в фазе  $\alpha\text{-Fe}$ , содержащей примеси атома бора в качестве атомов замещения. Определены ближний порядок и локальная атомная структура аморфных сплавов Fe–В. Аморфные сплавы состоят из микрообластей (кластеров) с ближним порядком типа тетрагональной и орторомбической фаз  $\text{Fe}_3\text{В}$ , а также  $\alpha\text{-Fe}$ .

PACS: 61.43.Dq, 61.18.Fs

## 1. Введение

Аморфные и микрокристаллические сплавы Fe–В являются основой многих магнитных сплавов, которые имеют широкое применение. Эти материалы привлекают внимание исследователей уже на протяжении более 20 лет, так как в этой системе сплавов наиболее полно удается изучить магнитные и другие свойства в аморфном и микрокристаллическом состояниях в широкой области составов Fe–В (2–50 at.% В) [1]. Исследован широкий спектр физических свойств этих материалов. Во многих работах указывается на вероятную связь магнитных свойств сплавов с их локальной структурой [1–6].

Аморфные сплавы Fe–В методом ядерного магнитного резонанса (ЯМР) изучались в ряде работ [2,4,7,8]. Было установлено, что в аморфных сплавах Fe–В, содержащих 25 at.% В, может существовать ближний порядок (БП) вокруг атомов бора по типу локального окружения атомов бора в тетрагональной фазе  $\text{Fe}_3\text{В}$  [4,7,8]. При меньшем содержании бора могут появляться микрообласти с БП вокруг атомов бора типа локального окружения атомов бора в орторомбической фазе  $\text{Fe}_3\text{В}$  [7,8]. Однако локальная структура во многом остается невыясненной практически для всех систем аморфных металлических магнитных сплавов. Для системы сплавов Fe–В не изучены зависимость локальной структуры от состава, существование микрообластей (кластеров) с другим БП, например с БП типа  $\alpha\text{-Fe}$ . Цель настоящей работы — исследование локальной структуры аморфных и микрокристаллических сплавов  $\text{Fe}_{1-x}\text{В}_x$  ( $x = 0.04\text{--}0.25$ ) в широкой области составов методом ЯМР.

## 2. Экспериментальные образцы и методы исследования

Аморфные и микрокристаллические сплавы Fe–(4–25) В (здесь и далее содержание В в формуле сплава приводится в атомных процентах) были приготовлены методом сверхбыстрой закалки расплава на вращающийся медный или стальной диск (методом спинингования). Структура кристаллических сплавов исследовалась рентгенографическим методом. Сплавы в области составов Fe–(4–12) В были кристаллические и состояли в основном из фазы  $\alpha\text{-Fe}$  и небольшого количества орторомбической ( $o$ ), а также тетрагональной ( $t$ ) фазы  $\text{Fe}_3\text{В}$ . Относительное содержание фаз  $t$ - и  $o\text{-Fe}_3\text{В}$  в сплавах

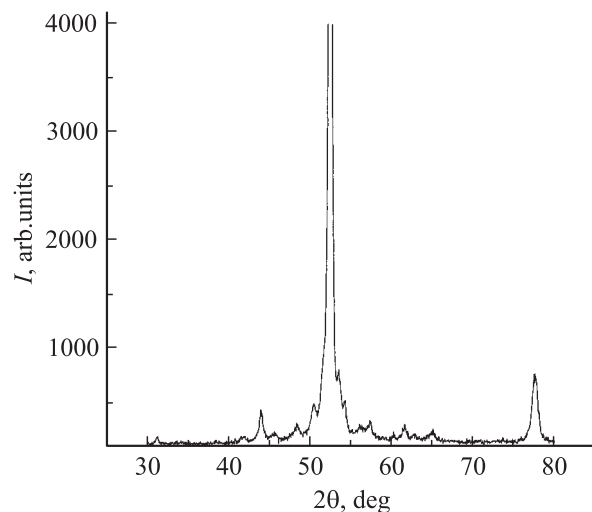


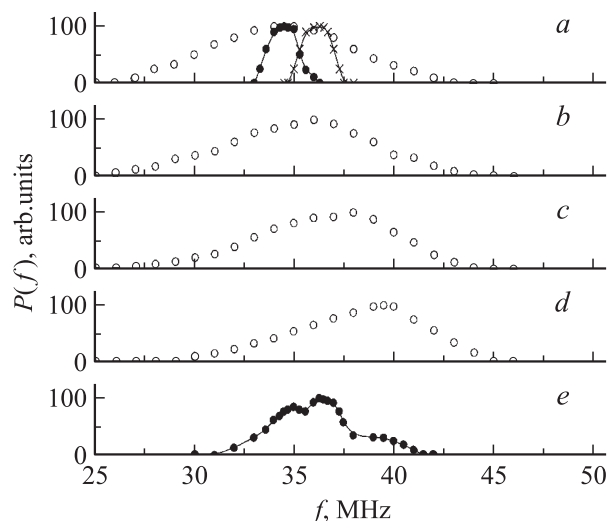
Рис. 1. Рентгеновский спектр микрокристаллического сплава Fe–5.4В.

сильно зависело от технологических условий. На рис. 1 в качестве примера приводится рентгенограмма микрокристаллического сплава Fe–5.4 В. Основные пики — это отражения для  $\alpha$ -Fe. Слабые пики — отражения для боридов Fe<sub>3</sub>B с *o*- и *t*-фазами. В микрокристаллических сплавах <sup>56</sup>Fe–4.0<sup>11</sup>B и <sup>56</sup>Fe–7.9<sup>11</sup>B следов боридов Fe<sub>2</sub>B не обнаружено. Был измерен период решетки  $\alpha$ -Fe, он уменьшается по сравнению с чистым Fe при увеличении содержания бора. Эти данные находятся в согласии с результатами работ [6,7]. Структура образцов сплавов в области составов Fe<sub>1-x</sub>B<sub>x</sub> с  $x > 0.12$  тщательно проверялась рентгенографическим методом, и для исследования выбирались образцы аморфных сплавов, не имеющих на рентгенограммах следов кристаллических фаз. Эти образцы в дальнейшем рассматривались как аморфные. Были проведены химический и рентгеноспектральные анализы полученных образцов. Содержание бора и железа определялось с точностью не хуже 0.1 at. %.

Исследования локальной структуры аморфных и микрокристаллических сплавов Fe–В проводились на импульсном спектрометре ЯМР на ядрах <sup>11</sup>B в области частот 25–50 МГц при температуре жидкого гелия. Измерялись распределения амплитуд сигнала ядерного эха  $P(f)$  в зависимости от частоты  $f$  заполнения радиочастотных импульсов. Сигналы ядер <sup>11</sup>B и <sup>57</sup>Fe в аморфных и микрокристаллических сплавах Fe–В лежат в одной области частот (25–50 МГц) [4,7,8]. При низком содержании бора и определенных условиях эксперимента (например, при определенных мощностях радиочастотных импульсов) сигналы от ядер <sup>57</sup>Fe могут вносить заметный вклад в спектры ЯМР в образцах из естественной смеси изотопов [4,7,8]. Чтобы отделить сигналы Fe и В друг от друга кроме образцов из естественной смеси изотопов Fe и В были приготовлены модельные образцы аморфных и микрокристаллических сплавов из изотопов <sup>56</sup>Fe и <sup>11</sup>B. Ядра <sup>56</sup>Fe не имеют магнитных моментов, и ЯМР на них не наблюдается. ЯМР на ядрах <sup>10</sup>B лежит в области частот 5–18 МГц. Поэтому ЯМР на ядрах <sup>11</sup>B в образцах из изотопов <sup>56</sup>Fe–<sup>11</sup>B не имеет примеси сигналов от других ядер. Быстрой закалкой из расплава были получены также модельные образцы сплавов Fe–В, содержащих <sup>56</sup>Fe–4.0<sup>11</sup>B, <sup>56</sup>Fe–7.9<sup>11</sup>B, <sup>56</sup>Fe–11.2<sup>10</sup>B, <sup>56</sup>Fe–12.3<sup>11</sup>B (аморфный сплав), <sup>56</sup>Fe–13.3<sup>11</sup>B (аморфный сплав). Сплавы приготавливались в инертной среде и на воздухе. Обогащение изотопами составляло ~ 95%.

### 3. Экспериментальные данные и их обсуждение

Измерены спектры ЯМР при 4.2 К на ядрах <sup>11</sup>B в аморфных и микрокристаллических сплавах Fe–(5–25) В из естественной смеси изотопов. Примеры спектров ЯМР приводятся на рис. 2, *a–e*. При уменьшении содержания бора в аморфных сплавах от 25 до 15 at. % спектры сдвигаются в область высоких частот.



**Рис. 2.** Спектры ЯМР  $P(f)$  на ядрах <sup>11</sup>B в аморфных сплавах Fe–(15–25) В (светлые экспериментальные точки): Fe–25 В (*a*), Fe–22 В (*b*), Fe–18 В (*c*), Fe–15 В (*d*). Кристаллические сплавы представлены экспериментальными точками соединенными линиями: *a* — *t*-Fe<sub>3</sub>B (темные точки), *o*-Fe<sub>3</sub>B (крестики); *e* — Fe–11 В (темные точки).

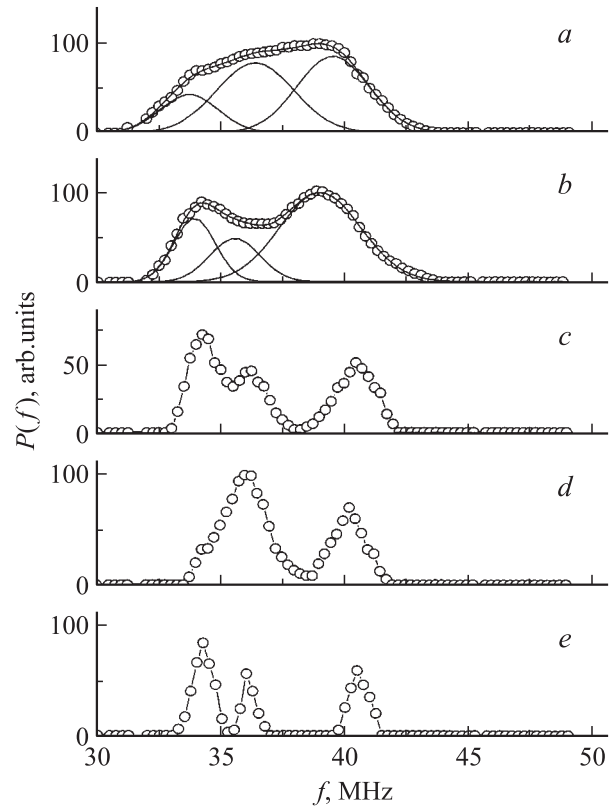
Имеется хорошее согласие этих данных с результатами, опубликованными раньше для некоторых аморфных сплавов Fe–В [4,7,8]. Распределение резонансных частот (сверхтонких полей — СТП) зависит от амплитуды возбуждения радиочастотных импульсов  $B_1$ . На рис. 2 приведены ЯМР при таких  $B_1$ , которые соответствуют углу поворота ядерных спинов на ~ 120° в каждой точке спектра, т.е. условиям возбуждения сигнала ядерного эха, близким к получению максимального сигнала эха. Зависимость положения максимума в спектре от величины  $B_1$  наблюдается в области составов Fe<sub>1-x</sub>B<sub>x</sub> с  $x < 0.17$ . Эти данные показывают, что в аморфных сплавах Fe–В существуют области с разными локальными коэффициентами усиления сигнала эха, разными локальными полями анизотропии, а также то, что аморфные сплавы имеют локальные неоднородности.

На рис. 2, *a* приведен спектр ЯМР <sup>11</sup>B  $P(f)$  в кристаллическом метастабильном сплаве Fe<sub>75</sub>B<sub>25</sub> со структурой тетрагонального борида Fe<sub>3</sub>B. Эта кристаллическая фаза получалась при отжиге аморфного сплава Fe–25 В при 500°C в течение 5 min, причем образец быстро помещался в нагретую печь при 500°C и быстро вынимался из нагретой зоны в область комнатной температуры. Термообработка проводилась в атмосфере аргона. Спектр ЯМР кристаллического сплава много уже спектра ЯМР аморфного сплава Fe–25 В. Ширина спектра для борида *t*-Fe<sub>3</sub>B составляет 1.3 кОе, а его максимум приходится на частоту 34.3 МГц (25.2 кОе). Ширина же распределения резонансных частот для аморфного сплава Fe<sub>75</sub>B<sub>25</sub> составляет 6.5 кОе.

СТП на ядрах <sup>11</sup>B в аморфных сплавах и кристаллическом сплаве Fe–25 В совпадают и равны  $H = 25.2$  кОе.

СТП на ядрах  $^{11}\text{В}$  имеет отрицательный знак (далее будут приводиться абсолютные значения СТП на ядрах  $^{11}\text{В}$ ). Метастабильная фаза  $\text{Fe}_3\text{В}$  с орторомбической фазой  $o\text{-Fe}_3\text{В}$  получается при помощи кратковременного (5–10 min) отжига аморфного сплава  $\text{Fe–25 В}$  при  $\sim 800^\circ\text{C}$  [6,7,9]. Спектр ЯМР на ядрах  $^{11}\text{В}$  в бориде  $o\text{-Fe}_3\text{В}$  имеет также узкую ширину (1.3 МГц) и находится при 36.3 МГц (рис. 2), что согласуется с данными [7]. Как видно, резонансные частоты (СТП на ядрах  $^{11}\text{В}$ ) для тетрагонального и орторомбического боридов различны и резонансная частота  $f_{\text{res}}$  ядер  $^{11}\text{В}$  в аморфном сплаве  $\text{Fe–25 В}$  совпадает с  $f_{\text{res}}$  только для фазы  $t\text{-Fe}_3\text{В}$ . Этот результат показывает, что ближайшие окружения атомов бора в аморфном и кристаллическом сплавах  $\text{Fe}_{75}\text{В}_{25}$  одинаковы, БП в аморфном сплаве  $\text{Fe}_{75}\text{В}_{25}$  аналогичен БП вокруг атомов бора в кристаллическом сплаве  $\text{Fe}_3\text{В}$  с тетрагональной структурой. Впервые эта идея была проверена экспериментально методом ЯМР на ядрах  $^{11}\text{В}$  в [4]. На рис. 2, *e* приводится спектр ЯМР быстрозакаленного микроструктурного сплава  $\text{Fe–11 В}$  из естественной смеси изотопов. Согласно рентгенографическим измерениям, сплав содержит  $\alpha\text{-Fe}$ ,  $t$ - и  $o$ -фазы  $\text{Fe}_3\text{В}$ . Спектр ЯМР этого сплава содержит разрешенную узкую линию при 46.7 МГц от ядер  $^{57}\text{Fe}$  в  $\alpha\text{-Fe}$  (эта линия не показана на рисунке) и разрешенные линии при 34.5 и 36.5 МГц, которые обусловлены наличием ядер  $^{11}\text{В}$  в фазах  $o\text{-Fe}_3\text{В}$  (36.5 МГц) и  $t\text{-Fe}_3\text{В}$  (34.5 МГц), а также неразрешенные пики при 38–41 МГц, природа которых будет обсуждаться далее. Сигналы ЯМР  $^{57}\text{Fe}$  в орторомбической фазе  $\text{Fe}_3\text{В}$  могут вносить вклад в спектр ЯМР быстрозакаленного кристаллического сплава, близкого по составу к  $\text{Fe–(11–12) В}$  [7,8].

На рис. 3, *a–e* представлены спектры ЯМР ядер  $^{11}\text{В}$  в быстрозакаленных кристаллических и аморфных сплавах  $\text{Fe–(4–13) В}$ . Пик при 34.3 МГц относится к резонансу ядер  $^{11}\text{В}$ , атомы которых принадлежат  $t$ -фазе  $\text{Fe}_3\text{В}$ . Пик при 36.3 МГц принадлежит ядрам  $^{11}\text{В}$  в фазе  $o\text{-Fe}_3\text{В}$ . В спектрах кристаллических сплавов (рис. 3) присутствует интенсивная линия  $^{11}\text{В}$  при 40.0–40.4 МГц. В соединении  $\text{Fe}_2\text{В}$  резонанс ядер  $^{11}\text{В}$  приходится на частоту 40.7 МГц [10], и можно было бы связать сигналы  $^{11}\text{В}$  в исследуемых сплавах с ядрами  $^{11}\text{В}$  в фазе  $\text{Fe}_2\text{В}$ . Однако рентгенографические данные показывают, что в образцах  $^{56}\text{Fe–4.0}^{11}\text{В}$  и  $^{56}\text{Fe–7.9}^{11}\text{В}$  дифракционные линии от  $\text{Fe}_2\text{В}$  отсутствуют, а в образцах  $^{56}\text{Fe–11.2}^{10}\text{В}$  следы фазы  $\text{Fe}_2\text{В}$  присутствуют в очень малом количестве. Из полученных данных следует, что фаза  $\alpha\text{-Fe}$  в микроструктурных сплавах  $\text{Fe–В}$  является по объему наибольшей ( $\sim 95\%$ ). Рентгенографические измерения также показали, что параметры решетки  $\alpha\text{-Fe}$  уменьшаются при увеличении содержания бора; это означает, что атомы бора содержатся в  $\alpha\text{-Fe}$  как атомы замещения, что согласуется с данными [6,7,9]. Этот вывод также следует из мессбауэровских исследований микроструктурных сплавов  $\text{Fe–В}$  [6], где наблюдался парциальный спектр от ядер  $^{57}\text{Fe}$ , атомы которых содержатся в ближайшей координационной сфере атом бора.



**Рис. 3.** Спектры ЯМР  $^{11}\text{В}$   $P(f)$  в аморфных и микроструктурных сплавах  $\text{Fe–В}$ :  $^{56}\text{Fe–13.3}^{11}\text{В}$  (аморфный) (*a*),  $^{56}\text{Fe–12.3}^{11}\text{В}$  (аморфный) (*b*),  $^{56}\text{Fe–11.2}^{11}\text{В}$  (*c*),  $^{56}\text{Fe–7.9}^{11}\text{В}$  (*d*),  $^{56}\text{Fe–4.0}^{11}\text{В}$  (*e*).

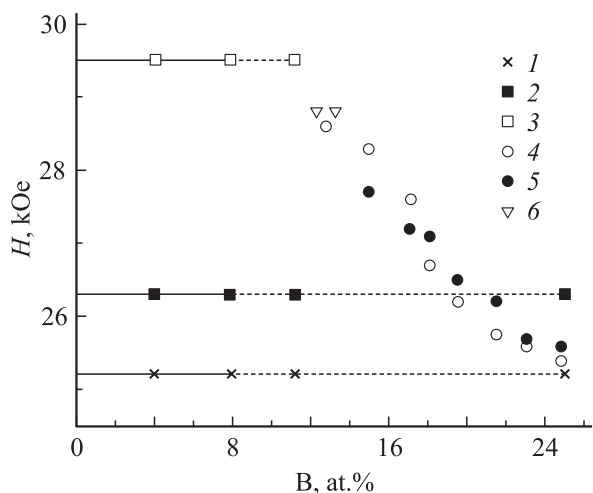
Из сравнения данных ЯМР и рентгенографии следует, что ЯМР  $^{11}\text{В}$  при 40.3 МГц ( $H = 29.5 \text{ kOe}$ ) относится к ядрам  $^{11}\text{В}$  в фазе  $\alpha\text{-Fe}$ . При переходе сплава  $\text{Fe–В}$  в аморфное состояние (см. спектр ЯМР  $^{11}\text{В}$  в аморфном сплаве  $^{56}\text{Fe–12.3}^{11}\text{В}$ ) наблюдаются следующие эффекты: 1) линии ЯМР  $^{11}\text{В}$  расширяются; 2) линии ЯМР  $^{11}\text{В}$ , соответствующие микрообластям (кластерам) с БП типа  $\alpha\text{-Fe}$ , слегка смещаются в сторону низких частот к  $\sim 39.3 \text{ МГц}$  ( $H = 28.8 \text{ kOe}$ ); 3) положения максимумов ЯМР спектра  $^{11}\text{В}$  в кластерах  $t$ - и  $o$ -фаз практически не изменяются. Смещение пика ЯМР  $^{11}\text{В}$  атомов бора в кластерах с БП типа  $\alpha\text{-Fe}$  в аморфных сплавах  $\text{Fe–В}$ , вероятно, обусловлено увеличением содержания атомов бора в этих кластерах и ростом напряжений в сплаве при образовании аморфного состояния.

На рис. 3 представлен спектр ЯМР  $^{11}\text{В}$  в аморфных сплавах  $^{56}\text{Fe–12.3}^{11}\text{В}$  и  $^{56}\text{Fe–13.3}^{11}\text{В}$ . Спектр  $^{11}\text{В}$  в аморфном сплаве  $^{56}\text{Fe–12.3}^{11}\text{В}$  имеет разрешенные линии, близкие к положению резонансных линий  $^{11}\text{В}$  в кристаллических фазах  $t\text{-Fe}_3\text{В}$  и  $\alpha\text{-Fe}$ . Хотя спектр ЯМР  $^{11}\text{В}$  аморфного сплава  $^{56}\text{Fe–13.3}^{11}\text{В}$  не содержит разрешенных линий, из рисунка видно, что он содержит компоненты, характерные для резонанса  $^{11}\text{В}$  в кристаллических фазах  $t\text{-Fe}_3\text{В}$ ,  $o\text{-Fe}_3\text{В}$  и  $\alpha\text{-Fe}$ . На рисунке приводится разложение спектра ЯМР аморфных сплавов

$^{56}\text{Fe}-12.3^{11}\text{В}$  и  $^{56}\text{Fe}-13.8^{11}\text{В}$  на гауссовские компоненты, имеющие максимумы при 34.3, 36.5 и 39.3 МГц. Отношение площадей компонентов спектра позволяет оценить в данном образце относительное содержание кластеров с различными БП. Оказалось, что в образце  $^{56}\text{Fe}-12.3^{11}\text{В}$  содержится примерно 60% кластеров с БП типа  $\alpha\text{-Fe}$ , 22% кластеров с БП типа  $o\text{-Fe}_3\text{В}$ , 18% кластеров с БП типа  $t\text{-Fe}_3\text{В}$ , а для образца  $^{56}\text{Fe}-13.3^{11}\text{В}$  соответственно получили 19, 64 и 18%. Эти данные показывают, что аморфные сплавы  $\text{Fe}-(12-14)\text{В}$  состоят из трех типов кластеров с БП типа  $\alpha\text{-Fe}$ ,  $t$ - и  $o\text{-Fe}_3\text{В}$ .

#### 4. Ближний порядок и локальная структура аморфных сплавов $\text{Fe}-\text{В}$

На рис. 4 приводится концентрационная зависимость средних  $H_{\text{ав}}$  и максимальных  $H_{\text{max}}$  СТП на ядрах  $^{11}\text{В}$  в аморфных сплавах  $\text{Fe}-\text{В}$ , а также значений СТП  $H$  на ядрах  $^{11}\text{В}$  в кристаллических метастабильных фазах  $t\text{-Fe}_3\text{В}$ ,  $o\text{-Fe}_3\text{В}$  и  $\alpha\text{-Fe}$ . Как видно из рис. 4, средние и максимальные значения СТП на ядрах  $^{11}\text{В}$  ( $H_{\text{max}}$  соответствует наиболее вероятной конфигурации вокруг атомов бора при данном составе) лежат в области значений 25–29 кОе и перекрывают значения СТП ядер  $^{11}\text{В}$  в  $t$ -,  $o$ -фазах  $\text{Fe}_2\text{В}$  и  $\alpha\text{-Fe}$ . В области составов  $\text{Fe}-(25-22)\text{В}$  значения  $H_{\text{max}}^{11}\text{В}$  лежат в диапазоне полей, характерных для  $^{11}\text{В}$  в  $t\text{-Fe}_3\text{В}$ . Это означает, что БП вокруг атомов бора в этой области составов совпадает с БП атомов бора в  $t\text{-Fe}_3\text{В}$ . При увеличении содержания бора значения СТП на ядрах  $^{11}\text{В}$  смещаются к СТП  $^{11}\text{В}$  в фазе  $o\text{-Fe}_3\text{В}$ , т. е. увеличивается доля атомов бора с БП,



**Рис. 4.** Концентрационная зависимость СТП  $H$  на ядрах  $^{11}\text{В}$  аморфных и микрокристаллических сплавов  $\text{Fe}-\text{В}$  из естественной смеси изотопов, содержащих 4–25 ат. % В. 1 — СТП на ядрах  $^{11}\text{В}$  в  $t\text{-Fe}_3\text{В}$ ; 2 — СТП на ядрах  $^{11}\text{В}$  в  $o\text{-Fe}_3\text{В}$ ; 3 — СТП на ядрах  $^{11}\text{В}$  в кристаллитах  $\alpha\text{-Fe}$ ; 4 —  $H_{\text{max}}$ , СТП на ядрах  $^{11}\text{В}$  в максимуме спектра; 5 —  $H_{\text{ав}}$ , СТП на ядрах  $^{11}\text{В}$  в центре тяжести спектра; 6 — СТП на ядрах  $^{11}\text{В}$  в кластерах типа  $\alpha\text{-Fe}$  аморфных сплавов.

характерным для атомов бора в фазе  $o\text{-Fe}_3\text{В}$ . Обращает на себя внимание, то обстоятельство, что при увеличении содержания бора в области составов  $\text{Fe}-(18-16)\text{В}$  наблюдается резкий рост  $H_{\text{max}}$ . Из рис. 4 следует, что в этой области составов происходит изменение локальной структуры, а именно концентрационный переход от локальной структуры, которая характеризуется существованием микрообластей (кластеров) преимущественно с БП атомов бора в бориде  $\text{Fe}_3\text{В}$  (преимущественно с БП типа фазы  $o\text{-Fe}_3\text{В}$ ), к локальной структуре, в которой появляются дополнительно кластеры с ближним порядком типа  $\alpha\text{-Fe}$ . Отметим также, что в этой области составов наблюдаются аномалии физических свойств, например инварианная аномалия, когда температурный коэффициент линейного расширения равен нулю в сплаве  $\text{Fe}-17\text{В}$  [1].

Рассмотрим СТП и локальные окружения атомов бора в аморфных и кристаллических сплавах  $\text{Fe}-\text{В}$ . Атом бора не имеет магнитного момента, и поэтому СТП на ядре бора определяется Ферми-контактным взаимодействием, причем это поле пропорционально электронной спиновой плотности на ядре рассматриваемого атома [11]. Поляризация спинов  $s$ -электронов обусловлена  $3d$ -электронами магнитных атомов железа (вокруг атома бора) за счет  $s-d$ -обменного взаимодействия. Обычно СТП  $H$  на ядре немагнитного атома записывается в виде

$$H = a(\text{В})N_1\mu_1(\text{Fe}), \quad (1)$$

где  $a(\text{В})$  — константа сверхтонкой связи для ядер бора,  $N_1$  — число атомов железа в первой координационной сфере (1 КС) атомов бора,  $\mu_1(\text{Fe})$  — магнитный момент атомов матрицы (атомов железа), окружающих рассматриваемый атом. Из этой формулы видна связь между СТП на ядре бора  $^{11}\text{В}$  ( $^{10}\text{В}$ ) и числом атомов железа в ближайшем окружении бора.

Определим константы связи  $a(\text{В})$  для соединений  $t\text{-Fe}_3\text{В}$  и  $o\text{-Fe}_3\text{В}$ , а также для  $\alpha\text{-Fe}$ . Для  $t\text{-Fe}_3\text{В}$   $H(\text{В}) = 25.3$  кОе и в 1 КС атома бора содержится 9Fe [12] (4Fe(1) с  $\mu[\text{Fe}(1)] = 1.7\mu_{\text{В}}$ , 3Fe(2) с  $\mu[\text{Fe}(2)] = 2.0\mu_{\text{В}}$  и 2Fe(3) с  $\mu[\text{Fe}(3)] = 2.1\mu_{\text{В}}$ ) [13]. Средний магнитный момент атомов железа в 1КС атома бора равен  $\mu(\text{Fe}) = 1.89\mu_{\text{В}}$  [14,15]. Это дает величину  $a(\text{В})(t\text{-Fe}_3\text{В}) = 1.48$  кОе/ $(\mu_{\text{В}} \cdot \text{atom Fe})$  [4,7,8]. Девять атомов железа вокруг атома бора образуют тетрадекаэдр [12]. В  $o$ -фазе  $\text{Fe}_3\text{В}$  вокруг атома бора девять атомов Fe образуют многогранник с девятью вершинами [12]. Последний представляет собой треугольную призму с тремя пирамидами на ее гранях. Оценим константу  $a(\text{В})$  в (1) для атомов бора в  $o$ -фазе ( $N_1 = 9$ ). Так как средний магнитный момент атомов железа в  $o$ -фазе равен  $\mu(\text{Fe}) = 1.97\mu_{\text{В}}$ , а  $H_{\text{ав}} = 26.7$  кОе, то  $a(\text{В}) = 1.51$  кОе/ $(\mu_{\text{В}} \cdot \text{atom Fe})$ .

Как указывалось выше, в аморфных сплавах  $\text{Fe}_{1-x}\text{В}_x$  при  $x < 0.15$  появляются кластеры с БП типа  $\alpha\text{-Fe}$ . СТП на ядрах  $^{11}\text{В}$   $H(\text{В})$  в этих кластерах равно 29.7 кОе

в кристаллитах  $\alpha$ -Fe и 28.6 кОе в кластерах аморфных сплавов с БП типа  $\alpha$ -Fe. Число атомов железа в 1 КС атома бора равно  $N_1 = 8$ . Константа  $a(B)$  в формуле (1) для ядер  $^{11}\text{B}$  в кластерах  $\alpha$ -Fe будет равна  $a(B) = 1.65a(B)/(\mu_B \cdot \text{atom Fe})$ . Из рис. 2 следует, что СТП на ядрах  $^{11}\text{B}$  в  $t$ -Fe<sub>3</sub>B и аморфном сплаве Fe–25B одинаковы, поэтому одним и тем же должно быть и число ближайших атомов железа вокруг бора для этих двух сплавов, так как магнитные моменты атомов железа в этих сплавах совпадают [14,15]. Действительно, полагая, что  $a(B) = 1.48a(B)/(\mu_B \cdot \text{atom Fe})$  для  $t$ -фазы и аморфного сплава Fe–25B, а  $\mu(\text{Fe}) = 2.0\mu_B$  в аморфном сплаве, получим, что в аморфном сплаве  $N_1 = 8.6(\approx 9)$ . Если  $a(B) = 1.48 \text{ кОе}/(\mu_B \cdot \text{atom Fe})$  для аморфных сплавов Fe–(20–25)B, то для  $\mu(\text{Fe})$ , взятых из [15,16], получим  $N_1 \cong 9$ . Число атомов железа в 1 КС атома бора в кластерах с БП типа  $\alpha$ -Fe равно восьми.

Методом ЯМР не удается оценить размеры кластеров. Изучение аморфных сплавов методом нейтронографии [16] показывает, что в аморфных сплавах Fe–B кроме диффузного рассеяния имеется также и малоугловое рассеяние, обусловленное атомными неоднородностями. Обобщая результаты работ по малоугловому рассеянию нейтронов, можно заключить, что атомная структура аморфных сплавов Fe–B неоднородна и существуют характерные области с неодинаковой плотностью (кластеры) размером 8–10 Å. Сравнение данных по малоугловому рассеянию нейтронов и данных ЯМР позволяет предположить, что указанные кластеры размером 8–10 Å и являются теми областями, в которых существует различный БП, полученный в представленных данных по ЯМР.

Таким образом, атомная структура аморфных сплавов Fe–B характеризуется существенной локальной неоднородностью. В области составов Fe–(23–25)B аморфные сплавы состоят из кластеров с БП вокруг атомов бора по типу тетрагональной фазы Fe<sub>3</sub>B, и атомы бора содержат в ближайшей сфере девять атомов железа. В области составов Fe–(22–17)B появляются дополнительно кластеры с БП типа орторомбической фазы Fe<sub>3</sub>B, в которых атомы бора содержат в ближайшей сфере также девять атомов железа. Симметрия ближайшего окружения и ближайшие расстояния атомов бора и железа в этих двух БП существенно различаются, что обуславливает различие значений СТП на ядрах  $^{11}\text{B}$  в двух типах кластеров. В области составов Fe–(16–12)B к этим двум типам кластеров с БП по типу  $t$ -Fe<sub>3</sub>B и  $o$ -Fe<sub>3</sub>B добавляются еще кластеры с БП по типу  $\alpha$ -Fe, в которых атомы бора содержат в ближайшей координационной сфере восемь атомов железа. Количество кластеров типа  $\alpha$ -Fe увеличивается при уменьшении содержания бора, и в сплавах Fe–(14–12)B этот тип кластеров становится преобладающим.

## Список литературы

- [1] Аморфные металлические сплавы / Под ред. Ф.Е. Любарского. Металлургия, М. (1987). 572 с.
- [2] P. Panissod, I. Bakany, J. Durand, J.J. Budnick. Nucl. Instr. Method **199**, 99 (1982).
- [3] P.C. Исхаков, М.М. Карпенко, Г.В. Попов, В.П. Овчаров. ФММ **61**, 265 (1986).
- [4] В.С. Покатилов. ДАН СССР **257**, 95 (1981).
- [5] R.C. Handy. J. Appl. Phys. **62**, R 15 (1987).
- [6] H. Ino, H. Ichinose, K. Nagata. In: Rapidly quenched metals / Eds S. Steeb, H. Warlimont. Elsevier Science Publishers B.V. (1985). 530 p.
- [7] Y.D. Zhang, J.I. Budnick, J.C. Ford, W.A. Hines, F.H. Sanchez. Appl. Phys. **61**, 3231 (1987).
- [8] V. Pokatilov, N. Dyakonova. Hefepine Interaction **59**, 525 (1990).
- [9] M. Matura. Solid State Commun. **30**, 231 (1979).
- [10] I.D. Weisman, L.H. Swartsenbruber. Phys. Rev. **177**, 465 (1969).
- [11] Е.А. Туров, М.П. Петров. Ядерный магнитный резонанс в ферро- и антиферромагнетиках. Наука, М. (1969). 260 с.
- [12] П.И. Крипякевич. Структурные типы интерметаллических соединений. Наука, М. (1977). С. 155.
- [13] I. Vincze, D.S. Bondreaux, M. Tegze. Phys. Rev. B **19**, 4896 (1979).
- [14] R. Hasegava, R. Ray. Phys. Rev. B **20**, 211 (1979).
- [15] В.С. Покатилов. Новые магнитные материалы микроэлектроники. Сб. тр. XIX Междунар. школы-семинара. М. (2004). С. 509.
- [16] P. Lamparter, S. Steeb, D.M. Kroeger, S. Spooner. Mater. Sci. Eng. **97**, 227 (1988).