

УДК 539.213.2:536.26:536.425

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА СПИННИНГОВАННЫХ ЛЕНТ Fe–Cu–Nb–Si–B

© 2020 г. Д. В. Балацкий^{1,2,*}, Г. С. Крайнова¹, В. С. Плотников¹, Н. В. Ильин¹,
В. В. Ткачев¹, Ю. В. Князев³

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
“Дальневосточный федеральный университет”, Владивосток, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химии Дальневосточного отделения
Российской академии наук, Владивосток, Россия

³Институт физики имени Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук –
обособленное подразделение Федерального исследовательского центра “Красноярский научный центр
Сибирского отделения Российской академии наук”, Красноярск, Россия

*E-mail: denis.balatskiy@bk.ru

Поступила в редакцию 19.03.2020 г.

После доработки 10.04.2020 г.

Принята к публикации 27.05.2020 г.

Измерены зависимости относительной намагниченности насыщения от температуры для аморфно-нанокристаллических лент типа “Finemet” состава $\text{FeCu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13,5}\text{B}_8$, $\text{FeCu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13}\text{B}_6$, $\text{FeCu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13}\text{B}_{13}$ методом Мёссбауэровской спектроскопии установлен характер процессов структурной релаксации аморфных сплавов, а также определены основные магнитные характеристики. Обнаружено, что процессы структурной релаксации аморфной ленты при отжиге проходят в несколько этапов.

DOI: 10.31857/S0367676520090069

В настоящее время широко исследуются аморфно-нанокристаллические материалы с контролируемой долей упорядоченной фазы. Одним из важных свойств неупорядоченных систем является наличие магнитного порядка при отсутствии трансляционной симметрии на атомном уровне [1, 2]. Свойства аморфно-нанокристаллических систем отличаются от свойств как аморфных, так и кристаллических материалов [3]. В связи с этим неравновесные и неупорядоченные аморфные и равновесные аморфно-нанокристаллические структуры вызывают огромный интерес [4, 5].

В рамках данной работы были исследованы аморфно-нанокристаллические ленты типа “Finemet” с разным содержанием аморфизаторов состава $\text{FeCu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13,5}\text{B}_8$, $\text{FeCu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13}\text{B}_6$, $\text{FeCu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13}\text{B}_{13}$, толщиной ~20 мкм, полученные методом спиннингования (скорость охлаждения ~ 10^6 К/с).

Анализ динамики магнитных свойств, структурная стабильность ленты и переход ее в кристаллическое состояние контролировались при нагреве от комнатной до 700°C (скорость нагрева 10 град/мин) с применением вибрационного магнитометра.

По данным зависимости относительной намагниченности насыщения от температуры [5, 6] бы-

ли определены основные магнитные характеристики образцов: температура Кюри аморфного состояния $T_c^{\text{ам}}$, температура начала кристаллизации $T_{\text{кр}}$, разность температур в состоянии с нулевым магнитным моментом $\Delta T_{\text{пм}}$, температура максимального магнитного упорядочения в кристаллическом состоянии $T_{\text{кр}}^{\text{max}}$, а также температура Кюри кристаллического состояния $T_c^{\text{кр}}$, табл. 1.

Мёссбауэровские спектры были получены при комнатной температуре в геометрии пропускания с источником $^{57}\text{Co}(\text{Rh})$. Калибровка шкалы скоростей производилась по спектру металлического железа ($\alpha\text{-Fe}$), величины изомерного сдвига определялись относительно центра тяжести спектра $\alpha\text{-Fe}$.

Привлечение метода Мёссбауэровской спектроскопии позволило получить информацию о распределении сверхтонких магнитных полей и ближайшем окружении атома ^{57}Fe , как для исходно аморфных, так и для отожженных в течение 30 минут при температурах 550°C и 650°C образцов, рис. 1–3. В исходном состоянии мессбауэровские спектры представляют собой спектры ферромагнетиков с широкими и перекрытыми линиями поглощения, которые соответствуют аморфным материалам. По мере повышения тем-

Таблица 1. Характеристические температуры для лент FeCu₁Nb₃Si_{13.5}B₈, FeCu₁Nb₃Si₁₃B₆, FeCu₁Nb₃Si₁₃B₁₃

№	Состав образца	$T_c^{ам}$, °C	$\Delta T_{пм}$, °C	$T_{кр}$, °C	$T_{кр}^{max}$, °C	$T_c^{кр}$, °C
1	FeCu ₁ Nb ₃ Si ₁₃ B ₆	375	175	550	625	675
2	FeCu ₁ Nb ₃ Si _{13.5} B ₈	350	200	550	600	650
3	FeCu ₁ Nb ₃ Si ₁₃ B ₁₃	400	200	600	625	675

пературы начинаются процессы структурной релаксации, связанные с выходом свободного объема, снятием напряжения прокатки, сопровождающиеся появлением различных кристаллических фаз в образце, которые возможно определить, применяя метод мессбауэровской спектроскопии.

Обработка мессбауэровских спектров проводилась в два этапа. На первом этапе было определено распределение сверхтонких полей в экспериментальных спектрах. Из распределения сверхтонких полей определялись величины наиболее вероятных полей в исследуемых образцах, которые затем вносились в программу для моделирования теоретического спектра, варьировались величины изомерного сдвига, квадрупольного расщепления, площади и ширины на полувысоте каждого подспектра (табл. 2).

В результате были обнаружены особенности, связанные с проявлением возможных неэквивалентных позиций железа, искажение его локального окружения. Рассчитанные значения маг-

нитных полей позволили определить возможные позиции и ближайшее окружение атомов ⁵⁷Fe находящихся в образцах (рис. 4).

Для аморфных материалов центральный атом железа может иметь $n = 14$ ближайших соседей и $(14n)$ атомов железа среди ближайшего окружения в представлении полиэдров Вороного в моделях случайно плотноупакованных структур (СПУ-структур) [1]. Вероятность нахождения таких атомных конфигураций в аморфной структуре описывается биномиальным распределением:

$$P_n = \frac{0.5}{1-c} \binom{14}{n} (2c)^n (1-2c)^{14-n}, \quad (1)$$

где c – концентрация примесных атомов.

Вероятность нахождения атомных конфигураций в кристаллической структуре, т.е. для образцов, отожженных при температурах 550 и 650°C описывается другим биномиальным распределением ближайшего окружения в представлении

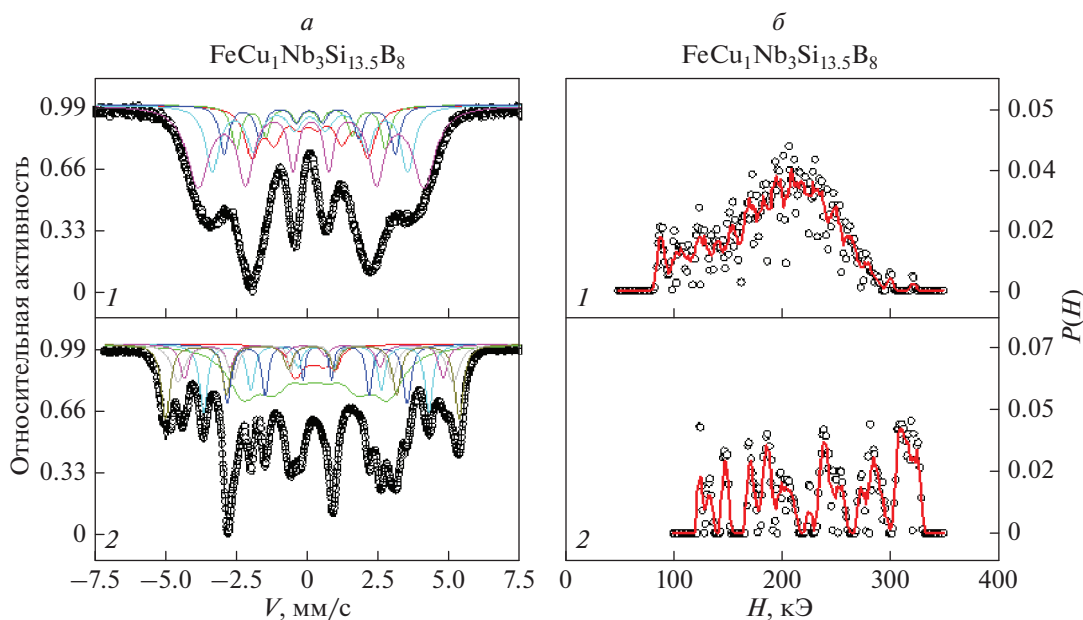


Рис. 1. Серия мессбауэровских спектров (а) и распределение сверхтонких магнитных полей (б) в ленте FeCu₁Nb₃Si_{13.5}B₈. 1 – Аморфное состояние, 2 – отожженный при температуре 650°C образец.

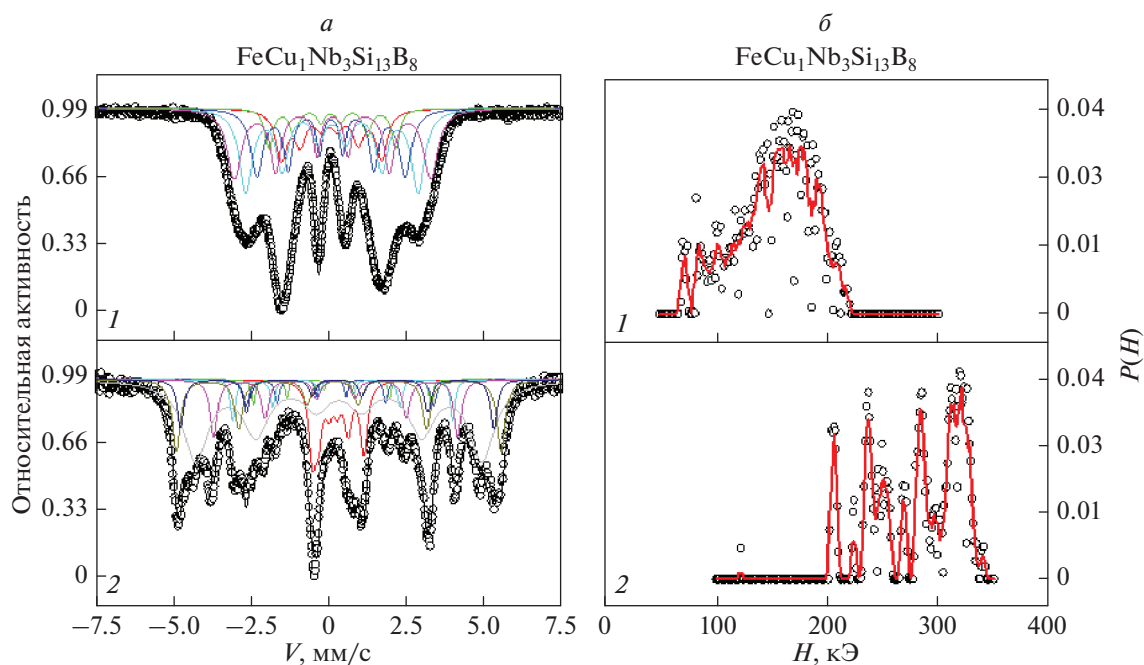


Рис. 2. Серия мёссбауэровских спектров (а) и распределение сверхтонких магнитных полей (б) в ленте $\text{FeCu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13}\text{B}_8$. 1 – Аморфное состояние, 2 – отожженный при температуре 650°C образец.

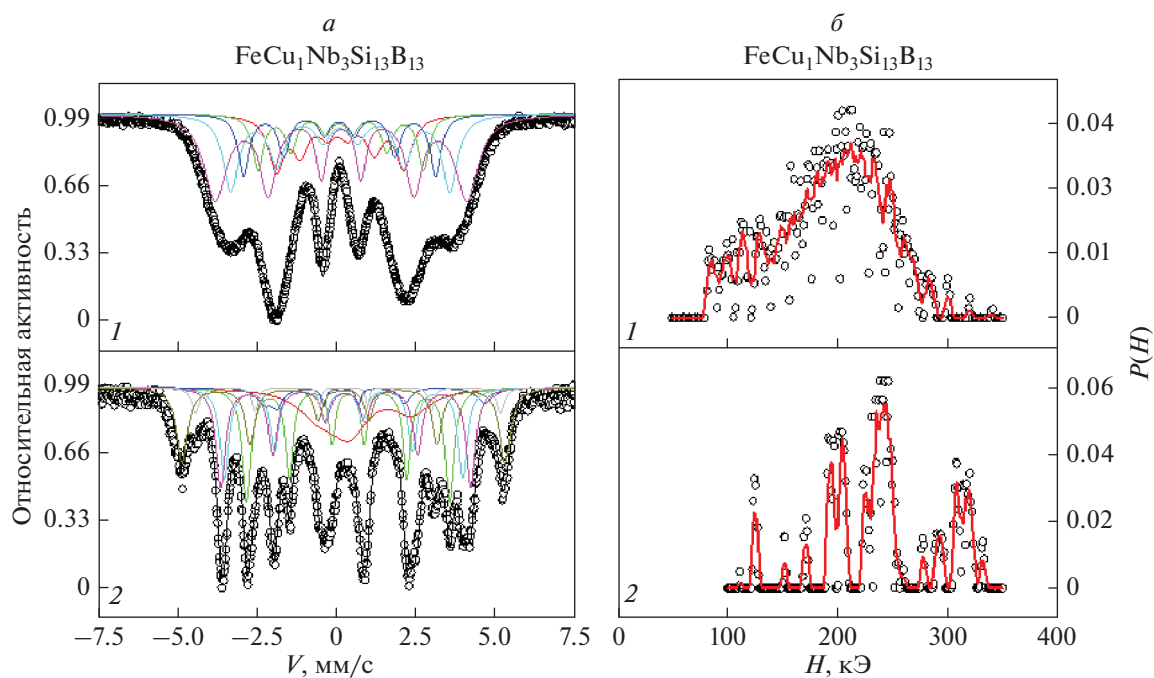


Рис. 3. Серия мёссбауэровских спектров (а) и распределение сверхтонких магнитных полей (б) в ленте $\text{FeCu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13}\text{B}_{13}$. 1 – Аморфное состояние, 2 – отожженный при температуре 650°C образец.

$D0_3$ решетки, в которой определяются позиции A и D , формула (2) [7].

$$P_n = \frac{0.5}{1-c} \binom{8}{n} (2c)^n (1-2c)^{8-n}. \quad (2)$$

Распределение вероятностей ближайших соседей в представлении полиэдров Вороного в моделях СПУ-структур и распределение количества атомов примеси n в ближайшем окружении атома железа представлены на рис. 4.

Таблица 2. Параметры обработки мёссбауэровских спектров ленты FeCu₁Nb₃Si₁₃B₁₃. *IS* – изомерный сдвиг для α-Fe и источника ⁵⁷Co(Rh), ±0.005 мм/с, *H* – сверхтонкое поле, ±5 кЭ, *QS* – квадрупольное расщепление, ±0.01 мм/с

	<i>IS</i> , мм/с	<i>H</i> , кЭ	<i>QS</i> , мм/с	Относительная площадь, %	Число соседей	Фаза
исходный						
S1	0.13	119.7	0.19	16.2	7	
S2	0.16	155.6	0.12	11.8	6	
S3	0.15	180.3	0.02	13.0	5	
S4	0.18	205.7	0	22.4	4	
S5	0.21	236.3	0	36.6	3	
Отожженный при 550°C						
S1	0	113.4	1.40	4.0	A8	Fe–Si
S2	0.22	132.3	0	17.0	A7	
S3	0.21	174.5	0.01	15.1	A6	
S4	0.33	199.5	0.08	18.4	A5	
S5	0.05	205.2	0	7.3	A4	
S6	0.27	245.2	0	29.8	A3	
S7	0.18	310.6	0.02	8.4	A2	
Отожженный при 650°C						
S1	0.41	59.2	3.24	16.7	Relax	Fe–Si
S2	0.14	198.4	0	4.1	A6	
S3	0.46	215.1	2.13	5.2	A5	
S4	0	232.8	0	16.8	A4	
S5	0.06	244.3	0.04	19.1	A3	
S6	0.07	297.9	0.31	21.1	A2	
S7	0	315.6	0	17.0	A1	

Для аморфного состояния (рис. 4 и табл. 2) экспериментально обнаружены позиции железа с ближайшим окружением, состоящим от 3 до 7 немагнитных соседей. Для отожженного при температуре 550°C образца обнаружены позиции A2–A8 относящиеся к фазе Fe–Si, при температуре 650°C образца – позиции A1–A6. Также ближайшее окружение для образцов, отожженных при 650°C, согласуются с теоретической зависимостью, рассчитанной через биномиальное распределение. Данный факт можно объяснить тем, что температура 650°C является температурой, при которой в исследованных образцах прошли процес-

сы структурной релаксации вплоть до кристаллизации.

Из вышесказанного сделаны следующие выводы:

1. Термомагнитные исследования быстрозакаленных сплавов Fe–Cu–Nb–Si–B показали: увеличение процентного содержания металлоидов (Si, B) без изменения концентрации легирующих добавок (Cu, Nb) приводит к увеличению температуры магнитного фазового перехода в парамагнитное состояние, T_c^{am} , уменьшению интервала температур парамагнитного состояния, ΔT_{pm} , увеличению температуры кристаллизации, $T_{кр}$.

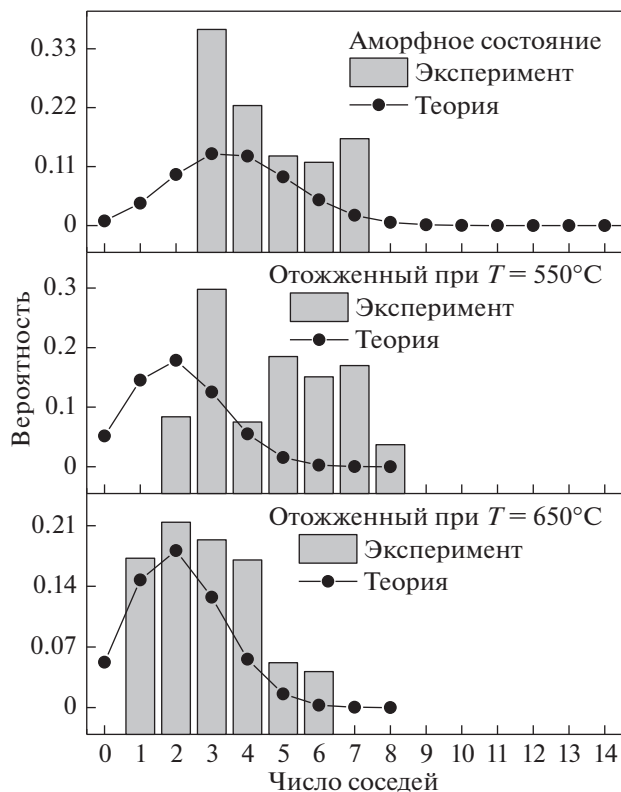


Рис. 4. Распределение вероятностей ближайших соседей в представлении полиэдров Вороного в моделях СПУ-структур (кривая с точками). Распределение количества атомов примеси n в ближайшем окружении атома железа для ленты $\text{FeCu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13}\text{B}_3$ (колонки).

2. Данные мёссбауэровской спектроскопии позволили получить распределение сверхтонких полей, наиболее вероятное значение которого для

аморфных быстрозакаленных сплавов с содержанием металлоидов более 20% ~ 210 кЭ, $H_{\text{ст}} \sim 210$ кЭ для сплава $\text{FeCu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13}\text{B}_6$ и $H_{\text{ст}} \sim 180$ кЭ для сплава $\text{FeCu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{14}\text{B}_5$. Приведенные значения сверхтонких полей соответствуют ближайшему окружению атома железа от 3 до 7 немагнитных соседей. Увеличение наивероятнейшего $H_{\text{ст}}$ отображается в уменьшении числа немагнитных атомов от 1 до 5.

3. Отжиг до температур 550 и 650°C выявил сценарии структурной релаксации сплавов по изменению распределения сверхтонких полей и числа немагнитных атомов в ближайшем окружении. Увеличение дисперсии распределения $H_{\text{ст}}$ и вероятностей ближайших соседей позволяет представить мессбауэровские спектры в виде суперпозиции 7–8 подспектров, что отображает сложный характер структуры быстрозакаленных сплавов на данном этапе структурной релаксации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хандрик К., Кобе С. Аморфные ферро- и ферримагнетики. М.: Мир, 1982. 296 с.
2. Судзуки К., Фудзимори Х., Хасимото К. Аморфные сплавы. М.: Металлургия, 1987. 328 с.
3. Глезер А.М., Шурыгина Н.А. Аморфно-нанокристаллические сплавы. М.: Физматлит, 2013. 450 с.
4. Chunling Q., Qingfeng H., Yongyan L. et al. // Mat. Sci. Eng. C. 2016. V. 69. P. 513.
5. Tkachev V.V., Tsesarskaya A.K., Ilin. N.V. et al. // AIP Conf. Proc. 2017. V. 1874. Art. № 040051.
6. Ильин Н.В., Ткачев В.В., Федорец А.Н. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82. № 8. С. 951; Ilin N.V., Tkachev V.V., Fedorets A.N. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2018. V. 82. № 7. P. 860.
7. Rixeckeret G., Schaaf P., Gonser U. // Phys. Stat. Sol. A. 1993. V. 139. P. 309.