

УДК 548:537.611.44

ЗАВИСИМОСТЬ КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЫ ОТ РАЗМЕРА ЗЕРНА В ЛЕНТАХ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ $\text{Fe}_{64}\text{Co}_{21}\text{B}_{15}$

© 2013 г. С. В. Комогорцев¹, Р. С. Исхаков^{1,2}, А. Д. Балаев¹, А. А. Гаврилюк³

E-mail: komogor@iph.krasn.ru

Приведены результаты исследования структуры и магнитных свойств нанокристаллических лент $\text{Fe}_{64}\text{Co}_{21}\text{B}_{15}$, полученных в результате отжига исходного аморфного сплава. Установлено, что изотермический часовой отжиг при температурах от 300 до 480 °С приводит к росту размера кристаллита ОЦК-твердого раствора $\text{FeCo}(\text{B})$ от 12 до 22 нм. Форма петли гистерезиса значительно изменяется в результате отжига. Установлено, что коэрцитивная сила H_c и размер зерна D связаны как $H_c \sim D^2$.

DOI: 10.7868/S0367676513100219

ВВЕДЕНИЕ

Важным результатом, демонстрирующим отличие магнетизма нанокристаллических сплавов от магнетизма крупнозернистых поликристаллических сплавов, является степенная зависимость коэрцитивной силы H_c от размера кристаллита $H_c \sim D^n$ [1–4]. Эта зависимость означает резкий рост H_c с увеличением размера зерна, в то время как в поликристаллических материалах рост зерна приводит к уменьшению величины H_c . Впервые полученная на серии сплавов $\text{Fe}_{73.5}\text{CuNb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ [1] зависимость $H_c \sim D^6$ привлекла значительное внимание, была многократно подтверждена на многих других сплавах [2, 5, 6] и в настоящее время уже включена в современные монографии по магнетизму [2, 3].

Объяснение степенного роста коэрцитивной силы от размера зерна дает модель случайной магнитной анизотропии [1–4]. Согласно данной модели, магнитную структуру аморфных и нанокристаллических магнитных сплавов можно представить ансамблем стохастических магнитных доменов, самопроизвольно образованных большим количеством частиц [4]. Макроскопические магнитные характеристики наномангнетиков оказались обусловленными размером этих доменов, а также величиной эффективной анизотропии в них. Хаос в направлении осей легкого намагничивания кристаллитов и возможность описания магнитной структуры набором слабо-

связанных стохастических магнитных доменов приводят к степенной зависимости средней анизотропии стохастического магнитного домена от размера кристаллита $\langle K \rangle \sim D^n$ [1–4]. Эта зависимость является причиной как степенной зависимости коэрцитивной силы [1–6], так и ширины линии ферромагнитного резонанса в нанокристаллических сплавах [7, 8].

Однако следует отметить, что показатель степени в эмпирически устанавливаемых степенных зависимостях $H_c(D)$ не всегда равен 6. На практике исследователи получают степенные зависимости $H_c(D)$ с показателями степени от 1.5 до 6 [1, 5, 6, 9–12]. Исследователи связывают это с наведенной одноосной анизотропией [9] либо с пониженной размерностью стохастического домена [10–12]. Развитие достоверных представлений в этом направлении требует проведения новых экспериментальных исследований на различных нанокристаллических сплавах.

В данной работе мы представляем экспериментальные результаты по зависимости коэрцитивной силы от размера зерна в лентах нанокристаллического сплава $\text{Fe}_{64}\text{Co}_{21}\text{B}_{15}$, полученного в результате отжига из аморфного состояния.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Ленты аморфного сплава $\text{Fe}_{64}\text{Co}_{21}\text{B}_{15}$ толщиной 20 мкм получены закалкой из расплава в ЦНИИ ЧЕРМЕТ им. И.П. Бардина (г. Москва). Части ленты были отожжены в течение 1 часа при температурах 300, 350, 400, 480 °С в атмосфере аргона. На полученных при различных условиях отжига образцах измеряли кривые намагничивания, а также спектры рентгеновской дифракции. Измерение кривых намагничивания проводили при комнатной температуре на вибрационном магнитометре в полях до 10 кЭ. Измерения спектров рентгеновской дифракции были проведены

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук, Красноярск.

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Сибирский государственный технологический университет”, Красноярск.

³ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Иркутский государственный университет”.

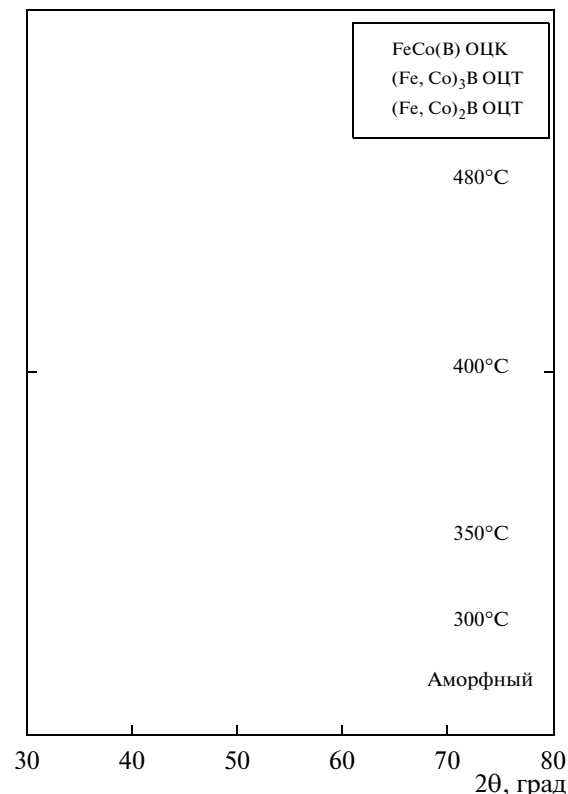


Рис. 1. Рентгенограммы сплава $Fe_{64}Co_{21}V_{15}$, отожженного в течение 1 ч при различных температурах.

на дифрактометре ДРОН-3 с использованием CuK_{α} -излучения. Определение фаз проводили с использованием базы дифракционных данных [13].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 показаны рентгенограммы лент аморфного сплава $Fe_{64}Co_{21}V_{15}$, отожженного в течение 1 ч при различных температурах. Проставленные на рентгенограммах (рис. 1) метки над пиками соответствуют рефлексам твердого раствора Fe–Co с объемно центрированной (ОЦК) структурой, а также фазам $(Fe,Co)_3B$ с объемно центрированной тетрагональной (ОЦТ) структурой и $(Fe,Co)_2B$ также с ОЦТ-структурой. Видно, что отжиг при $300^{\circ}C$ приводит к формированию четких рефлексов ОЦК-фазы на фоне аморфного гало. Ширина рефлексов ОЦК-фазы уменьшается с ростом температуры отжига. Отжиг при температурах выше $350^{\circ}C$ приводит к появлению рефлексов соответствующих $(Fe,Co)_3B$ и $(Fe,Co)_2B$ с ОЦТ-структурой. Величины межплоскостных расстояний, соответствующие идентифицированным фазам и рассчитанные по формуле Вульфа–Брэгга, приведены в таблице.

Для оценки размера области когерентного рассеяния (ОКР) или размера зерна ОЦК-фазы

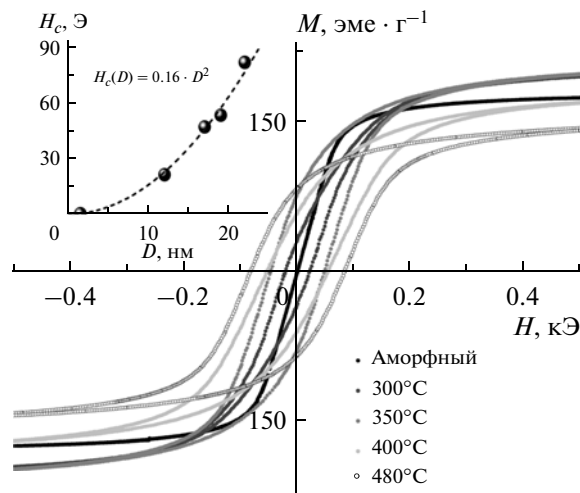


Рис. 2. Петли гистерезиса лент сплава $Fe_{64}Co_{21}V_{15}$, отожженного в течение 1 ч при различных температурах. На вставке – зависимость коэрцитивной силы от размера зерна.

по рентгенограммам рис. 1 определяли позицию (2θ) и ширину самого интенсивного пика (011) на половине высоты ($FWHM$). Этот рефлекс аппроксимировали псевдофункцией Фойгхта. Размер зерна (D) оценивали по формуле Шерера: $D = 0.9 \cdot \lambda / (FWHM \cdot \cos(\theta))$. Величины ОКР также приведены в таблице. Видно, что в процессе рекристаллизации сплава происходит рост зерна основной ОЦК-фазы первоначально зародившегося в аморфной матрице.

Форма петли гистерезиса изменяется в результате отжига (рис. 2). Величина намагниченности в поле 10 кЭ увеличивается при отжиге при 300 и $350^{\circ}C$ от 182 эме/г для аморфного сплава до величины 217 эме/г. Дальнейший отжиг приводит к снижению намагниченности до 165 эме/г. Такое изменение отражает эволюцию фазового состава сплава. На начальных этапах отжига образуется фаза твердого раствора FeCo(B) с самой высокой намагниченностью среди составляющих материалов фаз. Дальнейший отжиг приводит к образова-

Межплоскостные расстояния и величина области когерентного рассеяния фазы ОЦК FeCo(B) (единица измерения – нм)

$T_{отж}, ^{\circ}C$	ОЦК FeCo(B)		
	011	200	ОКР (D)
300	0.2020	0.1429	12
350	0.2017	0.1428	17
400	0.2020	0.1429	19
480	0.2020	0.1429	22

нию тетрагональных боридов с меньшей величиной намагниченности.

Величина коэрцитивной силы значительно увеличивается при отжиге (рис. 2). Размер зерна основной фазы сплава ОЦК-твердого раствора Fe–Co–V также возрастает в процессе отжига. Оказалось, что величины коэрцитивной силы H_c и размера зерна D связаны при этом как $H_c \sim D^2$ (смотри вставку на рис. 2). Такая зависимость не согласуется ни с зависимостью $H_c \sim D^6$ для нанокристаллических сплавов с трехмерными стохастическими доменами [1, 2, 5, 6] ни с зависимостью $H_c \sim D^3$ для сплавов с наведенной одноосной магнитной анизотропией [9]. Показатель степенной зависимости, равный 2, согласно [10–12, 14, 15], можно связать с образованием двумерных стохастических магнитных доменов. Отметим, что формирование двумерных доменов обсуждали ранее только для тонких пленок, где они образуются естественным образом в случае, когда толщина пленки много меньше размера стохастического магнитного домена и сопоставима с размером кристаллита. В данном случае мы наблюдаем степенную зависимость, соответствующую двумерному стохастическому магнитному домену для лент с толщиной 20 мкм, существенно превышающей размер кристаллита (10–20 нм), а также превышающей размер стохастического магнитного домена составляющего в таких сплавах от 0.1 до 1 мкм [4]. Выяснение причин появления двумерных магнитных доменов в исследованных сплавах является, на наш взгляд, интересной темой для дальнейшей работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально исследованы петли гистерезиса и структура нанокристаллических лент Fe₆₄Co₂₁V₁₅ полученных в результате отжига исходного аморфного сплава. Установлено, что изотермический часовой отжиг при температурах от 300 до 480°C, приводит к изменению фазового состава, при этом основной фазой, формирующей-

ся из аморфной матрицы является ОЦК-твердый раствор Fe–Co–V. Отжиг приводит также к росту размера кристаллита твердого раствора Fe–Co–V от 12 до 22 нм. В результате отжига величина намагниченности насыщения изменяется немонотонно, отражая изменение фазового состава. Коэрцитивная сила увеличивается с ростом температуры отжига. Установлено, что коэрцитивная сила H_c и размер зерна D связаны как $H_c \sim D^2$. Возможным объяснением такой зависимости может служить формирование двумерных магнитных доменов в исследованных сплавах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Herzer G. // IEEE Trans. Magn. 1990. V. 26 (5). P. 1397.
2. Herzer G. // Handbook of Magnetic Materials / Ed. Buschow K.H.J. Amsterdam: Elsevier, 1997. V. 10. P. 415.
3. Coey J.M.D. Magnetism and Magnetic Materials. N.Y.: Cambridge Univ. Press, 2009. 617 p.
4. Iskhakov R.S., Komogortsev S.V. // Phys. Met. Metallogr. 2011. V. 112. P. 666.
5. Muller M., Mattern N. // J. Magn. Magn. Mater. 1994. V. 136. P. 79.
6. Kita E., Tsukuhara N., Sato H. et al. // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 88. P. 152501.
7. Комогорцев С.В., Исхаков Р.С., Кузнецов П.А. и др. // Физика тв. тела. 2010. Т. 52. Вып. 11. С. 2143.
8. Komogortsev S., Iskhakov R., Kuznetsov P. et al. // Solid State Phenom. 2011. V. 168–169. P. 365.
9. Suzuki K., Herzer G. // Scripta Mater. 2012. V. 67. P. 548.
10. Thomas S., Al-Harhi S.H., Sakthikumar D. et al. // J. Phys. D. 2008. V. 41. P. 155009.
11. Echigoya J., Yue R. // J. Mater. Sci. 2005. V. 40. P. 3209.
12. Contreras M.C., Calleja J.F., Matarranz R. et al. // J. Appl. Phys. 2006. V. 99. 08F110.
13. JCPDS X-ray diffraction data card file and key (1997).
14. Исхаков Р.С., Комогорцев С.В., Балаев А.Д., Чеканова Л.А. // Письма в ЖЭТФ. 2000. Т. 72. С. 440.
15. Исхаков Р.С., Комогорцев С.В., Балаев А.Д., Чеканова Л.А. // Письма в Журн. техн. физики. 2002. Т. 28. Вып. 17. С. 37.