

Исследование магнитных свойств и микромагнитной структуры многокомпонентных $\text{Fe}_{61.4}\text{Ni}_{3.6}\text{Cr}_{3.2}\text{Si}_{2.4}\text{Nb}_{7.8}\text{Mn}_{3.6}\text{B}_{18}$ аморфных лент

© Е.Е. Шалыгина,¹ Н.М. Абросимова,¹ М.А. Комарова,¹ В.В. Молоканов²

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119899 Москва, Россия

² Институт металлургии и металловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва, Россия
e-mail: shal@magn.ru

(Поступило в Редакцию 13 января 2004 г.)

Магнитные свойства и микромагнитная структура (равновесное распределение намагниченности) многокомпонентных $\text{Fe}_{61.4}\text{Ni}_{3.6}\text{Cr}_{3.2}\text{Si}_{2.4}\text{Nb}_{7.8}\text{Mn}_{3.6}\text{B}_{18}$ аморфных лент были изучены с помощью сканирующей керр-микроскопии и вибрационного магнитометра. Изучаемые ленты шириной 5 мм и толщиной 35 мкм были получены методом закалки расплава на быстровращающемся барабане. Установлено сильное различие приповерхностных и объемных магнитных характеристик лент. Обнаружены доменные границы (ДГ), параллельные длине ленты. Доказано, что квазистатическое перемагничивание лент осуществляется в основном за счет смещения ДГ.

В последние годы большое внимание уделяется изготовлению и изучению объемных аморфных материалов [1–3]. Недавно были получены следующие объемные аморфные и нанокристаллические сплавы: Fe–(Al, Ga)–(P, C, B, Si) [4], (Fe, Co, Ni)–(Zr, Hf)–B [5,6], (Fe, Co, Ni)–(Zr, Nb, M)–B (M = Ti, Ta, Mo) [7,8]. Указанные материалы были приготовлены с достаточно низкой критической скоростью охлаждения (между 10² и 1 К/с) в виде стержней диаметром 1–6 мм и лент толщиной 1–3 мм. Сплавы проявляли высокую стеклообразующую способность и отличные магнитомягкие свойства. Было установлено, что, для того чтобы получить объемные аморфные материалы с указанными выше размерами, необходимы уменьшение критической скорости охлаждения при изготовлении аморфного сплава и наличие широкой температурной области стеклообразования, которая определяется разницей между температурой кристаллизации T_{X1} и температурой стеклования T_g ($\Delta T_X = T_{X1} - T_g$). Такие свойства были в основном найдены для многокомпонентных систем.

Объектом нашего исследования является $\text{Fe}_{61.4}\text{Ni}_{3.6}\text{Cr}_{3.2}\text{Si}_{2.4}\text{Nb}_{7.8}\text{Mn}_{3.6}\text{B}_{18}$ сплав, предложенный в [9] на основе идеи эвтектического взаимодействия фаз-стеклообразователей. Эмпирически найденная область стеклообразования ΔT_X для этого сплава равна 60 К. Целью данной работы является изучение магнитных свойств и микромагнитной структуры (равновесного распределения намагниченности) $\text{Fe}_{61.4}\text{Ni}_{3.6}\text{Cr}_{3.2}\text{Si}_{2.4}\text{Nb}_{7.8}\text{Mn}_{3.6}\text{B}_{18}$ аморфных лент. Проведение этих исследований позволяет оценить целесообразность использования данного состава при получении объемного аморфного сплава.

$\text{Fe}_{61.4}\text{Ni}_{3.6}\text{Cr}_{3.2}\text{Si}_{2.4}\text{Nb}_{7.8}\text{Mn}_{3.6}\text{B}_{18}$ лента шириной 5 мм и толщиной 35 мкм была приготовлена методом закалки расплава на быстро вращающемся барабане. Рентге-

ноструктурные исследования показали, что полученная лента является аморфной.

Изучение приповерхностных магнитных свойств аморфных лент было выполнено на магнитооптическом микромагнетометре, позволяющем измерять магнитные свойства приповерхностных слоев образца толщиной 15–20 нм. Подробно описание магнитооптического микромагнитометра дано в работе [10]. Ленты были разрезаны на куски длиной 20 мм. Переменное магнитное поле с частотой $f = 80$ Нз было приложено параллельно длине образца L . При смещении светового пятна диаметром 20 мкм по поверхности ленты распределения плоскостных компонент намагниченности локальные кривые намагничивания петли гистерезиса были измерены с помощью экваториального эффекта Керра (ЭЭК) δ . Фактически были найдены зависимости $\delta(L, H)/\delta_s \propto M(L, H)/M_s$. Здесь $\delta = (I - I_0)/I_0$, где I и I_0 — интенсивности света, отраженного от намагниченного и ненамагниченного образца соответственно; δ_s — значение ЭЭК при $M = M_s$; M_s — намагниченность насыщения образца. Описанные выше измерения были выполнены в центральной части образца для того, чтобы исключить влияние краевых эффектов (в частности, изменение локального размагничивающего фактора). Объемные магнитные характеристики образца были измерены с помощью вибрационного магнитометра.

На рис. 1 приведены объемная петля гистерезиса и приповерхностные петли гистерезиса, наблюдаемые на свободной и контактной сторонах изучаемой ленты ($a-c$ соответственно). Типичные локальные приповерхностные кривые намагничивания представлены на рис. 2. Анализ этих данных позволяет сделать следующие выводы.

Изучаемая лента имеет отличные магнитомягкие свойства. Объемные значения коэрцитивной силы H_c и поля насыщения H_s равны 0.03 и 6 Ое соответственно.

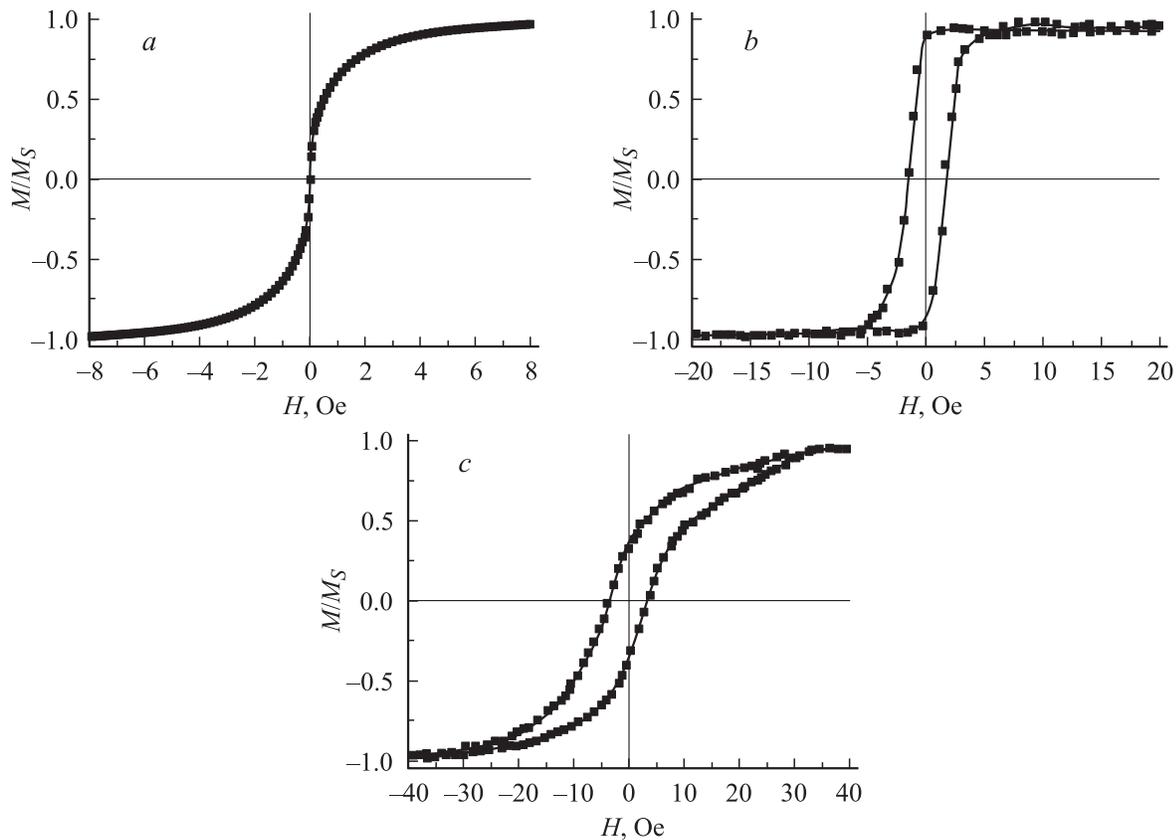


Рис. 1. Объемная петля гистерезиса и приповерхностные петли гистерезиса, наблюдаемые на свободной и контактной сторонах $\text{Fe}_{61.4}\text{Ni}_{3.6}\text{Cr}_{3.2}\text{Si}_{2.4}\text{Nb}_{7.8}\text{Mn}_{3.6}\text{B}_{18}$ аморфной ленты (*a-c* соответственно). Магнитное поле приложено параллельно длине ленты.

Приповерхностные магнитные характеристики образца существенно отличаются от объемных. Различие объемных и приповерхностных значений H_c и H_s может быть объяснено наличием дефектов (шероховатости, микроструктурных изменений), типичных для поверхностных слоев материалов, приготовленных методом закалки расплава на быстро вращающемся барабане.

Значения H_c и H_s на свободной стороне ленты ниже, чем на контактной. На свободной стороне H_c и H_s равны 1.6 и 12 Ое, в то время как на контактной стороне H_c и H_s равны 3.6 и 35 Ое соответственно. Такое различие приповерхностных магнитных свойств характерно для аморфных материалов, полученных методом закалки из расплава [10,11]. Оно может быть объяснено различающимися остаточными напряжениями на контактной и свободной сторонах ленты, существующими в процессе ее изготовления, и различной морфологией приповерхностных слоев.

Локальные приповерхностные кривые намагничивания различаются незначительно. Было найдено, что вариации локальных значений H_c и H_s для свободной и контактной сторон ленты не превышают 6 и 10% соответственно. Высокая однородность локальных магнитных характеристик является следствием слабой дисперсии магнитной анизотропии в изучаемом образце,

что в свою очередь свидетельствует о хорошем качестве изучаемой ленты многокомпонентного состава.

Результаты исследования микромагнитных структур (равновесного распределения намагниченности) заслуживают особого внимания. На рис. 3 приведены типичные распределения плоскостной компоненты намагниченности, параллельной магнитному полю, наблюдаемые на свободной и контактной сторонах ленты при сканировании светового пятна диаметром $20\ \mu\text{m}$ вдоль направления, перпендикулярного длине ленты (обозначено как W), $M/M_s(W)$. Аналогичные распределения намагниченности наблюдались для различных значений W . Результаты более детального исследования зависимости $M/M_s(W)$ около пика, обозначенного стрелкой на рис. 3, представлены на рис. 4, *a*. На рис. 4, *b* приведены зависимости максимальных значений M/M_s того же пика, наблюдаемые при сканировании светового пятна диаметром $20\ \mu\text{m}$ вдоль длины ленты L . Из рис. 3 можно видеть, что зависимости $M/M_s(W)$ имеют несколько практически периодически повторяющихся пиков. С ростом величины H значения M/M_s увеличиваются, пики сохраняются, но их ширина увеличивается (рис. 3 и 4, *a*). Можно видеть также, что значения M/M_s^{max} вдоль ленты L изменяются незначительно (рис. 4, *b*). Аналогичные зависимости $M/M_s^{\text{max}}(L)$ были получены и для других пиков.

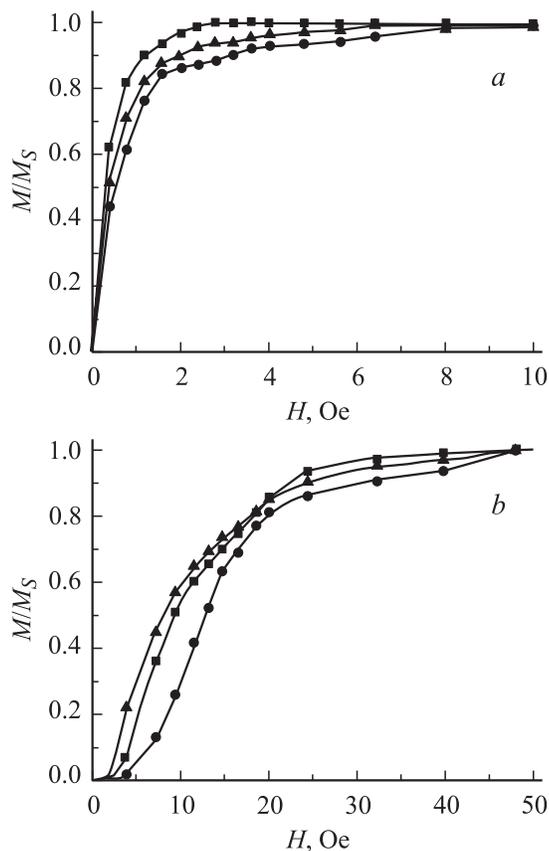


Рис. 2. Типичные локальные приповерхностные кривые намагничивания, наблюдаемые на свободной и контактной сторонах изучаемой ленты в плоскостном магнитном поле, приложенном параллельно длине ленты L (a и b соответственно).

Дополнительные исследования микромагнитной структуры ленты были выполнены с помощью новых магнитооптических эффектов, описанных в [11]. Вообще говоря, плоскостные компоненты намагниченности, как параллельные (M_{\parallel}), так и перпендикулярные (M_{\perp}) приложенному магнитному полю, могут быть одновременно измерены для любого измеряемого микроучастка с помощью ЭЖ δ_1 и меридионального интенсивностного эффекта (МИЭ) δ_2 . МИЭ является пропорциональным компоненте намагниченности, параллельной плоскости падения света (в данном случае M_{\perp}), и нечетным относительно угла отклонения плоскости поляризации света θ от p -компоненты (вектор \mathbf{E} световой волны параллелен плоскости падения света) [11]. Измерение магнитооптических сигналов при $\theta = \pm 40^\circ$ позволяет найти значения

$$\delta^{\pm 40} = \delta_1(M_{\parallel}) \pm \delta_2(M_{\perp}). \quad (1)$$

Из (1) можно найти

$$\delta_1(M_{\parallel}) = (\delta^{+40} + \delta^{-40})/2, \quad (2)$$

$$\delta_2(M_{\perp}) = (\delta^{+40} - \delta^{-40})/2. \quad (3)$$

Анализ магнитооптических сигналов, выполненный в [10], показал, что $\delta_1(M_{\perp}) \neq 0$, если перемагничивание образца осуществляется за счет вращения вектора намагниченности. Нами было найдено, что для любого микроучастка изучаемой ленты значения $\delta_1(M_{\perp})$ равны нулю.

Таким образом, изложенные выше результаты позволяют утверждать, что пики на зависимостях $M/M_s(W)$ наблюдаются в области смещения доменных границ, т.е. приповерхностная микромагнитная структура изучаемой ленты характеризуется наличием доменных границ, параллельных длине ленты. Несущественные изменения M/M_s^{\max} вдоль L свидетельствуют о незначительном искривлении доменных границ в этом направлении. Перемагничивание образца в квазистатическом магнитном поле, приложенном параллельно длине ленты L , осуществляется в основном за счет смещения доменных границ. Следует отметить, что характерной особенностью магнитно-полевых зависимостей магнитоимпеданса, измеренных на изучаемой ленте в области частот от 100 kHz до 1 MHz, является наличие одного пика в

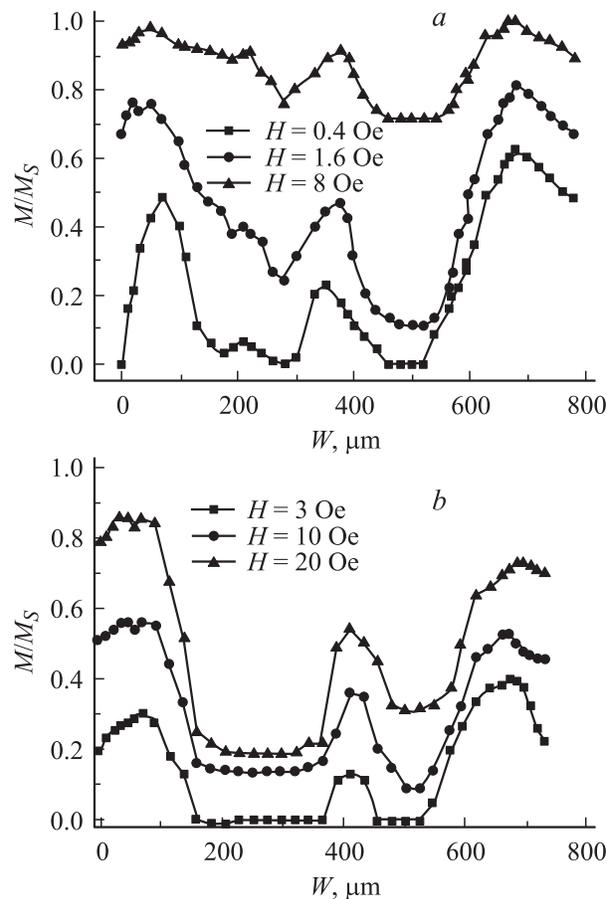


Рис. 3. Типичные распределения компонент намагниченности, параллельных магнитному полю, наблюдаемому при различных значениях магнитного поля ($H < H_s$) на свободной (a) и контактной (b) сторонах ленты. Измерения выполнены при смещении светового пятна диаметром $20 \mu\text{m}$ вдоль направления, перпендикулярного длине ленты (обозначено как W).

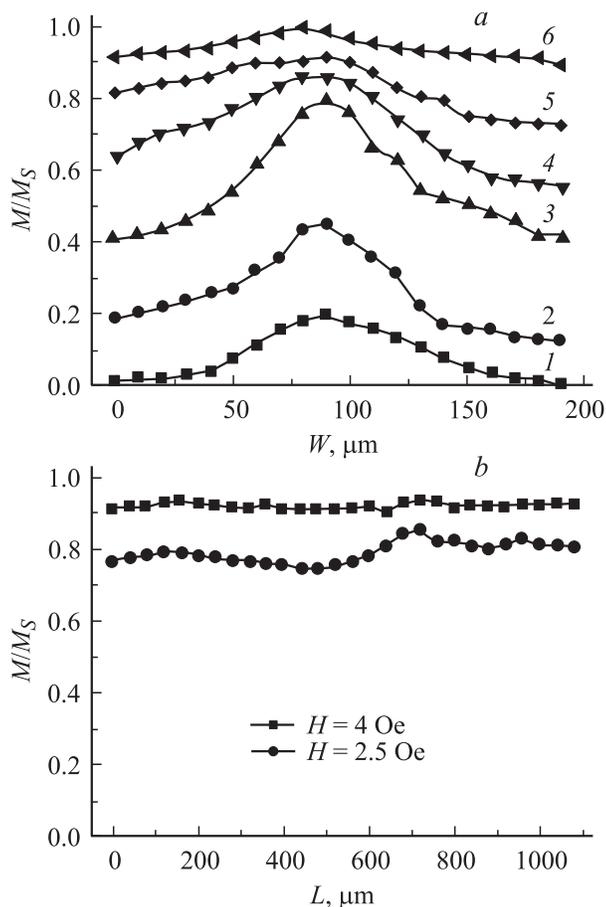


Рис. 4. *a* — распределения компонент намагниченности, параллельных магнитному полю, наблюдаемому при различных значениях магнитного поля ($H < H_s$) на свободной стороне ленты при смещении светового пятна диаметром $20 \mu\text{m}$ вдоль направления, перпендикулярного длине ленты (W) около пика, отмеченного стрелкой на рис. 3, *a*. $H = 0.4$ (1), 1.6 (2), 2 (3), 3 (4), 4 (5), 10 Oe (6). *b* — распределения намагниченности той же компоненты, наблюдаемые для того же пика вдоль длины ленты L .

области $H = 0$. Согласно существующим данным (см., например, [12–15]), это факт свидетельствует о том, что механизм перемагничивания ленты за счет смещения доменных границ сохраняется вплоть до 1 MHz.

В заключение магнитостатические свойства и микромагнитная структура многокомпонентных $\text{Fe}_{61.4}\text{Ni}_{3.6}\text{Cr}_{3.2}\text{Si}_{2.4}\text{Nb}_{7.8}\text{Mn}_{3.6}\text{V}_{18}$ аморфной ленты были изучены. Было обнаружено, что изучаемая лента характеризуется сверхмягкими магнитными свойствами и достаточно высокой однородностью приповерхностных локальных магнитных характеристик. Эмпирически найденная для данного сплава широкая область стеклования и обнаруженные особенности магнитных свойств свидетельствуют о том, что аморфная лента указанного состава может быть использована в качестве прекурсора при изготовлении объемного аморфного сплава.

Эта работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 01-03-32986 и 02-02-16627).

Список литературы

- [1] Inoue A. // Acta. Mater. 2000. Vol. 48. P. 279–306.
- [2] Inoue A., Makino A., Muzushima T. // J. Magn. Magn. Mater. 2000. Vol. 215–216. P. 246–252.
- [3] Молоканов В.В., Петржик М.И., Михайлова, Кузнецов В.И. // Металлы. 2000. № 5. P. 112–115.
- [4] Inoue A., Makino A., Muzushima T. // J. Appl. Phys. 1997. Vol. 81. P. 4029–4031.
- [5] Inoue A., Zhang T., Koshiba H. // J. Appl. Phys. 1998. Vol. 83. P. 6326–6328.
- [6] Makino A., Bitoh T., Murakami I., Hatanai T., Inoue A., Masumoto T. // J. Phys. France. 1998. Pt 2. P. 103–106.
- [7] Inoue A., Zhang T., Koshiba H., Itoe T. // Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 1999. Vol. 554. P. 251–262.
- [8] Chiriac H., Lupu N. // J. Magn. Magn. Mater. 2000. Vol. 215–216. P. 394–396.
- [9] Молоканов В.В., Шалыгин А.Н., Петржик М.И., Михайлова Т.Н., Филиппов К.С., Кашин, Свиридова Т.А., Дьякова Н.П. // Перспективные материалы. 2003. № 3. С. 10–16.
- [10] Shalyguina E., Bekoeva L., Shin K.H. // J. Magn. Magn. Mater. 2000. Vol. 215–216. P. 472–475.
- [11] Shalyguina E., Bekoeva L., Tsidaeva N. // Sens. Actual. 2000. Vol. 81. P. 216–218.
- [12] Panina L.V., Mohri K. // J. Magn. Magn. Mater. 1996. Vol. 157–158. P. 137–140.
- [13] Panina L.V., Mohri K., Uchiyama T., Noda M. // IEEE Trans. Magn. Vol. 31. N 2. P. 1249–1260.
- [14] Machado F.L.A., Martins C.S., Rezende S.M. // Phys. Rev. 1995. Vol. B51. P. 3926–3929.
- [15] Mohri K., Bushida K., Noda M., Panina L.V., Uchiyama T. // IEEE Trans. Magn. 1995. Vol. 31. N 4. P. 2455–2360.