

Мартенситная и магнитная доменная структура ферроиков семейств Ni–Mn–Ga и Co–Ni–Ga

© Т.М. Бречко, Р.М. Гречишкин*, С.Е. Ильяшенко**, В.В. Нелаев***, К.Н. Довжик***, О.М. Корпусов****

Белостокский университет,
Белосток, Польша

* Тверской государственный университет,
Тверь, Россия

** Тверской государственный технический университет,
Тверь, Россия

*** Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
Минск, Белоруссия

**** Тверская государственная медицинская академия,
Тверь, Россия

E-mail: Rostislav.Grechshkin@tversu.ru

(Поступила в Редакцию 2 апреля 2009 г.
В окончательной редакции 8 мая 2009 г.)

Методами оптической микроскопии выявлена и изучена мартенситная и магнитная доменная структура поли- и монокристаллических образцов ферромагнитных сплавов Гейслера Ni–Mn–Ga и Co–Ni–Ga. Описаны основные закономерности формирования и взаимодействия 90° мартенситных и 180° магнитных доменов.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009–2013 годы.

Ферромагнитные сплавы Гейслера обладают редким сочетанием ферромагнетизма и структурных фазовых превращений из кубической высокотемпературной фазы (аустенит) в менее симметричную тетрагональную низкотемпературную фазу (мартенсит) [1]. Эта важная особенность открывает возможности управления формой и размерами образцов с помощью внешнего магнитного поля, что имеет большое практическое значение. В этой связи в последние годы проводятся интенсивные исследования ферроиков семейства $\text{Ni}_{2+x+y}\text{Mn}_{1-x}\text{Ga}_{1-y}$, для которых были достигнуты рекордно высокие (до 10%) значения магнитоуправляемой деформации [2]. Существуют также и другие перспективные, но менее изученные родственные группы ферроидных сплавов Гейслера, в частности, соединения на основе Co–Ni–Ga [3–5].

Целью настоящей работы явилось экспериментальное исследование мартенситной и магнитной доменных структур (ДС) ферроиков на основе Ni–Mn–Ga и Co–Ni–Ga. Изучение закономерностей формирования и взаимодействия мартенситных и магнитных ДС играет важную роль для выяснения механизма магнитоуправляемой деформации ферроиков и практического применения этого эффекта в различных технических устройствах.

Поликристаллические образцы сплавов были получены методом дуговой плавки. После выплавки проводился гомогенизирующий отжиг с последующей закалкой. Монокристаллы выращивались методом Бриджмена в печи сопротивления в корундовых тиглях из слитков, полученных трехкратной дуговой переплавкой. Темпера-

туры мартенситных и магнитных переходов определялись методом термомагнитного анализа по температурной зависимости начальной магнитной восприимчивости. Наблюдения микроструктуры и магнитных доменов проводились поляризационно-оптическим методом на модифицированном металлографическом микроскопе МИМ-8 с цифровой регистрацией и обработкой изображений. Использовались взаимно дополняющие друг друга методики выявления ДС с помощью эффектов Керра, техники порошковых осадков и индикаторных магнитных пленок [6,7].

Металлографические исследования показали, что после прямого мартенситного перехода на поверхности

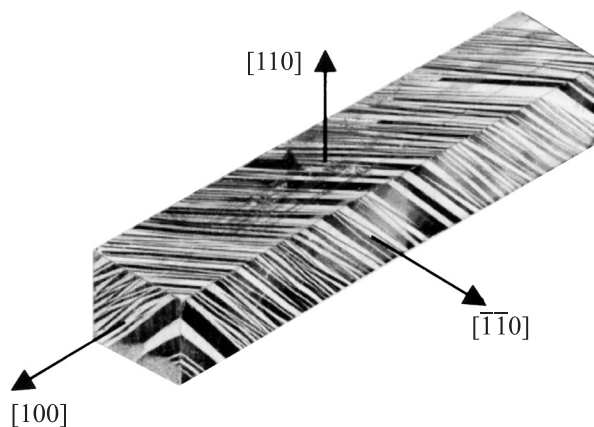


Рис. 1. Мартенситный рельеф ориентированного монокристалла $\text{Co}_{48}\text{Ni}_{22}\text{Ga}_{30}$ размером $3 \times 3 \times 6$ mm.

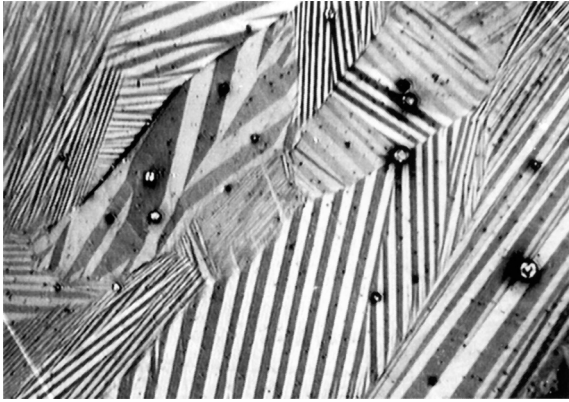


Рис. 2. Мартенситная структура поликристаллического образца $\text{Ni}_{2.16}\text{Mn}_{0.84}\text{Ga}$, выявленная на гладкой механически полированной поверхности при наблюдениях в поляризованном свете ($\times 120$).

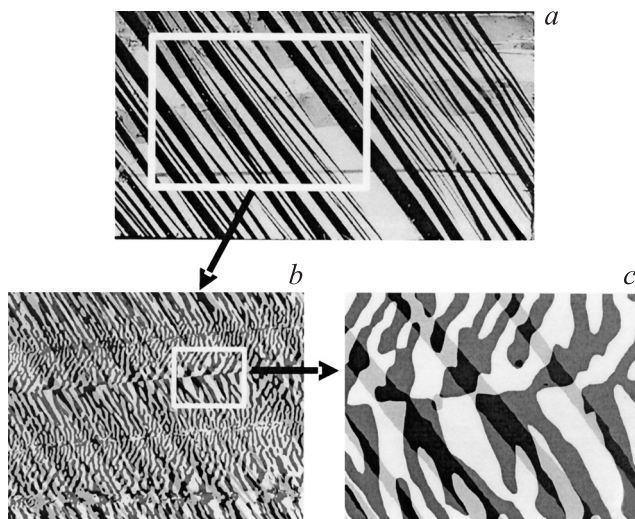


Рис. 3. Мартенситный рельеф на плоскости (110) монокристалла $\text{Co}_{48}\text{Ni}_{22}\text{Ga}_{30}$ (a); увеличенное изображение участка, выделенного рамкой на части a, полученное через полупрозрачную индикаторную пленку (b), и увеличенное изображение фрагмента, выделенного на части b (c).

образцов исследуемых соединений, отшлифованных и отполированных при повышенной температуре в аустенитном состоянии, образуется мартенситный рельеф, хорошо выявляемый при обычных светлопольных наблюдениях (рис. 1).

Из представленного снимка видно, что мартенситные пластины проходят через весь монокристаллический образец. Это свидетельствует о высоком качестве монокристалла и позволяет путем простых кристаллометрических измерений установить, что плоскости двойникования совпадают с кристаллографическими плоскостями типа (110).

При подготовке шлифа на образце в мартенситном состоянии рельеф отсутствует при условии, что темпе-

ратура образца не изменялась. В этом случае мартенситную структуру можно выявить за счет оптической анизотропии низкотемпературной фазы при наблюдениях в поляризованном свете (рис. 2).

Для выявления магнитной доменной структуры и ее взаимосвязи с мартенситными двойниками эффективно использование индикаторных магнитных пленок. На рис. 3 показан мартенситный рельеф на плоскости (110) монокристалла $\text{Co}_{48}\text{Ni}_{22}\text{Ga}_{30}$ при одновременном наблюдении магнитной доменной структуры с помощью полупрозрачной магнитооптической индикаторной феррит-гранатовой пленки [7], а на рис. 4 — чисто магнитная доменная структура ориентированного монокристалла $\text{Ni}_{49}\text{Mn}_{29.7}\text{Ga}_{21.3}$, выявленная с помощью непрозрачной индикаторной пленки с зеркальным подслоем.

Анализ изображений показал, что каждая мартенситная пластина разделена на магнитные домены 180° ориентации, а двойниковые границы одновременно являются 90° магнитными доменными границами типа Блоха.

Представленные экспериментальные данные показывают, что главной особенностью мартенситной и магнитной ДС изученных материалов является их взаимосвязанный характер. 180° магнитные домены непрерывны в пределах кристаллитов, при этом они пересекают плоские, параллельные друг другу границы мартенситных доменов. Вектор намагниченности магнитных доменов модулирован мартенситными доменами, так как c -оси последних, являющиеся направлениями легкого намагничивания, находятся под углами 90° по отношению друг к другу. В результате границы между мартенситными доменами также выполняют роль 90° магнитных доменных стенок без свободных зарядов ($\text{div } \mathbf{M} = 0$) (рис. 5).

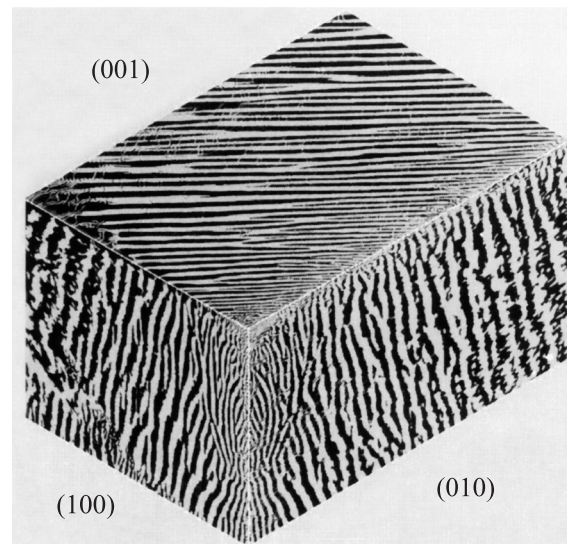


Рис. 4. Структура 180° магнитных макродоменов, выявленная с помощью магнитной индикаторной пленки, на плоскостях (100) ориентированного монокристалла $\text{Ni}_{49}\text{Mn}_{29.7}\text{Ga}_{21.3}$ с линейными размерами $1.2 \times 1.5 \times 2.5$ mm.

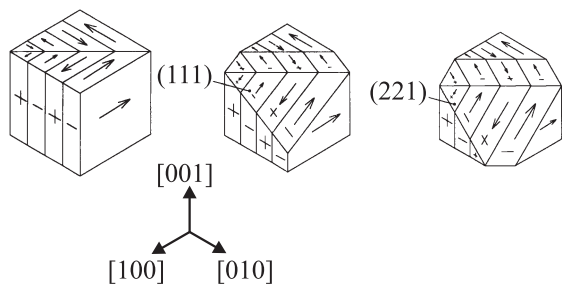


Рис. 5. Субструктура магнитных доменов, образующаяся при сечении кристалла плоскостями (hhl). Кубический элемент объема (слева) разделен на две части мартенситной границей, лежащей в плоскости (110). Плоскости (hhl) — группа плоскостей, получаемых при повороте плоскости (001) относительно оси $[\bar{1}10]$. Стрелки и знаки + и – характеризуют ориентации векторов намагниченности 180° магнитных доменов.

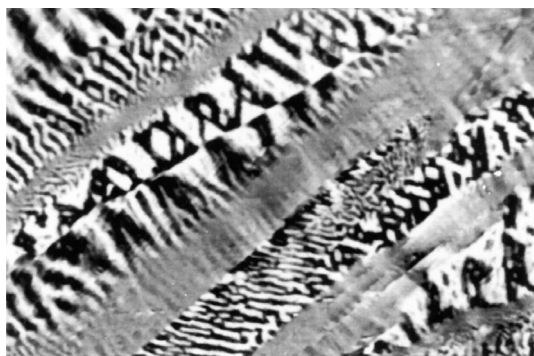


Рис. 6. Изменение конфигурации дополнительных магнитных доменов в мартенситных двойниках с чередующимися значениями нормальной компоненты намагниченности.

Конфигурации мартенситной и магнитной доменной структуры на различных поверхностях образцов зависят от их кристаллографической ориентации. Плоскость (001) свободна от зарядов, границы магнитных доменов ориентированы под углами 45° к мартенситным границам. В плоскостях (100) и (010) чередуются домены с намагниченностью, параллельной и нормальной к поверхности образца. Как следствие (и в отличие от однородных одноосных кристаллов), плотность магнитных зарядов на поверхности образца для соседних магнитных доменов может быть существенно различной. Соответственно будут возникать различия в конфигурации дополнительных поверхностных доменов, снижающих магнитостатическую энергию образца. Иллюстрацией этого эффекта является ДС образца Co–Ni–Ga, представленная на рис. 6.

Полученные результаты показывают, что основные закономерности формирования и взаимодействия взаимосвязанных структур мартенситных и магнитных доменов моно- и поликристаллических ферроиков на основе сплавов Ni–Mn–Ga и Co–Ni–Ga подобны друг другу. Следует ожидать сходства и других свойств этих

семейств сплавов, в том числе свойств, определяющих их практическое использование. Представленное рассмотрение соответствует модели, впервые разработанной Кандауровой с соавторами для полидвойниковых сплавов типа CoPt [8].

Список литературы

- [1] А.Н. Васильев, В.Д. Бучельников, Т. Такаги, В.В. Ховайло, Э.И. Эстрин. УФН **173**, 577 (2003).
- [2] M.A. Marioni, R.C. O'Handley, S.M. Allen, S.R. Hall, D.I. Paul, M.L. Richard, J. Feuchtwanger, B.W. Peterson, J.M. Chambers, R. Techapiesancharoenkij. J. Magn. Magn. Mater. **290–291**, 35 (2005).
- [3] M. Wuttig, J. Li, C. Craciunescu. Scripta Mater. **44**, 2393 (2001).
- [4] C.M. Craciunescu, M. Wuttig. J. Optoelectr. Adv. Mater. **5**, 139 (2003).
- [5] C. Craciunescu, Y. Kishi, T.A. Lograsso, M. Wuttig. Scripta Mater. **47**, 285 (2002).
- [6] R.M. Grechishkin, M.Yu. Goosev, S.E. Ilyashenko, N.S. Neustroev. J. Magn. Magn. Mater. **157/158**, 305 (1996).
- [7] R.M. Grechishkin, S. Chigirinsky, M.Yu. Gusev, O. Cugat, N.M. Dempsey. Magnetic imaging films. In: Magnetic nanostructures in modern technology / Ed. B. Azzaroni. Springer (2007). P. 195.
- [8] N.I. Vlasova, G.S. Kandaurova, N.N. Shchegoleva. J. Magn. Magn. Mater. **222**, 138 (2000).