

УДК 538.245

**ДОМЕННАЯ СТРУКТУРА СОЕДИНЕНИЙ  $R_2Fe_{17}$  и  $R_2Co_{17}$   
С МАГНИТОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИЕЙ  
ТИПА «ЛЕГКАЯ ПЛОСКОСТЬ»**

**М.Б. Ляхова, Е.М. Семенова, А.В. Петренко, О.В. Маклыгина**

Тверской государственный университет,  
*кафедра магнетизма*

Проведены экспериментальные исследования доменной структуры поли- и монокристаллических образцов соединений  $R_2Fe_{17}$  и  $R_2Co_{17}$  с магнитокристаллической анизотропией типа «легкая плоскость» методами оптической и магнитно-силовой микроскопии. Предложена модель основной доменной структуры магнетиков данного типа.

Сплавы на основе редкоземельных металлов (R) и 3d-металлов обладают рядом уникальных магнитных свойств и широко применяются на практике как материалы для высокоэнергоемких постоянных магнитов. Соединения типа  $R_2M_{17}$  ( $M = Co, Fe$ ) имеют одноосные кристаллические решетки гексагонального или ромбоэдрического типа [1]. В настоящее время доменная структура магнитоодноосных соединений хорошо изучена, а данные о доменной структуре одноосных магнетиков с магнитокристаллической анизотропией (МКА) типа «легкий конус» или «легкая плоскость» весьма ограничены. В связи с этим в данной работе в качестве объектов исследования были выбраны соединения  $R_2Co_{17}$  и  $R_2Fe_{17}$  с тяжелыми редкоземельными металлами и иттрием ( $R = Y, Gd, Tb, Dy, Ho, Er$ ), которые при комнатной температуре характеризуются МКА типа «легкая плоскость» [2].

Сплавы получали методом высокочастотной индукционной плавки в атмосфере аргона. Применение медленного охлаждения позволяло получать крупнозернистые слитки с диаметром зерен до 2–3 мм. Для выравнивания химического состава сплавы подвергались гомогенизирующему отжигу при 1000–1100°C в течение 3–6 часов.

Исследования доменной структуры проведены на произвольно ориентированных поверхностях поликристаллов, а также на базисной и призматической плоскостях монокристаллических образцов, которые представляли собой одно зерно сплава. Подготовка металлографических шлифов проводилась методами механической шлифовки и полировки на алмазных пастах различной крупности. Доменная структура исследовалась на металлографическом микроскопе НЕОРНОТ-30 методом порошковых осадков Акулова–Биттера. Конфигурация магнитных полей рассеивания образцов изучалась методом магнитно-силовой микроскопии на установке Solver P47. Применялся

колебательный полуконтактный метод сканирования поверхности образцов кантелевером, покрытым кобальтом.

На первом этапе работы доменная структура исследовалась на произвольно ориентированных плоскостях поликристаллических образцов  $R_2M_{17}$ . Известно, что при механической шлифовке и полировке на поверхности любого образца образуется напряженный слой, толщина которого зависит от свойств самого сплава и условий подготовки поверхности, например, крупности частиц абразива и длительности всех операций полировки. Механически напряженный слой образца всегда обладает наведенной анизотропией. В том случае, когда собственная МКА образца высока, напряженный поверхностный слой шлифа не мешает выявлению доменной структуры даже при применении полярного эффекта Керра. Если магнетик имеет низкие значения констант МКА, то наведенная анизотропия напряженного поверхностного слоя существенно препятствует выявлению доменной структуры образца. Такая ситуация реализуется для исследованных соединений  $R_2M_{17}$ . В некоторых случаях на поверхности образцов методом полярного эффекта Керра наблюдалась мелкая лабиринтная доменная структура, которая связана с наведенной одноосной анизотропией тонкого поверхностного слоя. В других образцах полярный эффект Керра не позволял выявлять никакой картины, а методом порошковых осадков наблюдалась крайне измельченная доменная структура.

В связи с вышесказанным первая задача работы состояла в разработке метода полировки поверхности для полного снятия напряженного слоя. В качестве основного метода была выбрана электрохимическая полировка в растворе хромового ангидрида в ортофосфорной кислоте [3]. Для каждого образца экспериментально подбирался режим полировки (величина подаваемого напряжения и длительность воздействия). Такая методика подготовки поверхности шлифа позволила выявить доменную структуру методом порошковых осадков во всех исследуемых образцах  $R_2M_{17}$ . Соответствие картин порошковых осадков доменной структуре образцов подтверждалось движением доменных границ во внешнем магнитном поле.

На рис. 1, в качестве примеров, показаны типичные картины порошковых осадков на произвольно ориентированных плоскостях поликристаллических образцов  $R_2M_{17}$ . Можно выделить два различных по конфигурации типа доменных структур, которые оказались характерными для всех исследованных соединений. Часть зерен образцов имела крупные полосовые или клиновидные домены (рис. 1а–в). В остальных зернах наблюдались полосовые домены с прерывными искривленными границами.

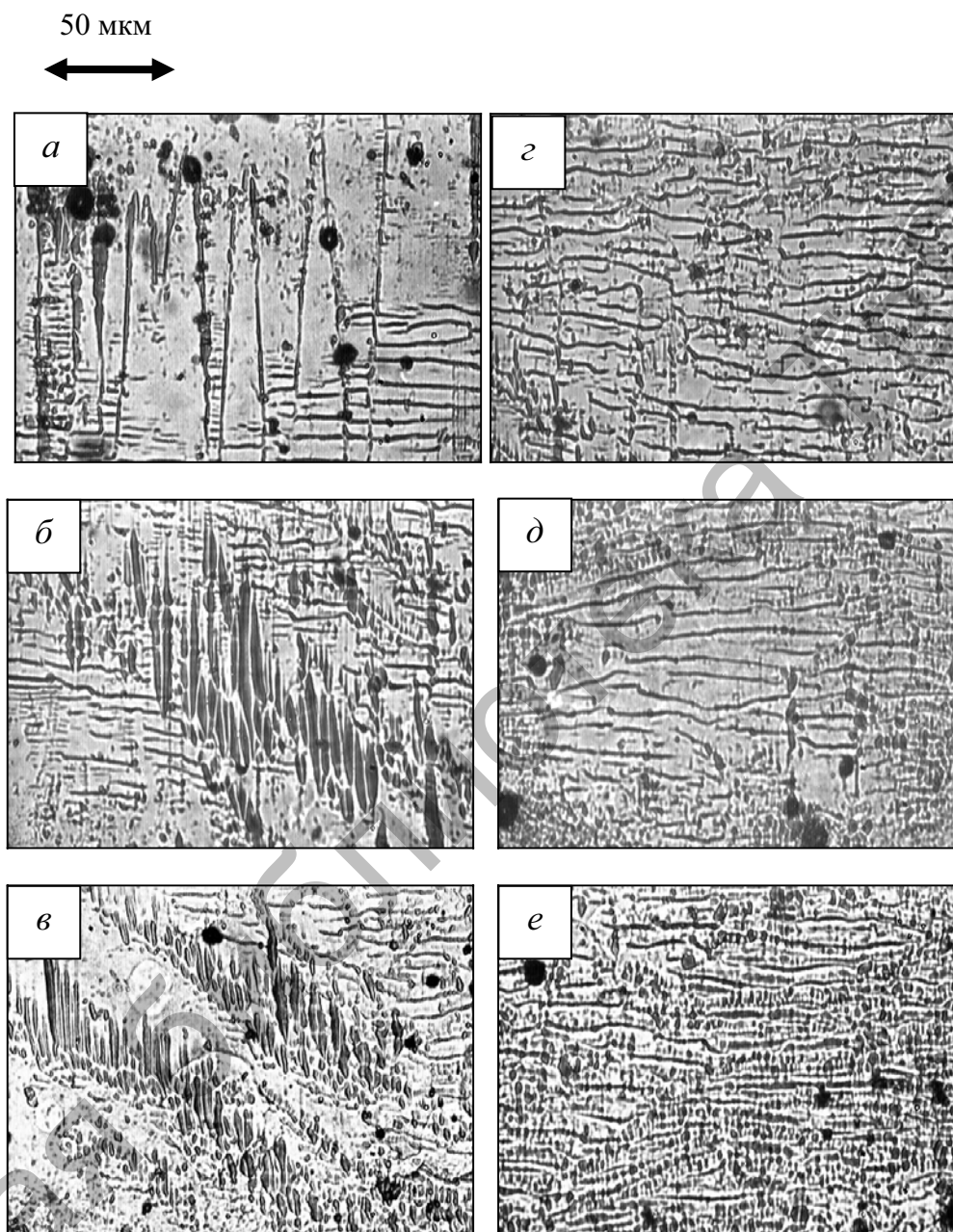


Рис. 1. Типичные картины доменных структур поликристаллических образцов  $R_2M_{17}$ , выявленные методом порошковых осадков

В большинстве случаев такие структуры были промодулированы поперечными мелкими каплевидными доменами (рис. 1,  $d-e$ ), но наблюдались и области свободные от мелких доменов (рис. 1,  $z-d$ ). Непосредственно после механической полировки поверхности шлифа алмазными пастами в исследованных образцах  $R_2Co_{17}$  выявляется доменная структура методом полярного эффекта Керра. Однако эта картина керровского контраста отражает только механически напряженное состояние поверхности образца, а не структуру основных доменов исследованных соединений. Для того, чтобы получить данные о глубинной структуре соединений, приходится глубоко снимать поверхностный слой образцов методом электрохимической полировки, и после этого доменную структуру можно выявить только методом порошковых осадков Акулова-Биттера. Картины керровского контраста получить не удастся. Это связано с глубоким рельефом протравленной поверхности и ее окраской продуктами химической реакции. По картинам порошковых осадков можно судить только о конфигурации доменных границ, но нет возможности оценить картину пространственного распределения векторов намагниченности внутри самих доменов.

В связи с этим в работе были проведены исследования поверхности монокристаллических образцов  $Gd_2Co_{17}$ ,  $Dy_2Fe_{17}$  и  $Y_2Fe_{17}$  методами магнитно-силовой микроскопии, поскольку, как известно [4], эти методы позволяют получить картину, отражающую распределение магнитных полей рассеяния доменов образца.

На рис. 2, в качестве примера, показаны магнитно-силовые изображения полей рассеяния на базисной плоскости образца  $Y_2Fe_{17}$ . Хорошо видна простая полосовая структура доменов, ширина доменов составляет порядка 10–20 мкм.

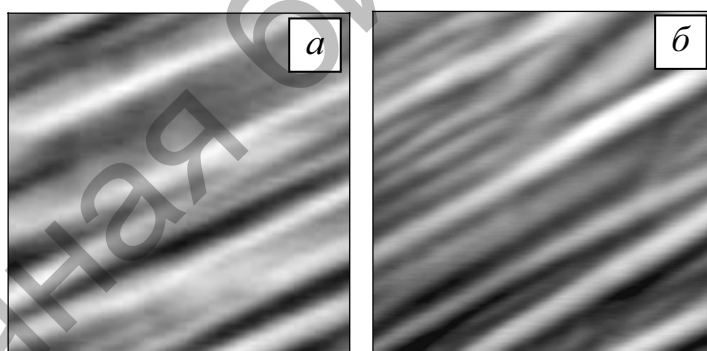


Рис. 2. Магнитно-силовые изображения базисной плоскости образца  $Y_2Fe_{17}$ .  
Размеры полей зрения 50x50 мкм

Очень интересные конфигурации полей рассеяния доменов получены на призматических плоскостях образцов  $Gd_2Co_{17}$  и  $Dy_2Fe_{17}$  (рис. 3). Основным признаком всех структур является извилистость доменных границ. Во всех случаях выявляются полосовые домены с извилистыми границами, форму которых можно условно обозначить как «зигзагообразную» (рис. 3, а; з), «елочкообразную» (рис. 3, б; в; д) и «пилообразную» (рис. 3, е). Ширина основных полосовых доменов на призматической плоскости образцов  $Gd_2Co_{17}$  и  $Dy_2Fe_{17}$ , также как и выявленных на базисной плоскости образца  $Y_2Fe_{17}$ , составляет около 10–20 мкм.

Исходя из всех полученных экспериментальных данных, можно предложить следующую модель доменной структуры одноосного магнетика с МКА типа «легкая плоскость».

В объеме магнетика формируется простая полосовая структура доменов с границами параллельными оси  $c$  (рис. 4). В рамках такого представления понятно, почему на базисной плоскости образцов типа  $R_2M_{17}$  всегда наблюдаются полосовые домены. Однако на призматической плоскости исследованных образцов выявляются сложные конфигурации с извилистыми границами. Для объяснения этого факта, можно предположить, что вблизи призматической плоскости образцов, над которой формируются размагничивающие поля, происходит изгиб доменных границ. Схематическое представление изогнутых доменных границ показано на рис. 5. Появление такого изгиба границ энергетически выгодно, так как в этом случае замыкание магнитного потока происходит не в одном направлении, как при полосовых доменах, а в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Вследствие этого можно ожидать уменьшения магнитостатической энергии образца. Формирование двух систем доменных границ во всем объеме образца, по-видимому, не оправдано, так как в этом случае резко возрастет общая площадь границ и, следовательно, их энергия.

Подобная схема изгиба доменных границ вблизи базисной плоскости одноосных магнетиков с МКА типа «легкая ось» подробно описана в литературе [5]. Расчеты показывают уменьшение магнитостатической энергии в такой модели структуры, а многочисленные экспериментальные данные подтверждают теоретические результаты, полученные в этом модельном представлении.

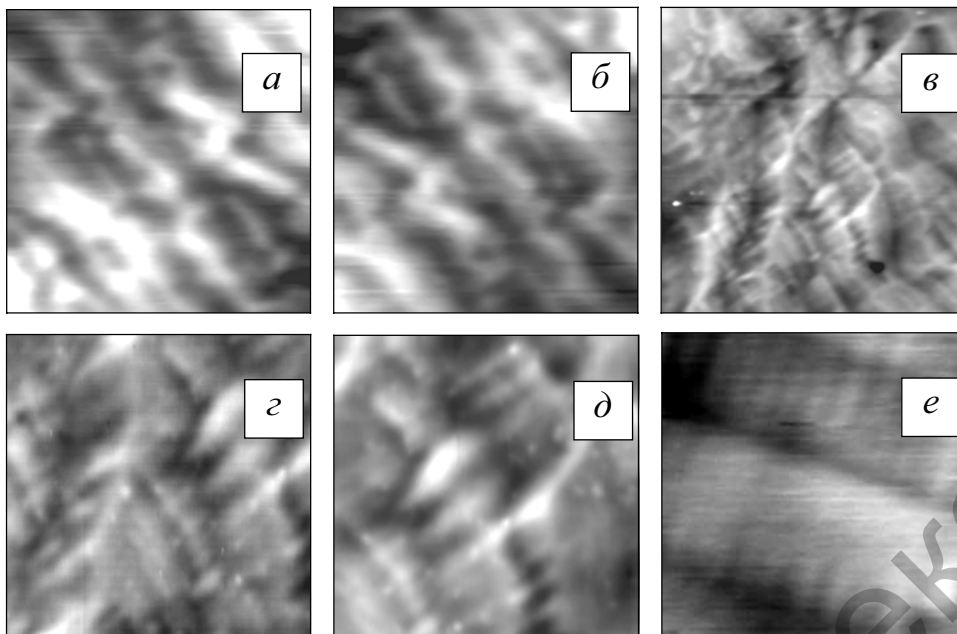


Рис. 3. Магнитно-силовые изображения призматической плоскости образцов  $Gd_2Co_{17}$  (а-б) и  $Dy_2Fe_{17}$  (г-е).  
 Размер кадров 50x50 (а-б), 20x20 (в-д) и 10x10 мкм (е)

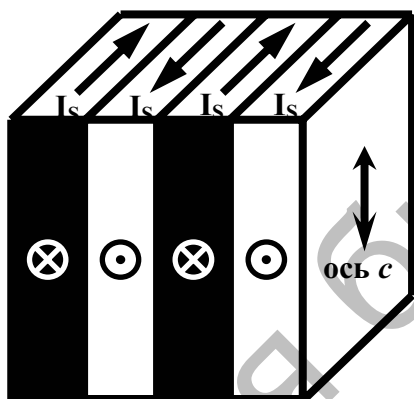


Рис. 4. Модель полосовой доменной структуры в магнетике с МКА типа «легкая плоскость»

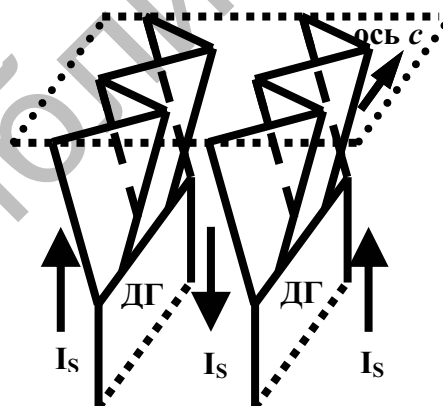


Рис. 5. Схематическое изображение изгиба доменных границ вблизи призматической плоскости магнетика с МКА типа «легкая плоскость»

На рис. 6 приведено схематическое изображение поверхностной доменной структуры на призматической плоскости образцов с МКА типа «легкая плоскость» для различных случаев изгиба доменных границ. Пунктиром обозначены границы основных полосовых доменов

внутри образца. Хорошо видно, что в такой модели поверхностная доменная структура имеет «елочкообразную», «зигзагообразную» и «пилообразную» конфигурации, которые в данной работе экспериментально наблюдались на призматической плоскости образцов  $R_2M_{17}$ .

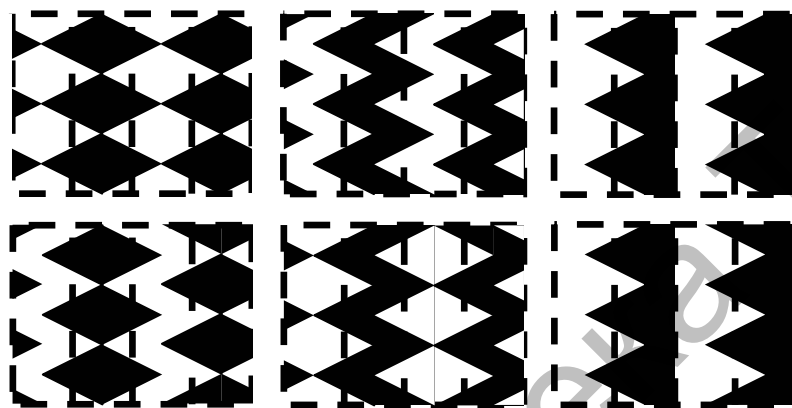


Рис. 6. Схематическое изображение доменной структуры с изогнутыми доменными границами на призматической плоскости магнетика с МКА типа «легкая плоскость»

Работа выполнена при поддержке грантов НШ-8701.2006.2, РФФИ № 05-02-17197, Минобрнауки РФ проект РНП.2.1.1.3674

#### Список литературы

1. Шуберт К. Кристаллические структуры двухкомпонентных фаз. М., Metallurgia, 1971. 532 С.
2. Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology. Group III. Crystal and Solid State Physics. Volume 19. Magnetic Properties of Metals. Subvolume d2. Compound Between Rare Earth Elements and 3d, 4d or 5d Elements. LANDOLT-BORNSTEIN. E. Burzo, A. Chelkowski, H. R. Kirchmayr.
3. Пшеничников Ю.П. Выявление тонкой структуры кристаллов. М., Metallurgia, 1974. 528 С.
4. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. Нижний Новгород, 2004. 110 С.
5. Кандаурова Г.С., Бекетов В.Н. Модель сложной доменной структуры магнитоодноосного кристалла //Физика твердого тела. 1974. Т. 16, №7. С.1857–1862.