

УДК 537.6

ТРАНСФОРМАЦИЯ МАГНИТНОЙ ДОМЕННОЙ СТРУКТУРЫ СОЕДИНЕНИЙ $\text{Sm}(\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x)_5$ В ПРОЦЕССЕ МАГНИТНОГО ПОСЛЕДЕЙСТВИЯ

**Ю. В. Кузнецова, О. Б. Дегтева, Н. П. Супонев, Э. Л. Айриян,
И. Г. Березкин**

Тверской государственный университет, 170100 Тверь
кафедра магнетизма

Исследовано поведение магнитной доменной структуры квазибинарных соединений $\text{Sm}(\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x)_5$ в полях, близких к коэрцитивному. Описан процесс магнитного последействия на основе наблюдения трансформации доменной структуры поверхности.

Ключевые слова: *магнитная доменная структура, редкоземельные интерметаллиды, магнитное последействие*

1. Введение. Магнитная доменная структура (ДС) является важным индикатором магнитного и структурного состояния магнитотвердых материалов, обладающих магнитокристаллической анизотропией (МКА) типа «ось легкого намагничивания». По виду доменов можно судить о наличии межзёренных границ и микронеоднородностей в образцах, а также о его магнитной предыстории.

Соединение SmCo_5 имеет гексагональную кристаллическую структуру и представляет собой удобный модельный объект, на основе которого развивались микромагнитные представления о ДС магнетиков. Экспериментальным исследованиям магнитных свойств, ДС, а также построению теоретических моделей описания микромагнитного состояния этих высокоанизотропных материалов посвящено большое количество работ [1-3]. Известно, что в размагниченном состоянии на базисной плоскости монокристаллов выявляется структура замыкающих доменов типа «звездочки», а на призматической – полосовая ДС. Аналогичная ДС выявляется во всех бинарных сплавах системы R-Co с МКА «ось легкого намагничивания» [4].

Легирование бинарных сплавов 3d-элементами приводит к изменению их структурного состояния и магнитных свойств. Суммарный магнитный момент, приходящийся на единицу объема, уменьшается, но это компенсируется значительным ростом коэрцитивного поля образцов в литом состоянии (до 4 кЭ). Такое увеличение H_{cl} достигается за счет формирования в материале микро- и наноразмерных неоднородностей, служащих эффективными центрами закрепления доменных границ.

Особенностью рассматриваемых материалов является ярко выраженное магнитное последействие, которое проявляется в том, что для

установления равновесного магнитного состояния образца во внешнем постоянном магнитном поле требуется время от нескольких секунд до нескольких дней [5,6]. Оценить динамику релаксационного процесса в магнитном материале можно по изменению намагниченности с течением времени при фиксированном значении поля. Понимание механизмов магнитного поледействия важно при разработке магнитных материалов с заданными физическими свойствами. В данной работе представлены результаты экспериментального исследования трансформации магнитной ДС соединений $\text{Sm}(\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x)_5$ ($x = 2,0, 2,5$ и $3,0$) в постоянном магнитном поле близком к коэрцитивному.

2. Методика эксперимента. Сплавы $\text{Sm}(\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x)_5$ ($x = 2,0; 2,5; 3,0$) были получены методом индукционной плавки в атмосфере аргона. Высокотемпературный гомогенизирующий отжиг проводился при температуре 1100°C . Для магнитных измерений и исследований ДС из сплавов выкалывались зерна диаметром $2...3$ мм. Зернам придавалась сферическая форма. Для исследования выбирались образцы, прошедшие аттестацию методами магнитных измерений и рентгеноструктурного анализа. На базисной плоскости образцов приготавливались шлифы. ДС выявлялась методом полярного эффекта Керра на оптическом металлографическом микроскопе Neophot 30. Также в работе представлены результаты исследования поверхности методом магнитно-силовой микроскопии (МСМ) на сканирующем зондовом микроскопе Solver P47. Магнитные измерения выполнены на вибрационном магнитометре в полях до 30 кЭ.

1. Результаты и обсуждение. Соединения RM_5 характеризуются гексагональной кристаллической структурой типа CaCu_5 с пространственной группой симметрии $\text{P6}/\text{mmm}$ [1]. Типичная магнитная ДС бинарного соединения SmCo_5 на базисной плоскости представлена на рис. 1, где методом полярного эффекта Керра выявляется структура замыкающих доменов типа «звездочки».

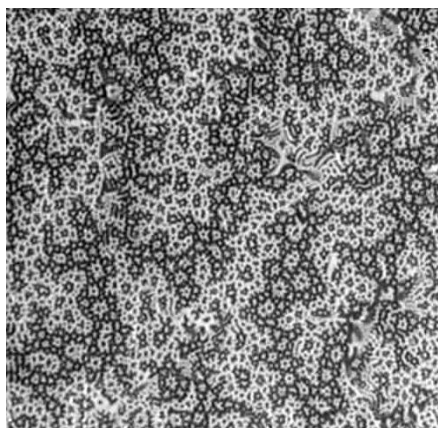


Рис. 1. Магнитная ДС на базисной плоскости монокристалла SmCo_5

Легирование бинарного соединения SmCo_5 никелем приводит к формированию микро- и наноразмерных ликвационных неоднородностей, служащих центрами задержки смещения доменных границ. Таким образом, квазибинарные соединения $\text{Sm}(\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x)_5$ в литом состоянии обладают коэрцитивной силой 2...4 кЭ. Значение коэрцитивной силы определяется реальной структурой образца. На рис. 2 приведены ДС квазибинарных сплавов в размагниченном состоянии.

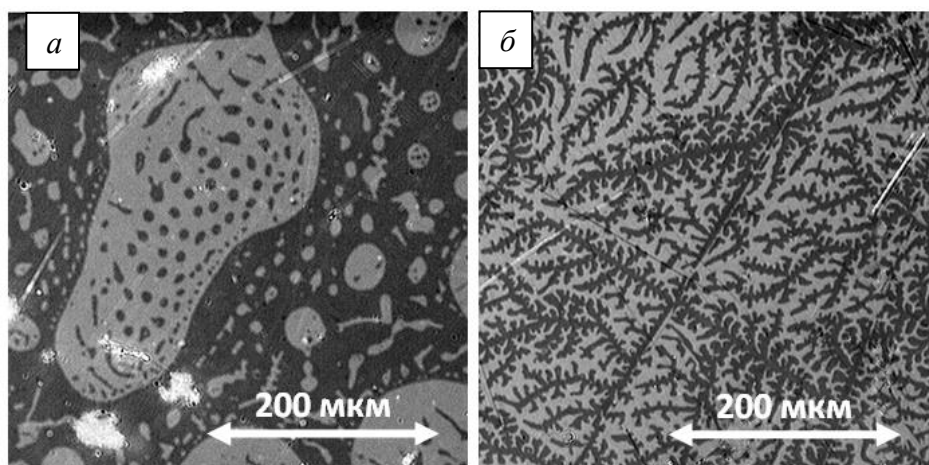


Рис. 2. ДС сплава SmCo_3Ni_2 на базисной плоскости, выявленная методом полярного эффекта Керра после РПП (а), после РОП (б).

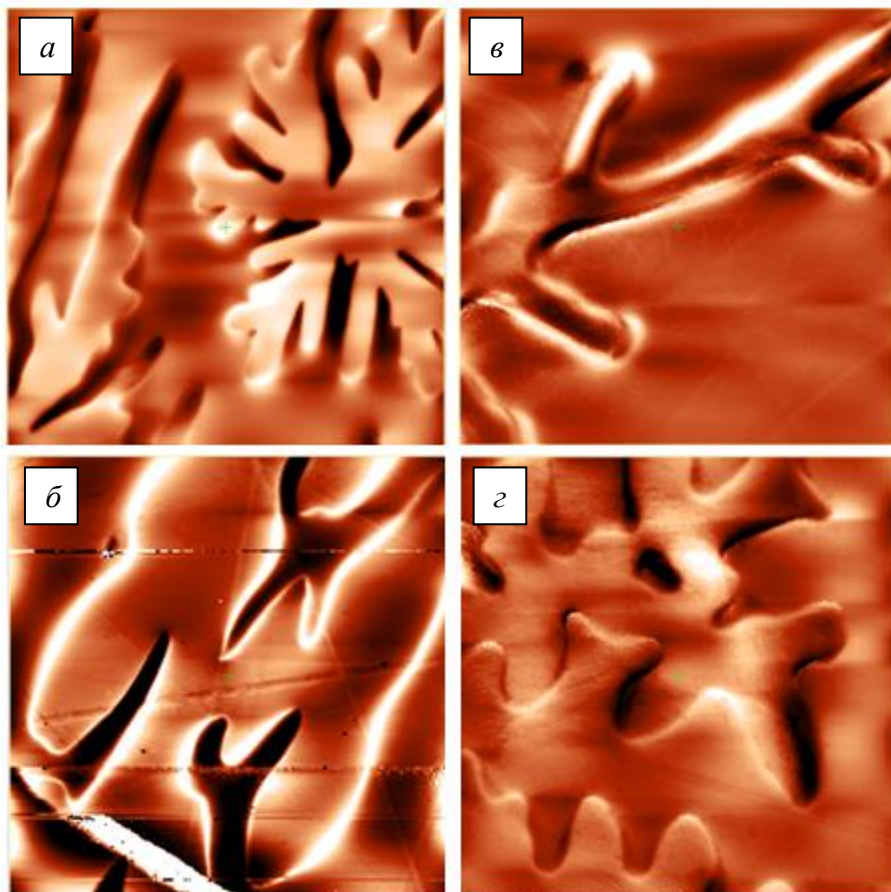
Очевидно, что эти ДС отличаются не только от равновесной (рис.1), но и различаются между собой. Как упоминалось ранее, конфигурация доменов в $\text{Sm}(\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x)_5$ зависит от магнитной предыстории, к которой относится и способ размагничивания. В данной работе для получения размагниченного состояния образцов применялись два способа: размагничивание знакопеременным, убывающим по амплитуде полем (РПП) и размагничивание полем обратного знака (РОП). В зависимости от способа размагничивания получают различные термодинамические равновесные состояния высококоэрцитивного магнетика, что проявляется в различии картин равновесной доменной структуры. Изображения ДС на рис. 2 это прекрасно иллюстрируют.

При размагничивании переменным полем доменные границы по мере снижения амплитуды импульсов фиксируются в положениях, соответствующих наиболее глубоким энергетическим минимумам. Доменная структура в этом случае подобна ДС «идеальных» (с пренебрежимо малой коэрцитивностью доменных границ) магнетиков. Магнитные измерения показывают, что зависимости $\sigma(H)$, полученные при намагничивании из состояния РПП являются наиболее пологими. Размагниченное состояние, достигнутое методом РПП, является наиболее термодинамически устойчивым к воздействиям внешнего поля. Метод РОП предполагает экспериментальный подбор такого значения размагничивающего поля после намагничивания образца до насыщения, при котором образец переходит в размагниченное состояние по кривой возврата. В зависимости от способа размагничивания на базисной плоскости образцов SmCo_3Ni_2 выявляется ДС в виде разветвленных папоротников (после РОП), либо видоизмененных круговых папоротников (после РПП) (рис. 2).

На рис. 3 представлены изображения полей рассеяния, соответствующих магнитной ДС, полученные методами МСМ с применением двухпроходной методики сканирования. Анализ этих изображений ранее полученных методом полярного эффекта Керра картины ДС: видно, что в исследуемых образцах конфигурация замыкающих доменов искажена и имеет форму «папоротников».

Поведение поверхностной магнитной ДС во внешнем магнитном поле полностью отражает процессы перемагничивания в объеме образцов, в том числе и релаксационные. Поэтому на следующем этапе работы была поставлена задача экспериментально путем прямых

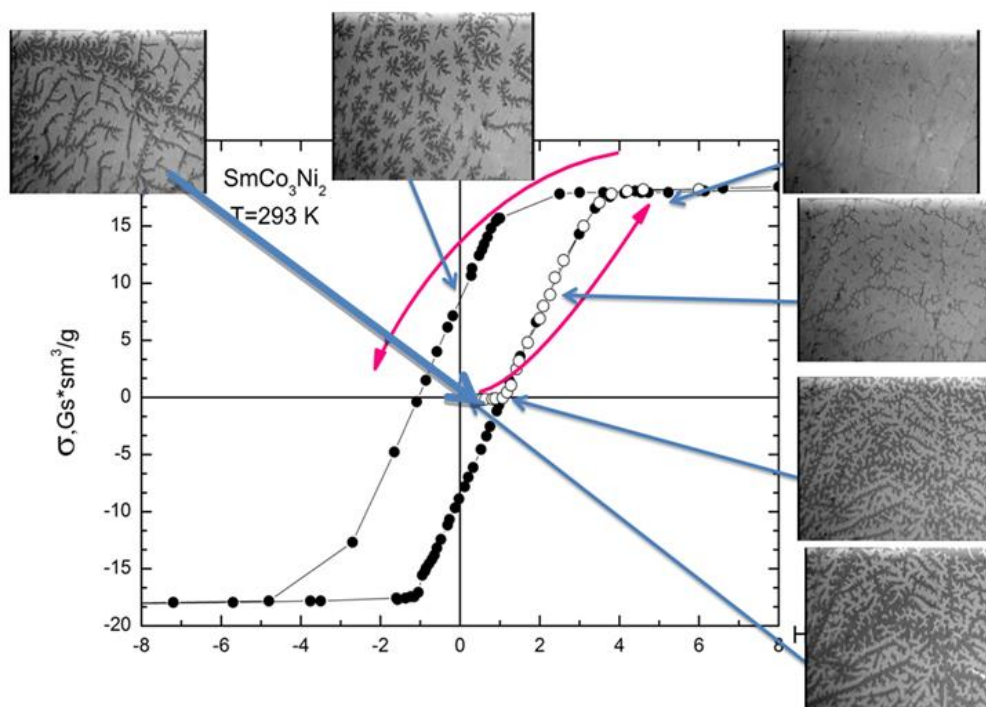
наблюдений оценить величину магнитной вязкости квазибинарных сплавов в процессе регистрации перестройки доменной структуры во внешнем постоянном размагничивающем поле. Было обнаружено, что как и в случае магнитных измерений, наиболее ярко эффект магнитного последствия выражен в полях близких к H_{cl} .



Р и с . 3. МСМ-изображения, полученные на базисной плоскости монокристалла SmCo_3Ni_2 (размер поля зрения 50×50 (а,в) и 25×25 мкм (б,г))

На рис. 4 представлена динамика перестройки ДС при различных значениях намагничивающего и перемагничивающего поля на базисной плоскости монокристаллов SmCo_3Ni_2 . Скорость изменения внешнего магнитного поля поддерживалась постоянной. В процессе намагничивания наблюдается уменьшение площади темных доменов, появляется намагниченность, которая растет до значения насыщения. Однако состояние магнитного насыщения не является монодоменным,

хорошо видны тонкие темные домены, закрепившиеся на структурных неоднородностях. При уменьшении поля они разветвляются, приобретая дендритную форму. При значении обратного поля, равном H_{cl} , наблюдается дальнейшее развитие этих доменов, однако вид ДС в обоих случаях не повторяет вида ДС в размагниченном состоянии.

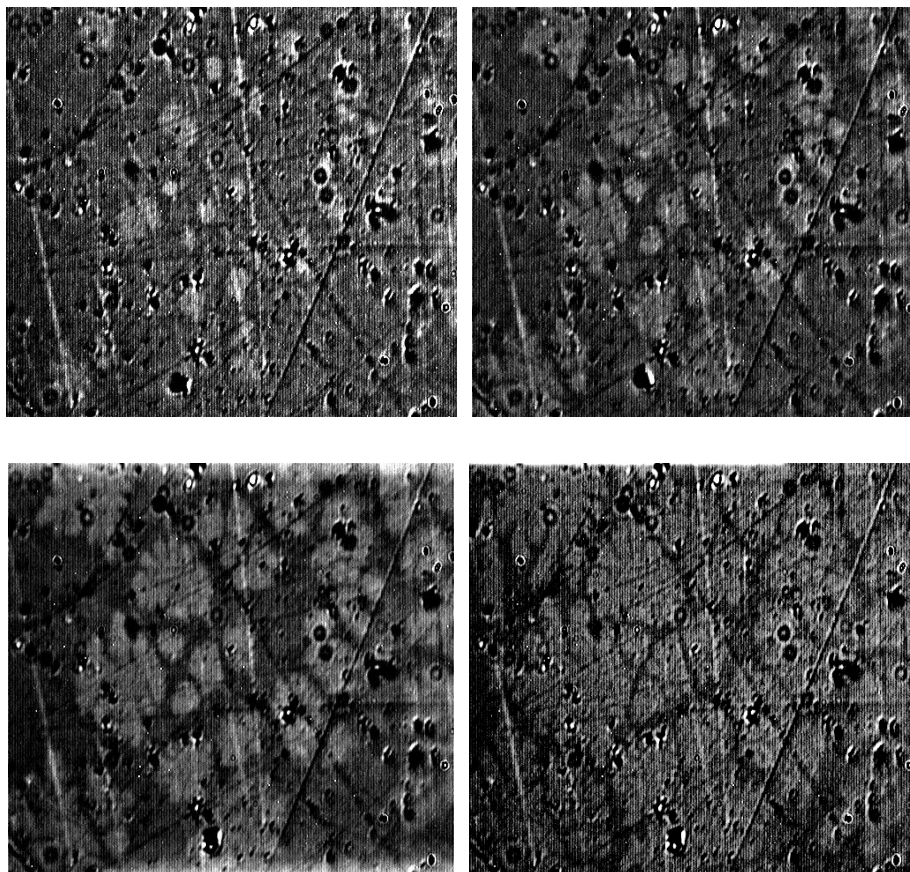


Р и с . 4. Кривая намагничивания, петля гистерезиса и картины ДС монокристалла $\text{SmCo}_{3,0}\text{Ni}_{2,0}$ на базисной плоскости, соответствующие их различным участкам

Процесс изменения намагниченности образца вследствие магнитного последействия отражает трансформация доменной структуры, представленная на рис. 5. На нем показаны изображения доменной структуры монокристалла $\text{SmCo}_{2,5}\text{Ni}_{2,5}$, полученные в последовательные моменты времени, отсчитывая с момента установления в зазоре электромагнита фиксированного значения обратного магнитного поля (на рис. 5 $H = 2,7$ кЭ).

Проведённые эксперименты показали, что при приложении обратного магнитного поля, близкого к значению H_{cl} наблюдается

наиболее быстрое изменение площади поверхностных доменов обратного знака, что согласуется с результатами ранее проведенных измерений магнитной вязкости на тех же монокристаллах методом вибрационного магнитометра. Эти данные свидетельствуют о том, что наибольшая скорость изменения относительной удельной намагниченности образцов при воздействии фиксированного обратного поля, по величине близкого к коэрцитивной силе, наблюдается в течение первых 5-10 секунд после начала эксперимента.



Р и с . 5. ДС монокристалла $\text{SmCo}_{2.5}\text{Ni}_{2.5}$ в поле $H = 2,7$ кЭ в различные моменты времени t после воздействия обратного поля:
0 (а), 3 (б), 6 (в) и 200 с (е)

Список литературы

1. Buschow K.H.J., de Boer F.R. Physics of Magnetism and Magnetic Materials // Kluwer Acad. Publ., 2004. 190 P.
2. Gabay A.M. , Hu X.C. , Hadjipanayis G.C. Preparation of YCo_5 , $PrCo_5$ and $SmCo_5$ anisotropic high-coercivity powders via mechanochemistry // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. V. 368. 2014. P. 75–81.
3. Кузнецова Ю.В., Супонев Н.П., Дёгтева О.Б., Салёв П.С. Исследование рельефа поверхности монокристаллов $Gd(Co,Cu)_5$ методами атомно-силовой микроскопии // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2011. № 11. С. 1-6.
4. Livingston J. D., McConnel M. D. Domain – wall energy in cobalt-rare-earth compounds // J. Appl. Phys. V.40. N11. P.4756-4762.
5. Дёгтева О.Б., Супонев Н.П., Чирков П.А., Кузнецова Ю.В. Исследование магнитного последствия в квазибинарных соединениях $R(Co,M)_5$ // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Физика. 2004. № 4(6). С. 10-17.
6. Кузнецова Ю.В., Величко Е.С., Ляхова М.Б., Семенова Е.М. Магнитная вязкость в высококоэрцитивных литых образцах $(Gd,Zr)(Co,Cu,Fe)_z$ // Вестник ТвГУ. Серия: Физика. 2011. Вып. 13. № 23. С.17-28.

**MAGNETIC DOMAIN STRUCTURE TRANSFORMATION
IN THE COURSE OF MAGNETIC AFTEREFFECT IN $\text{Sm}(\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x)_5$
COMPOUNDS**

Ю. В. Кузнецова, О. Б. Дегтева, Н. П. Супонев,

Э.Л. Айриян, И.Г.Березкин

Tver State University, 170100 Tver

Chair of Magnetism

The behaviour of magnetic domain structure of pseudobinary $\text{Sm}(\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x)_5$ compounds was studied in external fields near the coercive force. The process of magnetic aftereffect is described in terms of surface magnetic domain structure transformation.

Keywords: *domain structure, rare earth intermetallic compounds, magnetic aftereffect*

Об авторах:

КУЗНЕЦОВА Юлия Васильевна – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры магнетизма ТвГУ; *e-mail:* kuznecova_y_v@mail.ru

ДЕГТЕВА Ольга Борисовна – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры магнетизма ТвГУ; *e-mail:* Olga.Dyogteva@tversu.ru

СУПОНЕВ Николай Петрович – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры магнетизма ТвГУ; *e-mail:* Nick.Suponev@tversu.ru

АЙРИЯН Эдуард Львович – аспирант кафедры магнетизма

БЕРЕЗКИН Илья Григорьевич – студент магистратуры 1 курса ФТФ ТвГУ