

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный университет»

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ИЗУЧЕНИЯ КЛАСТЕРОВ,
НАНОСТРУКТУР
И НАНОМАТЕРИАЛОВ**

**PHYSICAL AND CHEMICAL ASPECTS
OF THE STUDY OF CLUSTERS,
NANOSTRUCTURES AND
NANOMATERIALS**

**FIZIKO-HIMIČESKIE ASPEKTY
IZUČENIÂ KLASTEROV,
NANOSTRUKTUR I NANOMATERIALOV**

выпуск 12

ТВЕРЬ 2020

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Ф50

Рецензирование статей осуществляется на основании Положения о рецензировании статей и материалов для опубликования в журнале «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов».

Официальный сайт издания в сети Интернет:

<https://www.physchemaspects.ru>

Ф50 Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2020. – Вып. 12. – 908 с.

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-47789 от 13.12.2011.

Издание составлено из оригинальных статей, кратких сообщений и обзоров теоретического и экспериментального характера, отражающих результаты исследований в области изучения физико-химических процессов с участием кластеров, наноструктур и наноматериалов физики, включая межфазные явления и нанотермодинамику. Журнал предназначен для научных и инженерно-технических работников, преподавателей ВУЗов, студентов и аспирантов. Издание подготовлено на кафедре общей физики Тверского государственного университета.

Переводное название: Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials

Транслитерация названия: Fiziko-himičeskie aspekty izučeniâ klasterov, nanostruktur i nanomaterialov

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Print ISSN 2226-4442

Online ISSN 2658-4360

© Коллектив авторов, 2020

© Тверской государственный университет, 2020

ВЛИЯНИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ОБРАБОТКИ НА МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА СОЕДИНЕНИЯ $Sm(Co, Cu, Fe)_5$

Е.М. Семенова¹, М.Б. Ляхова¹, Д.В. Иванов¹, Ю.В. Кузнецова¹, Д.Ю. Карпенков²,
А.И. Иванова¹, А.Ю. Карпенков¹, А.И. Синкевич¹, А.С. Антонов^{1,3}, Н.Ю. Сдобняков¹

¹ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

170100, Тверь, ул. Желябова, 33

²ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет
«МИСиС»

119049, Москва, Ленинский пр., 4

³ФГБОУ ВО «Тверская государственная сельскохозяйственная академия»

170904, Россия, Тверь, ул. Маршала Василевского, 7

semenova.em@tversu.ru

DOI: 10.26456/pcascnp/2020.12.149

Аннотация: Представлены результаты исследования микро-, нано- и магнитной доменной структуры сплавов $Sm(Co_{0,45}Cu_{0,40}Fe_{0,15})_5$ после выплавки и термических обработок. Показано, что гомогенизация и последующий низкотемпературный отжиг при 400 °С позволяют сформировать микроскопически гомогенную структуру с наноразмерными неоднородностями по составу. Такая структура позволяет реализовать коэрцитивную силу H_{cl} до 32 кЭ на литых образцах. Температурные зависимости коэрцитивной силы и остаточной намагниченности образцов в диапазоне от 300 до 700 К имеют линейно убывающий характер. Показано, что наноструктуре сплава с наибольшей H_{cl} соответствует фрактальная размерность $D_{f-n} \sim 2,3$.

Ключевые слова: $Sm(Co_{0,45}Cu_{0,40}Fe_{0,15})_5$, коэрцитивная сила, наноструктура, доменная структура, фрактальная размерность.

1. Введение

Высококоэрцитивное состояние магнитных материалов достигается путем формирования в них регулярной микро- и наноструктуры. Вопрос о технологических подходах и физических причинах, приводящих магнитный материал к структурному состоянию, соответствующему высокой коэрцитивной силе H_{cl} является предметом обсуждения в публикациях различных авторов [1-5]. Несмотря на достигнутые значительные результаты в этом вопросе, применительно, например, к высокоэнергоемким магнитам типа $Sm-Co$, механизм их перемагничивания и природа высококоэрцитивного состояния имеют неоднозначное толкование [3-5]. Поэтому экспериментальные результаты, иллюстрирующие влияние микро- и наноструктуры на коэрцитивность таких объектов являются источником информации при разработке магнитных материалов с заданными физическими свойствами.

В данной работе в качестве объекта исследования выступает соединение $Sm(Co, Cu, Fe)_5$. Составы такого типа представляют интерес в

свете результатов, полученных авторами [6-9] при изучении механизмов коэрцитивности. Было обнаружено, что длительный низкотемпературный отжиг приводит к формированию регулярной структуры, которая образована чередующимися слоями атомов $3d$ -металла, меди и редкоземельного металла. Такая структура приводит к возникновению обменного взаимодействия между слоями и обеспечивает высокоэнергетический барьер для движения доменной стенки. За счет этого в материале реализуется высококоэрцитивное состояние, так как для смещения доменных границ требуется магнитное поле более 30 кЭ. Настоящее исследование направлено на комплексное изучение микро-, нано- и магнитной доменной структуры, а также магнитных свойств сплавов $Sm(Co, Cu, Fe)_5$ после термических обработок включающих гомогенизацию и длительный низкотемпературный отжиг.

2. Эксперимент и обсуждение

Сплавы $Sm(Co_{0,45}Cu_{0,40}Fe_{0,15})_5$ были получены из высокочистых металлов методом дуговой плавки в атмосфере аргона и подвергнуты следующим термическим обработкам (ТО): 1) высокотемпературному отжигу при 1100 °С в течение 6 часов (ВТО) и 2) последующей низкотемпературной обработке при 400 °С в течение 55 часов (НТО).

Исследования микроструктуры проводились на растровом электронном микроскопе (РЭМ) JEOL JSM-6610LV на металлографических шлифах. Наноструктура выявлялась с помощью сканирующего зондового микроскопа (СЗМ) SolverNext на шлифах, подвергнутых электрохимическому травлению в насыщенном растворе хромового ангидрида в ортофосфорной кислоте. Применялся контактный метод сканирования поверхности с помощью проводящего кантилевера с алмазным покрытием DCP20. Магнитная доменная структура (ДС) выявлялась с помощью магнитно-силовой микроскопии (МСМ) в режиме двухпроходной методики сканирования. Использовались магнитные кантилеверы серии MFM10 для магнитно-силовых измерений с высоким пространственным разрешением.

Магнитные измерения выполнены на Physical Property Measurement System (PPMS-14) VSM (Quantum Design) в полях до 100 кЭ, измерения в температурном интервале от 300 до 700 К выполнены на LakeShore VSM 7410. Для измерений использовались ориентированные зерна сплава массой менее 10 мг, которые выкалывались из слитка. Полевые зависимости намагниченности строились с учетом размагничивающего фактора образцов.

На первом этапе работы были выполнены исследования микроструктуры шлифов до и после термических обработок. На рис. 1

приведены типичные микроструктуры образцов после выплавки (а), высокотемпературного (б) и низкотемпературного (в) отжигов. Представленные изображения получены методом растровой электронной микроскопии в режиме отраженных электронов (ВЕС), который позволяет визуализировать фазовый контраст. Сразу после выплавки в исходном состоянии сплав $Sm(Co_{0,45}Cu_{0,40}Fe_{0,15})_5$ имеет неоднородную микроструктуру, которая эволюционирует в процессе термических обработок от гетерогенной до микроскопически гомогенной.

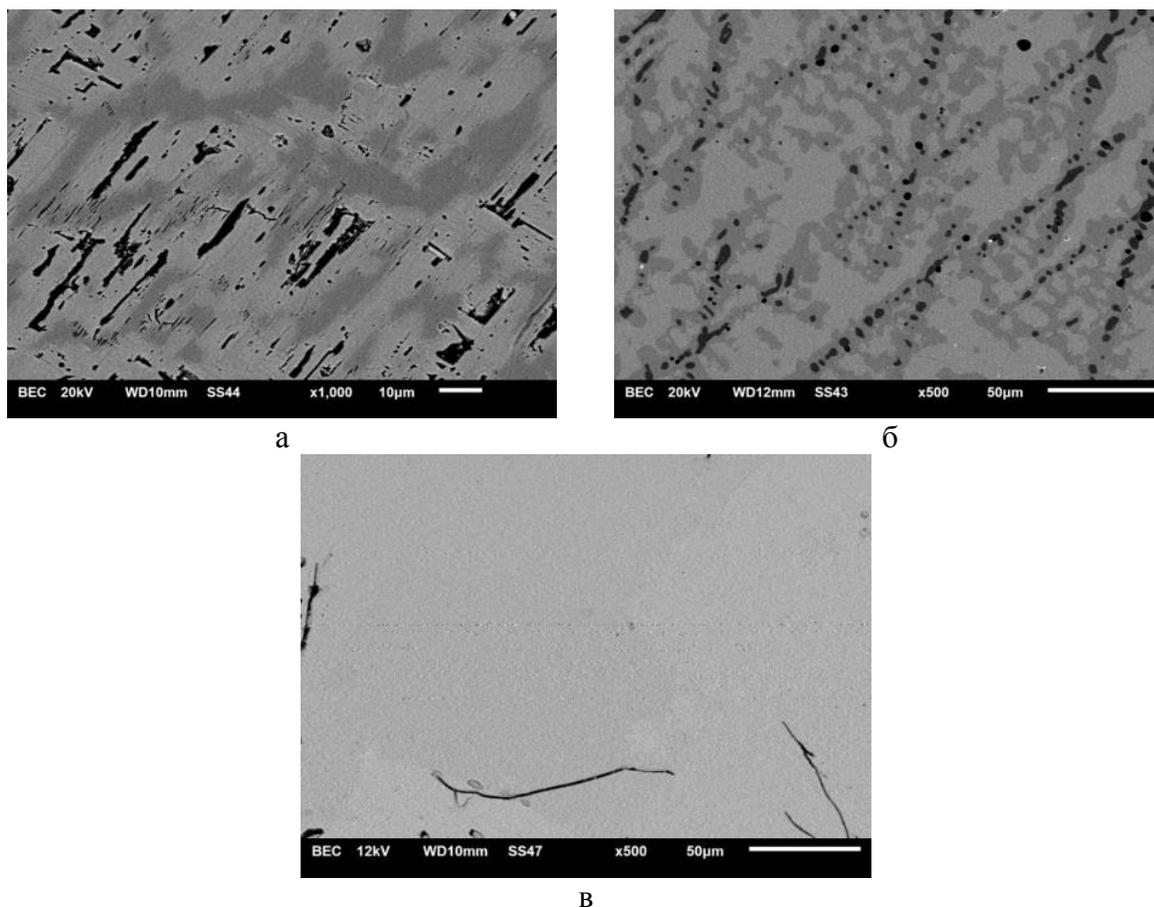


Рис. 1. Микроструктура образцов сплава $Sm(Co_{0,45}Cu_{0,40}Fe_{0,15})_5$: а – после выплавки, б – после отжига при 1100 °С, в – после отжига при 400 °С.

В исходном сплаве (см. рис. 1 а) присутствуют две основные фазовые составляющие (на рис. 1 а светло- и темно-серые области), имеющие стехиометрические соотношения 1:4 и 1:5, соответственно. Темные вытянутые области, занимающие менее 8% объема сплава, представляют собой фазу, обогащенную медью. ВТО при 1100 °С в течение 6 часов (см. рис. 1 б) не изменяет количества фазовых составляющих, однако области, соответствующие каждой фазе, становятся более однородными и приобретают четкие границы. Анализ элементного состава

указывает на изменение стехиометрии соответствующих фаз до 1:5 и 1:6. Кроме того, по данным РЭМ происходит изменение относительного содержания меди в составляющих.

Последний этап термической обработки – НТО при 400 °С, позволяет сформировать микроскопически гомогенное состояние в сплаве (см. рис. 1 в). На снимке видно, что режим ВЕС не выявляет микрообластей, отличающихся по элементному составу. Анализ элементного состава этих образцов дает химическую формулу сплава близкую к составу, который был изначально заложен в шихту.

Исследование поверхности образцов высокоразрешающими методами контактной атомно-силовой микроскопии позволило выявить наличие наноразмерной структуры. На рис. 2 представлены АСМ-изображения, полученные после электрохимического травления поверхности образцов, подвергнутых ВТО и НТО. Электрохимическое травление визуализирует микро- и наноструктуру шлифа, создавая топографию, отражающую распределение фазовых составляющих, отличающихся по содержанию основных компонентов сплава. После гомогенизации в фазовых составляющих сплава обнаруживаются неоднородности, имеющие нерегулярный характер со средним размером порядка 50 нм (см. рис. 2 а). После длительного низкотемпературного отжига в структуре сплава происходят заметные изменения: на поверхности выявляются плотноупакованные области округлой формы, средний размер которых составляет 100–200 нм (см. рис. 2 б). Таким образом, микроскопически гомогенный образец на наноразмерном уровне имеет признаки гетерогенности, что, вероятно, связано с возникновением периодических концентрационных неоднородностей по меди подобных ликвационным. Следовательно, как и ожидалось, варьирование технологических режимов ТО, а именно последовательное применение высокотемпературного и низкотемпературного отжигов, приводит к формированию регулярной микро- и наноструктуры образцов, параметры которой определяют коэрцитивность материалов.

Магнитная доменная структура, соответствующая образцам после высоко- и низкотемпературного отжигов представлена на рис. 3. Домены выявлялись на базисной плоскости ориентированных зерен сплава. Конфигурация доменов образца после отжига при 1100 °С отражает неоднородную структуру его фазовых составляющих (см. рис. 3 а): видны локальные участки с ДС близкой к лабиринтной и к замыкающим доменам, но также и области в которых идентифицировать конфигурацию доменов сложно. При этом после отжига при 400 °С на всей поверхности шлифа выявляется регулярная ДС (см. рис. 3 б). Ее конфигурацию также нельзя уверенно идентифицировать на принадлежность к какому-либо

виду замыкающих или основных доменов. Это связано с тем, что области, обогащенные медью, служат центрами закрепления доменных границ, и препятствуют формированию равновесной доменной структуры типичной для поверхности одноосного магнетика. Таким образом, наблюдаемая структура доменов отражает распределение неоднородностей в образцах сплава: на рис. 3 а видны микрообласти с доменами различной ширины и конфигурации, что соответствует гетерогенной микроструктуре, а на рис. 3 б структура доменов на всей наблюдаемой поверхности однотипна.

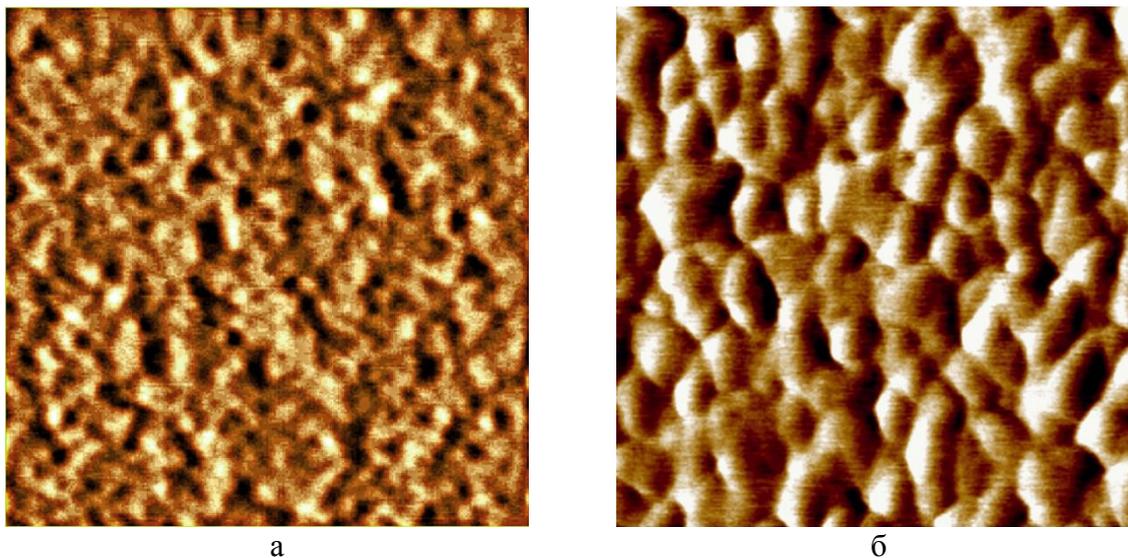


Рис. 2. АСМ-изображения поверхности сплава $Sm(Co_{0,45}Cu_{0,40}Fe_{0,15})_5$: а – после ВТО, б – после НТО. Размер изображений: 3×3 мкм.

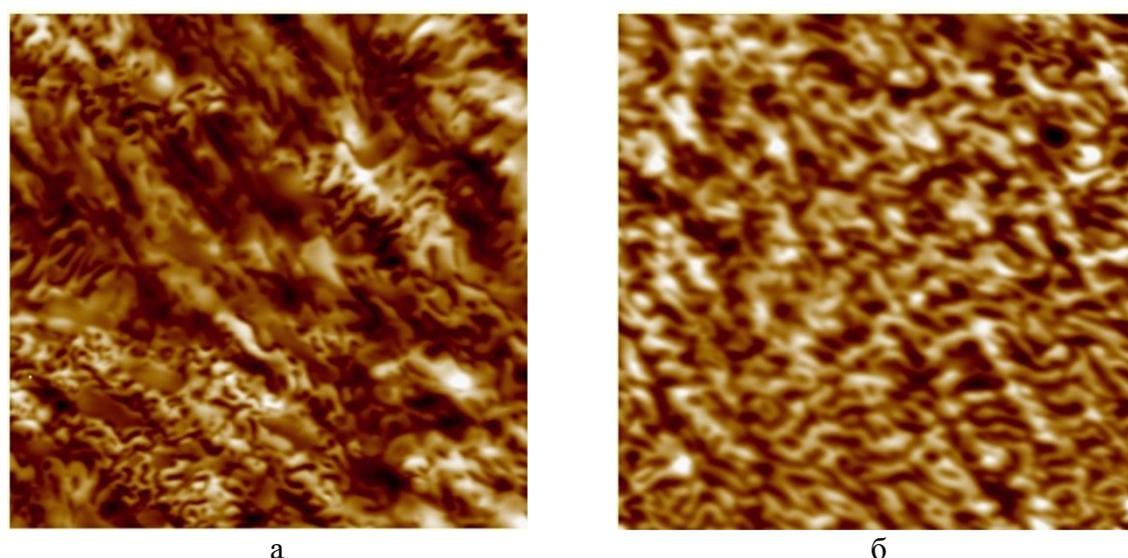


Рис. 3. МСМ-изображения ДС образцов сплава $Sm(Co_{0,45}Cu_{0,40}Fe_{0,15})_5$: а – после ВТО, б – после НТО. Размер изображений: 100×100 мкм.

Для анализа процесса перемагничивания, были измерены петли

гистерезиса образцов после гомогенизации и полного цикла термообработок (см. рис. 4). Результаты магнитных измерений свидетельствуют о значительной коэрцитивной силе образцов как после отжига при 1100 °С ($H_{cl} = 7$ кЭ), так и после отжига при 400 °С ($H_{cl} = 32$ кЭ). Однако, после полного цикла ТО, коэрцитивная сила возрастает более чем в 4 раза. Этот результат согласуется с данными работы [6].

Температурные зависимости коэрцитивного поля и остаточной намагненности образцов после низкотемпературного отжига при 400 °С, представленные на рис. 5, имеют линейно убывающий характер. Такое поведение основных гистерезисных характеристик с ростом температуры не противоречит механизму перемагничивания за счет задержки смещения доменных границ на концентрационных неоднородностях.

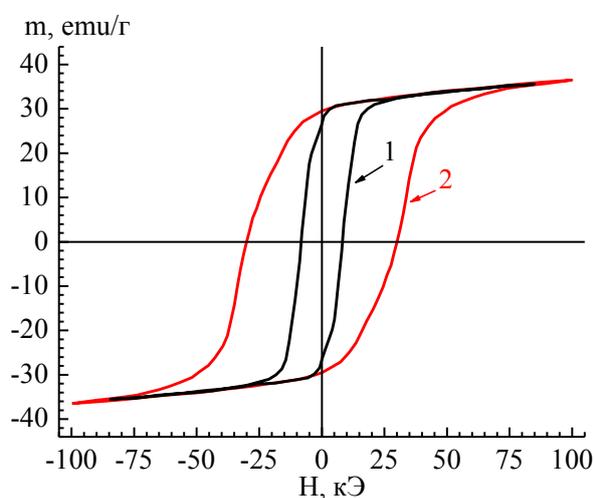


Рис. 4. Петли гистерезиса образцов $Sm(Co_{0.45}Cu_{0.40}Fe_{0.15})_5$: кривая 1 – после ВТО, кривая 2 – после НТО.

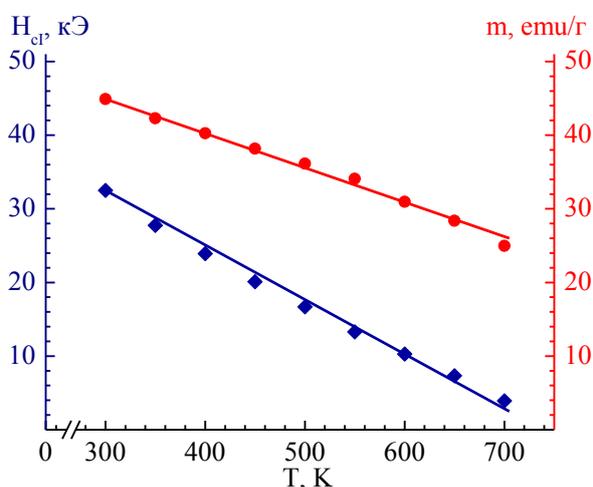


Рис. 5. Температурные зависимости коэрцитивной силы и остаточной намагненности образцов после НТО при 400 °С.

3. Анализ фрактальной размерности

Методы сканирующей зондовой микроскопии позволили нам получить массив данных (3d-сканов) о наноструктуре поверхности образцов (контактная АСМ) и полях рассеяния доменной структуры (МСМ). Анализируя данные СЗМ для оценки параметров наноструктуры материала или масштабов ДС, обычно приводят их линейные размеры, плотность и объемные доли. Однако, не менее важна их геометрия. Например, границы фаз, зерен и ликвации служат центрами задержки смещения доменных границ при перемагничивании, поэтому конфигурация их распределения также должна учитываться.

Современным приемом описания объектов сложной формы является фрактальная геометрия. Варианты применения фрактального анализа к

магнитным материалам представлены в работах [10-13], где показано, что существует корреляция между фрактальной размерностью микро- и наноструктуры магнитных материалов и их структурно-зависимыми магнитными свойствами. Анализ фрактальной размерности магнитной ДС пленок и монокристаллов представлен в работах [14, 15], где приведена фрактальная размерность профиля ДС на базисной плоскости монокристалла Co ($D_L=1,55$) и соединения $Dy-NdFeB$ ($D_L=1,65$) при толщине единичных магнитных кристаллов 400 и 600 мкм соответственно.

В данном исследовании для определения оптимальных параметров формирования наиболее развитой поверхности магнитотвердого материала проводилось изучение профиля СЗМ-изображений на наличие фрактальных структур, а также расчет фрактальной размерности профиля и поверхности образцов. Оценка фрактальной размерности и обработка графических материалов производилась в программном комплексе Image Analysis (версия 3.5.30.19856) по методике, изложенной в [16]. Для анализа АСМ- и МСМ-изображений использовался диапазон масштабов от 1×1 мкм до 100×100 мкм. Анализ АСМ-изображений наноструктуры образцов с высоким значением H_c после НТО предсказывает диапазон изменения фрактальной размерности поверхности $2,21 \leq D_f \leq 2,35$, что соответствует неразвитому фрактальному рельефу и значениям, полученным для магнитомягких материалов [13]. Средняя фрактальная размерность для масштабов до 5×5 мкм практически одинакова, что подтверждает адекватность предложенного в [17-19] метода определения фрактальной размерности на различных масштабах. Однако при анализе более крупных масштабов поверхностных агломератов наблюдались участки с фрактальной размерностью до 2,46. Эта величина соответствует умеренно развитому фрактальному рельефу. Возможно, эти фрактальные агломераты на поверхности образца не деградировали в процессе термических обработок. Для масштабов 10×10 мкм и выше (т.е. на микроуровне) неразвитый или умеренно развитый фрактальный рельеф не обнаруживается. Фактически можно говорить о формировании 3D-структуры.

На рис. 6 представлены усредненные значения (по масштабам) распределения вероятности P обнаружения кластеров с определенной фрактальной размерностью поверхности образцов $Sm(Co_{0,45}Cu_{0,40}Fe_{0,15})_5$ после отжига. Анализ данных диаграммы на рис. 6 показывает, что высокотемпературный отжиг является менее эффективным инструментом для формирования разнообразия фрактального рельефа поверхности по сравнению с низкотемпературным, при котором, несмотря на умеренную деградацию рельефа, наблюдается процесс формирования участков с более

высокой фрактальной размерностью. Таким образом, для поверхности соединения $Sm(Co_{0,45}Cu_{0,40}Fe_{0,15})_5$ не обнаруживается развитый фрактальный рельеф, т.е. рельеф отвечающий значениям $D_f > 2,5$. Для образцов после ВТО с $H_{cl} = 7$ кЭ характерен рельеф наноструктуры со средним значением фрактальной размерности $D_{f-n} \sim 2,08$. Применение к этим образцам низкотемпературного отжига приводит к росту H_{cl} до 32 кЭ и значению $D_{f-n} \sim 2,3$. Таким образом, высококоэрцитивное состояние характерно для более развитого фрактального рельефа. В процессе длительного низкотемпературного отжига в объеме образца происходит твердофазная реакционная диффузия, приводящая образец к микроскопически гомогенному состоянию и, как следствие, естественной деградации рельефа. При этом на наноуровне остаются неоднородности по меди, образующие регулярную структуру центров задержки смещения доменных границ.

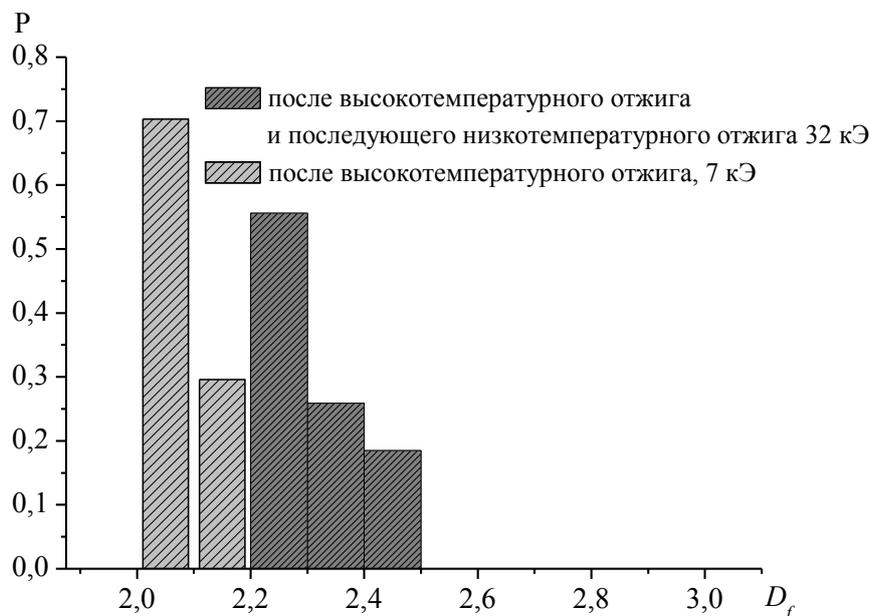


Рис. 6. Обобщенное распределение вероятности P обнаружения на поверхности образцов $Sm(Co_{0,45}Cu_{0,40}Fe_{0,15})_5$ кластеров с определенной фрактальной размерностью поверхности.

МСМ-изображения ДС базисной плоскости образцов в терморазмагниченном состоянии после ТО представлены на рис. 3. Наблюдаемая ДС отражает распределение неоднородностей и локальной коэрцитивности образцов сплава: на рис. 3 а видны микрообласти с доменами различного масштаба близкой конфигурации, что соответствует гетерогенной нерегулярной микро- и наноструктуре. Фрактальная размерность такой сложной ДС составила порядка $D_{f-d} \sim 2,13$. При этом

после низкотемпературного отжига (см. рис. 3 б) в поле зрения 100×100 мкм наблюдается структура доменов одинаковой ширины, отражающая однородное распределение центров задержки смещения доменных границ. Фрактальная размерность такой ДС составила $D_{f-d} \sim 2,06$. Таким образом, фрактальная размерность соответствующая ДС сплава с более высокой коэрцитивной силой (32 кЭ) имеет меньшее значение, чем тот же параметр для ДС образцов с $H_{cl} = 7$ кЭ.

В Таблице 1 сведены данные, позволяющие сопоставить величину коэрцитивной силы H_{cl} образцов после ВТО и НТО со средним значением фрактальной размерности их наноструктуры D_{f-n} и доменной структуры D_{f-d} .

Таблица 1. Сравнение фрактальных и магнитных параметров образцов после отжигов.

Тип отжига	Параметры		
	H_{cl} , кЭ	D_{f-n}	D_{f-d}
ВТО	7	2,08	2,13
НТО	32	2,30	2,06

Здесь D_{f-n} – среднее значение фрактальной размерности наноструктуры; D_{f-d} – среднее значение фрактальной размерности доменной структуры.

4. Заключение

Получены данные о микроструктуре, элементном составе составляющих и наноструктуре сплавов $Sm(Co,Cu,Fe)_5$. Показано, что в образцах после низкотемпературной обработки микрогетерогенность не выявляется, в то же время наноструктура является регулярной и представляет собой округлые выделения размером 100–200 нм. Совокупный анализ данных микро- и наноструктуры, а также магнитных измерений указывает на то, что основным механизмом коэрцитивности в сплавах является задержка смещения доменных границ на наноструктурных неоднородностях. Показано возможное соответствие между магнитными свойствами и значениями фрактальной размерности поверхности и доменной структуры. Получены данные, которые показывают, что варьирование режимов термических обработок позволяет получать образцы с требуемым значением фрактальной размерности и коэрцитивности.

Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках выполнения государственного задания в сфере научной деятельности (проект № 0817-2020-0007) и Российского научного фонда (проект № 18-13-00135). Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования Тверского государственного университета.

Библиографический список:

1. **Hirosawa, S.** Perspectives for high-performance permanent magnets: applications, coercivity, and new materials / S. Hirosawa, M. Nishino, S. Miyashita // *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*. – 2017. – V. 8. – № 1. – Art. № 013002. – 12 p. DOI: 10.1088/2043-6254/aa597c.
2. **Zhao, G.P.** Coercivity mechanisms in nanostructured permanent magnets / G.P. Zhao, L. Zhao, L.C. Shen, J. Zou, L. Qiu // *Chinese Physics B*. – 2019. – V. 28. – № 7. – P. 077505-1-077505-13. DOI: 10.1088/1674-1056/28/7/077505.
3. **Skomski, R.** Domain-wall curvature and coercivity in pinning type *Sm–Co* magnets / R. Skomski // *Journal of Applied Physics*. – 1997. – V. 81. – I. 8. – P. 5627-5629. DOI: 10.1063/1.364620.
4. **Fähnle, M.** Theory of giant intrinsic magnetic hardness in pseudobinary rare-earth transition metal compounds / M. Fähnle, H. Oesterreicher // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 1983. – V. 38. – I. 3. – P. 331-335. DOI: 10.1016/0304-8853(83)90376-1.
5. **Givord, D.** Coercivity analysis in *Sm(Co,Cu,Fe,Zr)₇₋₈* magnets / D. Givord, M.F. Rossignol, D.W. Taylor, A.E. Ray // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 1992. – V. 104-107. – Part 2. – P. 1126-1128. DOI: 10.1016/0304-8853(92)90517-R.
6. **Gabay, A.M.** Magnetic states and structural transformations in *Sm(Co,Cu)₅* and *Sm(Co,Fe,Cu)₅* permanent magnets / A.M. Gabay, P. Larson, I.I. Mazin, G.C. Hadjipanayis // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2005. – V. 38. – № 9. – P. 1337-1341. DOI: 10.1088/0022-3727/38/9/002.
7. **Senno, H.** Coercive force of new *Cu*-substituted samarium cobalt alloys / H. Senno, Y. Tawara, E. Hirota // *Applied Physics Letters*. – 1976. – V. 29. – I. 8. – P. 514-516. DOI: 10.1063/1.89149.
8. **Кузнецова, Ю.В.** Анализ рельефа поверхности монокристаллов сплавов *Sm(Co,Cu)₅* методами атомно-силовой микроскопии / Ю.В. Кузнецова, Н.П. Супонев, О.Б. Дегтева, Э.Л. Айриян // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. – 2012. – Вып. 4. – С. 143-146.
9. **Дегтева, О.Б.** Магнитные свойства спеченных гетерогенных композиций на основе сплавов *3d* – и *4f* – переходных металлов / О.Б. Дегтева, Е.М. Семенова, М.Б. Ляхова, Ю.В. Кузнецова // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. – 2017. – Вып. 9. – С. 169-176. DOI: 10.26456/pcascnn/2017.9.169.
10. **Li, J.M.** Image-based fractal description of microstructures / J.M. Li, Li Lü, M.O. Lai, B. Ralph. – Norwell Massachusetts USA: Kluwer Academic Publishers, 2010. – 285 p.
11. **Комогорцев, С.В.** Влияние фрактальной размерности на кривую намагничивания обменно-связанного кластера магнитных наночастиц / С.В. Комогорцев, Р.С. Исхаков, В.А. Фельк // *Журнал экспериментально и теоретической физики*. – 2019. – Т. 155. – Вып. 5. – С. 886-893. DOI: 10.1134/S0044451019050122.
12. **Ролдугин, В.И.** Фрактальные структуры в дисперсных системах / В.И. Ролдугин // *Успехи химии*. – 2003. – Т. 72. – Вып. 10. – С. 931-959. DOI: 10.1070/RC2003v072n10ABEH000805.
13. **Кем, А.Ю.** Фрактальная структура и свойства магнитомягкого порошкового материала системы легирования *Fe–P* / А.Ю. Кем // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. – 2017. – Т. 83. – № 12. – P. 29-33. DOI: 10.26896/1028-6861-

2017-83-12-29-33.

14. **Han, B.-S.** Fractal study of magnetic domain patterns / B.-S. Han, D. Li, D.-J. Zheng, Y. Zhou // *Physical Review B*. – 2002. – V. 66. – I. 1. – Art. № 014433. – 5 p. DOI: 10.1103/PhysRevB.66.014433.

15. **Лисовский, Ф.В.** Термодинамически устойчивые фракталоподобные доменные структуры в магнитных пленках / Ф.В. Лисовский, Л.И. Лукашенко, Е.Г. Мансветова // *Письма в ЖЭТФ*. – 2004. – Т. 79. – Вып. 7-8. – С. 432-435.

16. *Image Analysis P9*. Справочное руководство. – М.: NT-MDT SI, 2019. – 582 с.

17. **Иванов, Д.В.** Фрактальные свойства наноразмерных пленок никеля и хрома / Д.В. Иванов, А.С. Антонов, Н.Ю. Сдобняков и др. // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. – 2019. – Вып. 11. – С. 138-152. DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.138.

18. **Белко, А.В.** Фрактальная структура кластеров золота, образованных при осаждении в вакууме на диэлектрические подложки / А.В. Белко, А.В. Никитин, Н.Д. Стрекаль, А.Е. Герман // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. – 2009. – № 5. – С. 11-15.

19. **Сдобняков, Н.Ю.** Морфологические характеристики и фрактальный анализ металлических пленок на диэлектрических поверхностях: монография / Н.Ю. Сдобняков, А.С. Антонов, Д.В. Иванов. – Тверь: Тверской государственный университет, 2019. – 168 с.

References:

1. **Hirosawa, S.** Perspectives for high-performance permanent magnets: applications, coercivity, and new materials / S. Hirosawa, M. Nishino, S. Miyashita // *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*. – 2017. – V. 8. – № 1. – Art. № 013002. – 12 p. DOI: 10.1088/2043-6254/aa597c.

2. **Zhao, G.P.** Coercivity mechanisms in nanostructured permanent magnets / G.P. Zhao, L. Zhao, L.C. Shen, J. Zou, L. Qiu // *Chinese Physics B*. – 2019. – V. 28. – № 7. – P. 077505-1-077505-13. DOI: 10.1088/1674-1056/28/7/077505.

3. **Skomski, R.** Domain-wall curvature and coercivity in pinning type *Sm-Co* magnets / R. Skomski // *Journal of Applied Physics*. – 1997. – V. 81. – I. 8. – P. 5627-5629. DOI: 10.1063/1.364620.

4. **Fähnle, M.** Theory of giant intrinsic magnetic hardness in pseudobinary rare-earth transition metal compounds / M. Fähnle, H. Oesterreicher // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 1983. – V. 38. – I. 3. – P. 331-335. DOI: 10.1016/0304-8853(83)90376-1.

5. **Givord, D.** Coercivity analysis in *Sm(Co,Cu,Fe,Zr)₇₋₈* magnets / D. Givord, M.F. Rossignol, D.W. Taylor, A.E. Ray // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 1992. – V. 104-107. – Part 2. – P. 1126-1128. DOI: 10.1016/0304-8853(92)90517-R.

6. **Gabay, A.M.** Magnetic states and structural transformations in *Sm(Co,Cu)₅* and *Sm(Co,Fe,Cu)₅* permanent magnets / A.M. Gabay, P. Larson, I.I. Mazin, G.C. Hadjipanayis // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2005. – V. 38. – № 9. – P. 1337-1341. DOI: 10.1088/0022-3727/38/9/002.

7. **Senno, H.** Coercive force of new *Cu*-substituted samarium cobalt alloys / H. Senno, Y. Tawara, E. Hirota // *Applied Physics Letters*. – 1976. – V. 29. – I. 8. – P. 514-516. DOI: 10.1063/1.89149.

8. **Kuznetsova, Yu.V.** Analiz rel'efa poverkhnosti monokristallov splavov *Sm(Co,Cu)₅*

metodami atomno-silovoi mikroskopii [The surface relief analysis of $Sm(Co,Cu)_5$ single crystals by atomic-force microscopy] Yu.V. Kuznetsova, E.L. Ayriyan, O.B. Dyogteva, N.P. Suponev // Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials. – 2012. – I. 4. – P. 143-146. (In Russian).

9. **Dyogteva, O.B.** Magnitnye svoystva spechennykh geterogennykh kompozitsii na osnove splavov $3d$ – i $4f$ – perekhodnykh metallov [Magnetic properties of sintered heterogeneous compositions based on alloys of $3d$ – and $4f$ – transition metals] / O.B. Dyogteva, E.M. Semenova, M.B. Lyakhova, Yu.V. Kuznetsova // Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials. – 2017. – I. 9. – P. 169-176. DOI: 10.26456/pcascnn/2017.9.169. (In Russian).

10. **Li, J.M.** Image-based fractal description of microstructures / J.M. Li, Li Lü, M.O. Lai, B. Ralph. – Norwell Massachusetts USA: Kluwer Academic Publishers, 2010. – 285 p.

11. **Komogortsev, S.V.** Fractal dimension effect on the magnetization curves of exchange-coupled clusters of magnetic nanoparticles / S.V. Komogortsev, R.S. Iskhakov, V.A. Fel'k // Journal of Experimental and Theoretical Physics. – 2019. – V. 128. – I. 5. – P. 754-760. DOI: 10.1134/S1063776119040095.

12. **Roldughin, V.I.** Fractal structures in disperse systems / V.I. Roldughin // Russian Chemical Reviews. – 2003. – V. 72. – I. 10. – P. 823-847. DOI: 10.1070/RC2003v072n10ABEH000805.

13. **Kem, A.Yu.** Fraktal'naya struktura i svoystva magnitomyagkogo poroshkovogo materiala sistemy legirovaniya $Fe-P$ [Fractal structure and properties of soft magnetic powder material of the alloying system $Fe-P$] / A.Yu. Kem // Industrial laboratory. Diagnostics of materials. – 2017. – V. 83. – № 12. – P. 29-23. DOI: 10.26896/1028-6861-2017-83-12-29-33. (In Russian).

14. **Han, B.-S.** Fractal study of magnetic domain patterns / B.-S. Han, D. Li, D.-J. Zheng, Y. Zhou // Physical Review B. – 2002. – V. 66. – I. 1. – Art. № 014433. – 5 p. DOI: 10.1103/PhysRevB.66.014433.

15. **Lisovskii, F.V.** Thermodynamically stable fractal-like domain structures in magnetic films / F.V. Lisovskii, L.I. Lukashenko, E.G. Mansvetova // JETP Letters. – 2004. – V. 79. – I. 7. – P. 352-354. DOI: 10.1134/1.1765181.

16. Image Analysis P9. Spravochnoe rukovodstvo [Image Analysis P9. Manual]. – M.: NT-MDT SI, 2019. – 582 p. (In Russian).

17. **Ivanov, D.V.** Fraktal'nye svoystva nanorazmernykh plenok nikelya i khroma [Fractal properties of nanosized films of nickel and chromium] / D.V. Ivanov, A.S. Antonov, N.Yu. Sdobnyakov i dr. // Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials. – 2019. – I. 11. – P. 138-152. DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.138. (In Russian).

18. **Belko, A.V.** Fractal structure of gold clusters formed under vacuum deposition on dielectric substrates / A.V. Belko, A.V. Nikitin, N.D. Strelak', A.E. German // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2009. – V. 3. – I. 3. – P. 338-342. DOI: 10.1134/S1027451009030021.

19. **Sdobnyakov, N.Yu.** Morfologicheskie kharakteristiki i fraktal'nyi analiz metallicheskih plenok na dielektricheskikh poverkhnostyakh: monografiya [Morphological characteristics and fractal analysis of metal films on dielectric surfaces: monograph] / N.Yu. Sdobnyakov, A.S. Antonov, D.V. Ivanov. – Tver: Tverskoj gosudarstvenniy universitet, 2019. – 168 p. (In Russian).

EFFECTS OF LOW-TEMPERATURE TREATMENT ON MAGNETIC PROPERTIES OF
 $\text{Sm}(\text{Co}, \text{Cu}, \text{Fe})_5$ COMPOUNDS

E.M. Semenova¹, M.B. Lyakhova¹, D.V. Ivanov¹, Yu.V. Kuznetsova¹, D.Yu. Karpenkov²,
A.I. Ivanova¹, A.Yu. Karpenkov¹, A.I. Sinkevich¹, A.S. Antonov^{1,3}, N.Yu. Sdobnyakov¹

¹Tver State University, Tver, Russia

²National University of Science and Technology «MISiS», Moscow, Russia

³Tver State Agricultural Academy, Tver, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.149

Abstract: The results on the micro- and nanostructures and on the magnetic domain structure of $\text{Sm}(\text{Co}_{0,45}\text{Cu}_{0,40}\text{Fe}_{0,15})_5$ compound are presented. It was shown that the sequential high- and low-temperature heat treatments lead to formation of a homogeneous microstructure with some nanoscale compositional heterogeneities. Such a structure provides the coercive field H_{cl} of up to 32 kOe. The coercivity and remanent magnetization of the samples in the temperature range from 300 to 700 K linearly decrease. It is shown that the nanostructure of the alloy with the highest H_{cl} corresponds to the fractal dimension $D_{f-n} \sim 2,3$.

Keywords: $\text{Sm}(\text{Co}, \text{Cu}, \text{Fe})_5$, coercivity, nanostructure, domain structure, fractal dimension.

Семенова Елена Михайловна – к.ф.-м.н., доцент кафедры физики конденсированного состояния ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Ляхова Марина Борисовна – к.ф.-м.н., доцент кафедры физики конденсированного состояния ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Иванов Дмитрий Викторович – аспирант кафедры общей физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Кузнецова Юлия Васильевна – к.ф.-м.н., доцент кафедры физики конденсированного состояния ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Карпенков Дмитрий Юрьевич – к.ф.-м.н., старший научный сотрудник ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Иванова Александра Ивановна – к.ф.-м.н., доцент кафедры прикладной физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Карпенков Алексей Юрьевич – к.ф.-м.н., доцент кафедры физики конденсированного состояния ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Синкевич Артем Игоревич – студент 2 курса магистратуры кафедры физики конденсированного состояния ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Антонов Александр Сергеевич – к.ф.-м.н., научный сотрудник ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет», старший преподаватель ФГБОУ ВО «Тверская государственная сельскохозяйственная академия»

Сдобняков Николай Юрьевич – к.ф.-м.н., доцент кафедры общей физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Elena M. Semenova – Ph. D., Docent of the Condensed Matter Physic Department, Tver State University

Marina B. Lyakhova – Ph. D., Docent of the Condensed Matter Physic Department, Tver State University

Dmitry V. Ivanov – postgraduate student of the General Physics Department, Tver State University

Yulia V. Kuznetsova – Ph. D., Docent of the Condensed Matter Physic Department, Tver State University

Dmitriy Yu. Karpenkov – Ph. D., Senior Researcher, National University of Science and Technology «MISiS»

Alexandra I. Ivanova – Ph. D., Docent of the Applied Physic Department, Tver State University

Alexey Yu. Karpenkov – Ph. D., Docent of the Condensed Matter Physic Department, Tver State University

Artem I. Sinkevich – 2nd year graduate student, Condensed Matter Physic Department, Tver State University

Alexander S. Antonov – Ph. D., Researcher, Tver State University, Senior Lecturer, Tver State Agricultural Academy

Nickolay Yu. Sdobnyakov – Ph. D., Docent of the General Physics Department, Tver State University

Поступила в редакцию/received: 01.08.2020; после рецензирования/reviced: 16.08.2020; принята/accepted 01.09.2020.