

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 13

ТВЕРЬ 2021

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: Издательство Тверского государственного университета, 2021. – Вып. 13. – 956 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, 2021

© Тверской государственный университет, 2021

ФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НАНОСТРУКТУРЫ ГЕТЕРОГЕННОГО ВЫСОКОКОЭРЦИТИВНОГО СПЛАВА

Е.М. Семенова¹, М.Б. Ляхова¹, Д.В. Иванов¹, А.И. Синкевич¹, А.С. Антонов^{1,2},
Н.Ю. Сдобняков¹

¹ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»
170002, Россия, Тверь, Садовый пер., 35

²ФГБОУ ВО «Тверская государственная сельскохозяйственная академия»
170904, Россия, Тверь, ул. Маршала Василевского, 7
semenova_e_m@mail.ru, nsdobnyakov@mail.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2021.13.368

Аннотация: Методом атомно-силовой микроскопии получены изображения наноструктуры составляющих гетерогенного интерметаллида $SmCoCuFeZr$ в высококоэрцитивном состоянии. На микроуровне в сплавах выделили два типа областей (фазовых составляющих) отличающихся по интегральному элементному составу и интервалам коэрцитивности. На основе данных атомно-силового микроскопа проводится анализ фрактальных характеристик поверхности этих областей. Показано, что фрактальная размерность наноструктуры коррелирует с локальной коэрцитивностью фазовых составляющих. Фазовая составляющая с относительно низкой коэрцитивностью демонстрирует возможность существования структур с фрактальной размерностью в диапазоне 2,396–2,475, что соответствует умеренно развитому фрактальному рельефу. При этом высококоэрцитивная составляющая с регулярной наноструктурой характеризуется более высокой фрактальной размерностью 2,452–2,508, а на отдельных участках образца встречались области с фрактальной размерностью до 2,577.

Ключевые слова: атомно-силовая микроскопия, нанорельеф, наноструктура, морфология поверхности, коэрцитивность, фрактальная размерность.

1. Введение

На основе соединений $Sm-Co$ разработаны высокоэнергоемкие постоянные магниты с высокой температурной стабильностью гистерезисных характеристик. Легирование этих составов железом, медью и цирконием в сочетании с термической обработки сплавов приводит к формированию регулярной гетерогенной микро- и наноструктуры которая обеспечивает высококоэрцитивное состояние этих материалов [1-6]. Особенностью редкоземельных интерметаллидов $RCoCuFeZr$ является повышенная температурная стабильность магнитных параметров, что позволяет использовать магниты на их основе в устройствах электроники и автоматики в широком температурном диапазоне. При этом каждое зерно магнита является коэрцитивным и обладает гетерогенной наноструктурой. Наноструктура основных фазовых составляющих сплавов этого типа представляет собой когерентно связанную систему «ячеек», с границами, обогащенными медью. Границы «ячеек» служат эффективными центрами задержки смещения доменных границ при перемагничивании, что

обеспечивает высокие значения коэрцитивной силы (более 30 кЭ) зерен сплавов и постоянных магнитов на их основе.

На микроуровне в сплавах выделяют два типа областей (условно обозначим их *A* и *B*), отличающихся по интегральному элементному составу и интервалам коэрцитивности. Наноструктура составляющих *A* и *B* хотя и близка по линейным размерам (50–100 нм), но отличается по конфигурации: в составляющей с низкой коэрцитивностью (*A*) «ячейки» имеют округлую форму и в целом ячеистая структура не имеет дальнего порядка, а в высококоэрцитивной фазовой составляющей (*B*) наблюдается упорядоченная структура «ячеек», геометрия которых в сечении имеет форму близкую к правильному четырехграннику [4]. В случае, когда масштабы структур сопоставимы, а отличие заключается в их конфигурации, для сравнительного анализа может применяться фрактальное описание. Таким образом, для анализа наноструктуры в данной работе применялся аппарат фрактальной геометрии, который используется для описания и сравнения объектов сложной формы. Значения фрактальной размерности наноструктуры фазовых составляющих сплава сопоставляются с их локальными магнитными характеристиками.

2. Условия эксперимента и обработка результатов

Синтез сплавов осуществлялся методом индукционной плавки в атмосфере аргона, термические обработки выполнялись по режиму [2] в трубчатой трехзонной печи TZF 15/610, оснащенной 8-ми сегментным температурным программатором и вакуумной системой CDK 180+МЗТ. Исследования наноструктуры образцов выполнялись методами контактной атомно-силовой микроскопии на СЗМ Solver P47. Предварительно поверхность шлифов подвергалась электрохимическому травлению в насыщенном растворе хромового ангидрида в ортофосфорной кислоте для визуализации границ «ячеистой» структуры. Анализ наноструктуры, в том числе определение фрактальной размерности выполнен с использованием ПО MountainsSPIP [7]. Применение различных методов для оценки фрактальной размерности наноструктуры позволяет контролировать и верифицировать результаты исследований [8-11]. В данной работе анализ поверхности выполнен средствами фрактальной геометрии с использованием двух альтернативных в достаточной степени апробируемых методов (morphological envelopes [12, 13], enclosing boxes [13]). На рис. 1 а, 2 а представлены 3D-изображения наноструктуры фазовых составляющих *A* и *B* интерметаллида $SmCoCuFeZr$. Визуальный анализ выделяет периодические структуры на поверхности.

Составляющая сплава *A* по интегральному химическому составу

близка стехиометрии $Sm(Co, Cu, Fe)_5$. Ранее в работе [14] было показано, что отожженные образцы сплава $Sm(Co_{0,45}, Cu_{0,4}, Fe_{0,15})_5$ описываются фрактальной размерностью $D_f \sim 2,3$. Это значение соответствовало оптимальной структуре образцов указанного состава для формирования наибольшей коэрцитивной силы. Оценка этого параметра в данной работе для составляющей *A* показала возможность существования структур с фрактальной размерностью несколько выше, чем в работе [14] в диапазоне 2,396–2,475, т.е. также создания умеренно развитого фрактального рельефа. Таким образом, данные полученные для составляющей *A* в целом коррелируют со значениями, полученными для коэрцитивного образца близкого состава.

Наноструктура второй фазовой составляющей гетерогенного сплава *B* обладает более высокой степенью упорядочения и по данным [5] характеризуется более высокой коэрцитивностью, чем *A*. Интегрально стехиометрия *B* близка к $Sm_2(Co, Cu, Fe)_{17}$, характеризуется наличием регулярной наноструктуры и узким интервалом коэрцитивности. Фрактальный анализ этой составляющей показал возможность существования структур с фрактальной размерностью в интервале от 2,452 до 2,508 (на отдельных участках образца встречались области с фрактальной размерностью до 2,577), что выше значений, полученных для составляющей *A*.

Анализ высотной структуры фазовых составляющих *A* и *B* гетерогенного сплава показывает, что для фазовой составляющей *B* характерен более широкий диапазон высот (практически вдвое шире). Это также отражается на характере распределения высот: для составляющей *B* пик высот приходится на диапазон 30–35 нм, в то время как для составляющей *A* – 15 нм; форма распределений также несколько отличается, так межквартильный размах $Q_3 - Q_1$ для составляющей *B*, выше чем для *A* (см. рис. 1 б и 2 б).

Кривая Эббота-Файрстоуна [15-17] (см. рис. 1 в и 2 в) дает возможность более тонко описывать морфологию поверхности, в частности позволяет определять максимальную высоту и глубину исследуемого профиля; иллюстрирует область с уменьшенной высотой пиков и глубиной впадин; позволяет оценивать область с минимальным уклоном. Данная зависимость отображает соотношение исследуемого материала в зависимости от высоты, т.е. соотношение материала – это процент поверхности над заданной высотой (данная характеристика может на качественном уровне описывать «уплотнение образца» по профилю). Данная характеристика может быть полезна для определения функциональных свойств исследуемой поверхности и при оценке степени

деградации поверхности в процессе внешнего воздействия (отжига, механического воздействия, облучения, наличие внешнего поля).

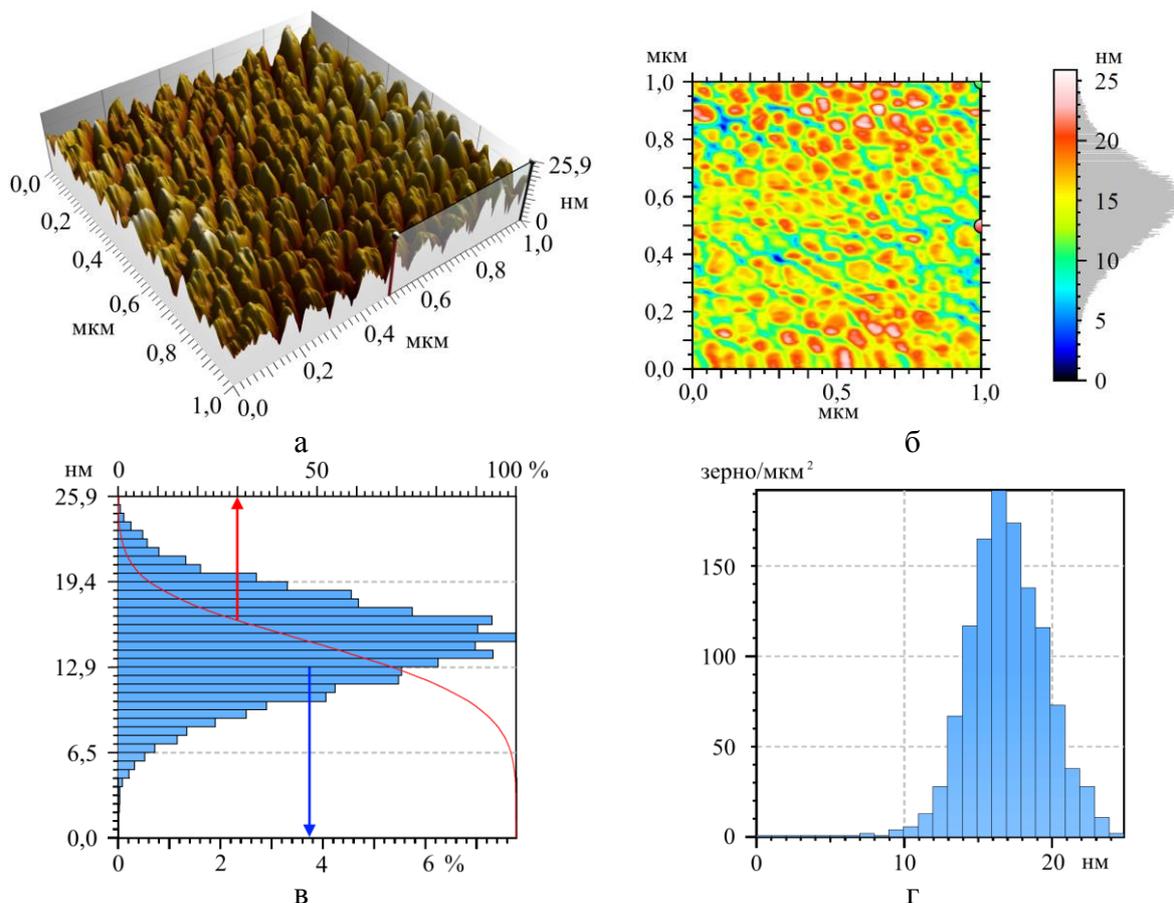


Рис. 1. Поверхность составляющей *A*: а – АСМ-изображение наноструктуры поверхности фазовой составляющей *A* интерметаллида $SmCoCuFeZr$, б – 2D топографическое (вид сверху) АСМ-изображение, положение по оси *Z* определяется цветовой кодировкой в соответствии с цветовой шкалой, отображаемой с правой стороны изображения, в – кривая Эббота-Файрстоуна, г – плотность распределения зерен (агломератов).

Для взаимосвязи структуры и магнитных свойств определённый интерес представляет величина плотности распределения зерен (агломератов). Сравнивая данные рис. 1 г и 2 г можно сделать вывод о том, что для составляющей *A* характерен один максимум распределения плотности в диапазоне 16–17 нм. В целом можно говорить о том, что средняя величина структурных элементов для данного гетерогенного сплава 15–20 нм. Для составляющей *B* ситуация принципиально другая: диапазон изменения плотности шире, распределение содержит три практически равноценных максимума (26–29 нм, 31–35 нм и 37–41 нм). Увеличение плотности зерен (агломератов) очевидно должно изменять и степень развитости рельефа. В данном случае увеличение плотности зерен (агломератов) способствует увеличению и фрактальной размерности. С одной стороны данная корреляция может не всегда отражать реальную

картину, но как одна из характеристик для оценки развитости фрактального рельефа, на наш взгляд, должна обязательно анализироваться. Например, диапазоны размеров, соответствующие невысокой плотности, могут рассматриваться как участки формирования фрактальных структур при технологической обработке поверхности гетерогенного сплава. В тоже время участки, отвечающие высокой плотности зерен (агломератов) могут в большей степени подвергаться деградации рельефа и как следствие приводить к разрушению фрактального рельефа.

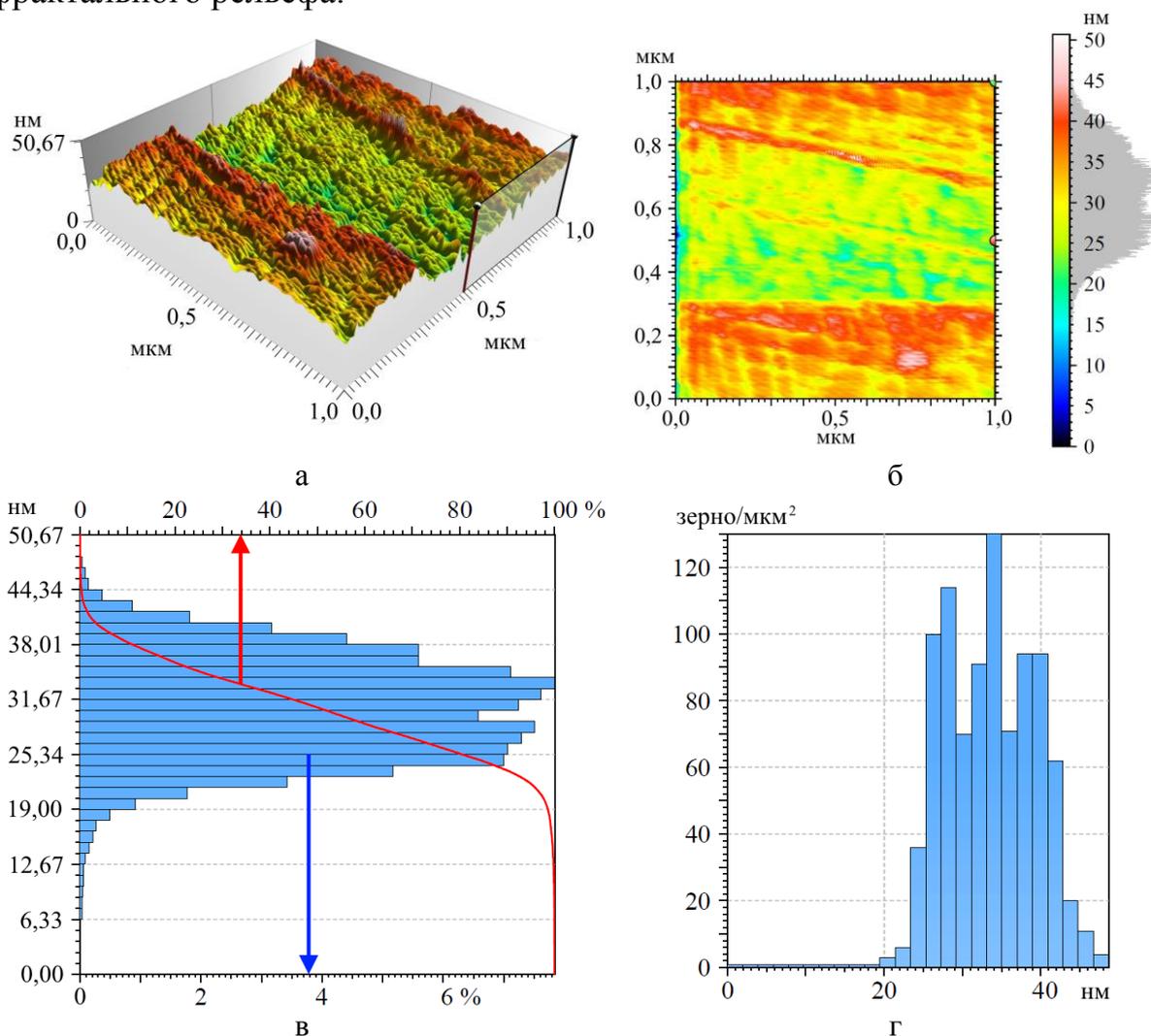


Рис. 2. То же для поверхности составляющей В.

3. Заключение

Коэрцитивная сила образца, а также локальная коэрцитивность составляющих его микроструктуры является структурно-чувствительной характеристикой. Способность задерживать доменные границы в процессе перемагничивания проявляют обе структурные составляющие А и В гетерогенного сплава. Анализ наноструктуры структурных составляющих

сплавов $SmCoCuFeZr$ показал, что фрактальная размерность наноструктуры коррелирует с локальной коэрцитивностью фазовых составляющих. В результате данной работы удалось сопоставить величину фрактальной размерности наноструктуры каждой составляющей с их локальной коэрцитивностью: более высокий диапазон фрактальной размерности соответствует фазовой составляющей с повышенной коэрцитивной силой. Эти данные коррелируют с результатами, полученными в работе [14].

Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения государственного задания в сфере научной деятельности (проект № 0817-2020-0007). Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП Тверского государственного университета.

Библиографический список:

1. **Fidler, G.** High resolution electron study of $Sm(CoCuFeZr)_{7,5}$ magnets / G. Fidler, P. Scalicky, F. Rothwarf // IEEE Transactions on Magnetics. – 1983. – V. 19. – I. 5. – P. 2041-2043. DOI: 10.1109/TMAG.1983.1062752.
2. **Semenova, E.M.** Micro- and nanostructures of $RCoCuFeZr$ heterogeneous alloys with high temperature stability / E.M. Semenova, M.B. Lyakhova, A.I. Ivanova, M.N. Ulyanov // Materials Science Forum. – 2016. – V. 845. – P. 46-49. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.845.46.
3. **Fidler, J.** Recent developments in hard magnetic bulk materials / J. Fidler, T. Schrefl, S. Hoefinger, M. Hajduga // Journal of Physics: Condensed Matter. – 2004. – V. 16. – №. 5. – P. S455-S470. DOI: 10.1088/0953-8984/16/5/007.
4. **Lileev, A.S.** Reversible changes of coercive force in $Sm-Co-Cu-Fe-Zr$ alloy for permanent magnets under cyclic heat treatment / A.S. Lileev, V.V. Pinkas, K.V. Voronchikhina, A.V. Gunbin // Metal Science and Heat Treatment. – 2018. – V. 60. – I. 7-8. – P. 489-493. DOI: 10.1007/s11041-018-0306-2.
5. **Lyakhova, M.B.** High-temperature behavior of hard magnetic alloys $(RZr)(CoCuFe)_z$ ($R = Sm, Gd$) / M.B. Lyakhova, E.M. Semenova, R.P. Ivanov // Metal Science and Heat Treatment. – 2015. – V. 56. – I. 11-12. – P. 602-608. DOI: 10.1007/s11041-015-9807-4.
6. **Ляхова, М.Б.** Влияние наноструктуры на параметры и конфигурацию магнитных доменов сплавов $Sm-Zr-Co-Cu-Fe$ / М.Б. Ляхова, Е.М. Семенова, Н.П. Супонев, Р.П. Иванов, Э.Л. Айриян // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2012. – Вып. 4. – С. 333-338.
7. DigitalSurf. – Режим доступа: [www.url: https://www.digitalsurf.com](http://www.digitalsurf.com). – 15.08.2021.
8. **Иванов, Д.В.** Моделирование процесса формирования фрактальных металлических пленок / Д.В. Иванов, С.А. Васильев, Н.Ю. Сдобняков и др. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2020. – Вып. 12. – С. 424-437. DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.424.
9. **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.
10. **Ivanov, D.V.** Determination of the fractal size of titanium films at different scales / D.V. Ivanov, A.S. Antonov, E.M. Semenova et al. // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – V. 1758. – Art. № 012013. – 6 p. DOI: 10.1088/1742-6596/1758/1/012013.
11. **Антонов, А.С.** Исследование фрактальных свойств наноразмерных пленок золота, серебра и меди: атомно-силовая и туннельная микроскопия / А.С. Антонов, Н.Ю. Сдобняков, Д.В. Иванов и др. // Химическая физика и мезоскопия. – 2017. – Т. 19. – № 3. – С. 473-486.
12. **Țălu, Ș.** Surface morphology of titanium nitride thin films synthesized by DC reactive magnetron sputtering / Ș.Țălu, S. Stach, S. Valedbagi, S.M. Elahi, R. Bavadi // Materials Science-Poland. – 2015. – V. 33. – I. 1. – P. 137-143. DOI: 10.1515/msp-2015-0010.
13. **Mortazavi, S.H.** Synthesis and investigation of silicon carbide nanowires by HFCVD method / S.H. Mortazavi, M. Ghoranneviss, M. Dadashbaba, R. Alipour // Bulletin of Materials Science. – 2016. – V. 39. – I. 4. – P. 953-960. DOI: 10.1007/s12034-016-1183-1.
14. **Semenova, E.M.** A comparative analysis of magnetic properties and microstructure of high coercivity

Sm(CoCuFe)₅, quasi-binary alloys in the framework of fractal geometry / E.M. Semenova, M.B. Lyakhova, Yu.V. Kuznetsova et al. // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2020. – V. 1658. – Art. № 012050. – 6 p. DOI: 10.1088/1742-6596/1658/1/012050.

15. Уайтхауз, Д. Метрология поверхностей. Принципы, промышленные методы и приборы / Д. Уайтхауз; пер. с англ. А.Я. Григорьева, Д.В. Ткачука; под ред. Н.К. Мышкина. – М.: Издательский Дом «Интеллект», 2009. – 472 с.

16. Kubatova, D. Roughness evaluation using Abbott-Firestone curve parameters / D. Kubatova, M. Melichar // *Proceedings of the 30th DAAAM International Symposium*; ed. by B. Katalinic. – Vienna, Austria: DAAAM International Publ., 2019. – P. 0467-0475. DOI: 10.2507/30th.daaam.proceedings.063.

17. Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Профильный метод. Термины, определения и параметры структуры поверхности: ГОСТ Р ИСО 4287-2014; введ. 01.01.2016. – М.: Стандартинформ, 2014. – 20 с.

References:

1. Fidler G., Scalicky P., Rothwarf F. High resolution electron study of *Sm(CoCuFeZr)_{7,5}* magnets, *IEEE Transactions on Magnetics*, 1983, vol. 19, issue 5, pp. 2041-2043. DOI: 10.1109/TMAG.1983.1062752.

2. Semenova E.M., Lyakhova M.B., Ivanova A.I., Ulyanov M.N. Micro- and nanostructures of *RCoCuFeZr* heterogeneous alloys with high temperature stability, *Materials Science Forum*, 2016, vol. 845, pp. 46-49. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.845.46.

3. Fidler J., Schrefl T., Hoefinger S., Hajduga M. Recent developments in hard magnetic bulk materials, *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2004, vol. 16, no. 5, pp. S455-S470. DOI: 10.1088/0953-8984/16/5/007.

4. Lileev A.S., Pinkas V.V., Voronchikhina K.V., Gunbin A.V. Reversible changes of coercive force in *Sm-Co-Cu-Fe-Zr* alloy for permanent magnets under cyclic heat treatment, *Metal Science and Heat Treatment*, 2018, vol. 60, issue 7-8, pp. 489-493. DOI: 10.1007/s11041-018-0306-2.

5. Lyakhova M.B., Semenova E.M., Ivanov R.P. High-temperature behavior of hard magnetic alloys (*RZr*)(*CoCuFe*)_z (*R = Sm, Gd*), *Metal Science and Heat Treatment*, 2015, vol. 56, issue 11-12, pp. 602-608. DOI: 10.1007/s11041-015-9807-4.

6. Lyakhova M.B., Semenova E.M., Suponev N.P., Ivanov R.P., Ayriyan E.L. Vliyanie nanostrukturnykh parametrov i konfiguratsiy magnitnykh domenov splavov *Sm-Zr-Co-Cu-Fe* [Effect of nanostructure on parameters and configuration of *Sm-Zr-Co-Cu-Fe* alloys magnetic domains], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2012, issue 4, pp. 333-338. (In Russian).

7. DigitalSurf. Available at: [www.url: https://www.digitalsurf.com](http://www.digitalsurf.com) (accessed 15.08.2021).

8. Ivanov D.V., Vasilyev S.A., Sdobnyakov N.Yu. et al. Modelirovanie protsessy formirovaniya fraktal'nykh metallicheskih plenok [Simulation of the fractal metal films formation], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2020, issue 12, pp. 424-437. DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.424. (In Russian).

9. Sdobnyakov N.Yu., Antonov A.S., Ivanov D.V. *Morfologicheskie kharakteristiki i fraktal'nyy analiz metallicheskih plenok na dielektricheskikh poverkhnostyakh: monografiya* [Morphological characteristics and fractal analysis of metal films on dielectric substrates: monography]. Tver, Tver State University Publ., 2019, 168 p. (In Russian).

10. Ivanov D.V., Antonov A.S., Semenova E.M. et al. Determination of the fractal size of titanium films at different scales, *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1758, art. no. 012013, 6 p. DOI: 10.1088/1742-6596/1758/1/012013.

11. Antonov A.S., Sdobnyakov N.Yu., Ivanov D.V. et al. Issledovanie fraktal'nykh svoystv nanorazmernykh plenok zolota, serebra i medi: atomno-silovaya i tunnel'naya mikroskopiya [Investigation of fractal properties of nanosized gold, silver and copper films: atomic force and tunnelling microscopy], *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya [Chemical Physics and Mesoscopy]*, 2017, vol. 19, no. 3, pp. 473-486. (In Russian).

12. Ţălu Ş., Stach S., Valedbagi S., Elahi S.M., Bavadi R. Surface morphology of titanium nitride thin films synthesized by DC reactive magnetron sputtering, *Materials Science-Poland*, 2015, vol. 33, issue 1, pp. 137-143. DOI: 10.1515/msp-2015-0010.

13. Mortazavi S.H., Ghoranneviss M., Dadashbaba M., Alipour R. Synthesis and investigation of silicon carbide nanowires by HFCVD method, *Bulletin of Materials Science*, 2016, vol. 39, issue 4, pp. 953-960. DOI: 10.1007/s12034-016-1183-1.

14. Semenova E.M., Lyakhova M.B., Kuznetsova Yu.V. et al. A comparative analysis of magnetic properties

and microstructure of high coercivity $Sm(CoCuFe)_5$ quasi-binary alloys in the framework of fractal geometry, *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1658, art. no. 012050, 6 p. DOI: 10.1088/1742-6596/1658/1/012050.

15. Whitehouse D. *Surfaces and their measurement*. Oxford, Butterworth-Heinemann, 2004, 432 p.

16. Kubatova D., Melichar M. Roughness evaluation using Abbott-Firestone curve parameters, *Proceedings of the 30th DAAAM International Symposium*, ed. by B. Katalinic. Vienna, Austria, DAAAM International Publ., 2019, pp. 0467-0475. DOI: 10.2507/30th.daaam.proceedings.063.

17. GOST R ISO 4287-2014. *Geometricheskie kharakteristiki izdelij (GPS). Struktura poverkhnosti. Profil'nyj metod. Terminy, opredeleniya i parametry struktury poverkhnosti* [Russian State Standard ISO 4287-2014 Geometrical Product Specifications (GPS). Surface texture. Profile method. Terms, definitions and surface texture parameters]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 20 p. (In Russian).

Original paper

FRACTAL ANALYSIS OF THE NANOSTRUCTURE OF A HETEROGENEOUS HIGH COERCIVITY ALLOY

E.M. Semenova¹, M.B. Lyakhova¹, D.V. Ivanov¹, A.I. Sinkevich¹, A.S. Antonov^{1,2}, N.Yu. Sdobnyakov¹

¹*Tver State University, Tver, Russia*

²*Tver State Agricultural Academy, Tver, Russia*

DOI: 10.26456/pcascnn/2021.13.368

Abstract: The atomic force microscopy was used to obtain images of the nanostructure of components of a heterogeneous intermetallic $SmCoCuFeZr$ compound in a highly coercive state. At the microlevel, two types of regions were distinguished in the alloys, differing in integral elemental composition and coercivity intervals. Based on the atomic force microscopy data, an analysis of the fractal characteristics of the surface is carried out on both of the above types of areas. It is shown that the fractal dimension of the nanostructure correlates with the local coercivity of the phase components. The phase component with a relatively low coercivity demonstrates the possibility of the existence of structures with fractal dimensions in the 2,396–2,475 range corresponding to a moderately developed fractal relief. In this case, the high-coercive component with a regular nanostructure is characterized by a higher fractal dimension of 2,452–2,508, and in some areas of the sample there were regions with a fractal dimension up to the value of 2,577.

Keywords: atomic force microscopy, nanorelief, nanostructure, surface morphology, coercivity, 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 4 года обучения кафедры общей физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Синкевич Артем Игоревич – аспирант 1 года обучения 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, Condensed Matter Physic Department, Tver State University

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

Artem I. Sinkevich – 1st year postgraduate student, Condensed Matter Physic Department, Tver State University

Dmitry V. Ivanov – 4th year postgraduate student, General Physics 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, General Physics Department, Tver State University

Поступила в редакцию/received: 15.08.2021; после рецензирования/reviced: 19.09.2021; принята/accepted 21.11.2021.