

УДК 537.624

ФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МАГНИТООПТИЧЕСКОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ ПОСТОЯННОГО МАГНИТА В ИМПУЛЬСНОМ ПОЛЕ

© 2023 г. А. Д. Зигерт¹, Н. Б. Кузьмин¹, Н. Ю. Сдобняков¹, *,
А. И. Иванова¹, Г. Г. Дунаева¹, Е. М. Семенова¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Тверской государственный университет”, Тверь, Россия

*E-mail: nsdobnyakov@mail.ru

Поступила в редакцию 20.04.2023 г.

После доработки 22.05.2023 г.

Принята к публикации 28.06.2023 г.

Представлены результаты фрактального анализа изображений поверхности постоянного магнита КС37, полученных методом полярного эффекта Керра с помощью индикаторной висмутосодержащей феррит-гранатовой пленки после перемагничивания импульсным полем 0.1–1.5 Тл. Полученные зависимости остаточной намагниченности от величины внешнего импульсного поля сопоставляются с фрактальной размерностью магнитооптических изображений поверхности магнита после воздействия импульсного поля. Показано, что максимальное значение фрактальной размерности соответствует размагниченному состоянию магнита.

DOI: 10.31857/S0367676523702423, EDN: GWVHLK

ВВЕДЕНИЕ

Перемагничивание постоянных магнитов происходит по петле гистерезиса, параметры которой (намагниченность насыщения, остаточная намагниченность и коэрцитивная сила) являются важнейшими критериями для применения магнитов в устройствах автоматики, электротехники и электроники [1–3]. Существует ряд аттестованных методик измерения полевых зависимостей намагниченности $M(H)$ образцов, позволяющих получить их интегральные гистерезисные характеристики [4, 5]. Однако не менее важным является независимый анализ перемагничивания их поверхности, поскольку отдельные процессы как препятствующие, так и способствующие перемагничиванию протекают именно на поверхности, а также на границах структурных элементов (зерен и/или фаз).

Исследование перемагничивания поверхности ферромагнитного монокристалла или отдельного зерна сплава может быть осуществлено на основе наблюдений трансформации их магнитной доменной структуры (ДС) во внешнем магнитном поле [6–8]. В случае же спеченного постоянного магнита, образованного множеством зерен, такой подход требует огромной статистики, так как поведение ДС одного или нескольких зерен постоянного магнита может не отражать поведение системы в целом. Для изучения магнитного состояния поверхности магнетика можно задействовать индикаторную пленку феррита-граната, которая позволяет визуализировать магнитные поля рассеяния объекта, по-

мещенного над ней. Этот способ позволяет магнитооптическими методами регистрировать поля рассеяния всего образца или его части в окрестности контакта с пленкой. Градиенты полей рассеяния ДС и неоднородно намагниченных структурных составляющих визуализируются пленкой как области, различающиеся по контрасту, при этом регистрируется компонента намагниченности, перпендикулярная ее плоскости, так как пленка одноосная.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА И ЭКСПЕРИМЕНТ

В настоящем исследовании приводятся результаты эксперимента по воздействию на постоянный магнит импульсным полем (ИП) разной величины и знака с последующей визуализацией полей рассеяния магнита в состоянии остаточной намагниченности индикаторной пленкой методом полярного эффекта Керра. Анализ изображений, полученных с использованием металлографического микроскопа МИМ-8М и цифровой камеры Levenhuk M800 PLUS, позволяет оценить относительную остаточную намагниченность образца.

В качестве объекта исследования использовался постоянный магнит марки КС-37 (Sm–Co), линейные размеры которого составляли $1 \times 1.7 \times 0.5$ мм. Магнит помещали на индикаторную одноосную висмутосодержащую феррит-гранатовую (Vi:ФГ) пленку таким образом, чтобы его ось текстуры была перпендикулярна плоскости пленки. Эту систему подвергали воздействию импульсного поля, после чего

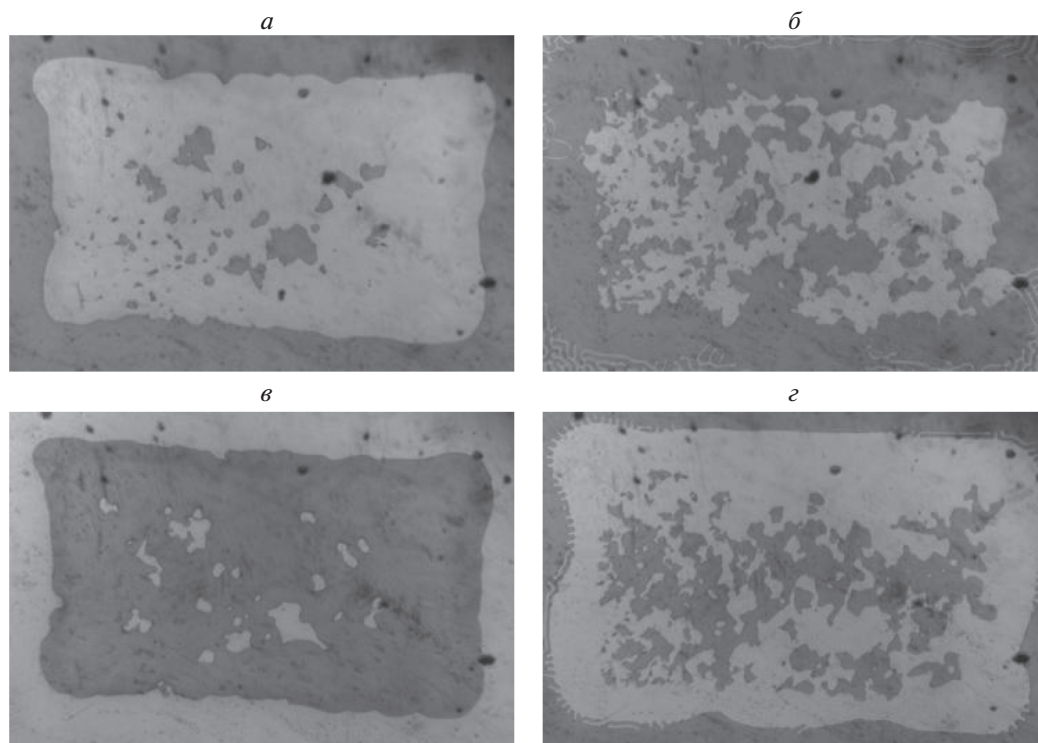


Рис. 1. Микрофотографии постоянного магнита КС-37 на Vi:ФГ пленке, полученные при различных значениях импульса магнитного поля, указанных на рис. 2. Линейные размеры базисной плоскости магнита 1×1.7 мм.

регистрировали поля рассеяния, визуализированные с помощью индикаторной пленки. Собственная лабиринтная ДС пленки не вносит существенного вклада в изображения, так как ее поверхность полностью намагничивается в поле магнита. В качестве источника импульсного поля использовался двойной соленоид (длительность импульса 40 мкс).

На рис. 1 представлены изображения полей рассеяния базисной плоскости магнита КС-37, полученные средствами магнитооптики на поверхности индикаторной Vi:ФГ пленки после воздействия импульсным полем в диапазоне от 0.1 до 1.5 Тл обеих полярностей. На снимках поверхности, полученных после максимального импульса (рис. 1а и 1в), четко видна граница магнита, что позволило определить область индикаторной пленки, относящуюся к образцу, и исключить участки снимка за его границей. Видно, что после воздействия импульсного поля, когда образец находится в состоянии остаточной намагниченности, на изображениях присутствуют области противоположного контраста.

На рис. 1а и 1в показаны снимки поверхности индикаторной пленки после двух импульсов одной и той же величины, но противоположного знака. По контрасту изображений видно, что после импульса 1.5 Тл в центре поверхности соприкосновения с пленкой присутствуют области обратного контраста. Это можно объяснить тем, что часть зерен магнита в остаточном состоянии име-

ют составляющую намагниченности, перпендикулярную плоскости пленки и обратную по отношению к намагниченности основного объема магнита. Определив относительное содержание областей противоположного контраста в поле зрения поверхности образца, можно оценить величину относительной намагниченности, считая за состояние полного насыщения состояние, когда на изображении отсутствуют области противоположного контраста.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1б и 1г представлены изображения, полученные после воздействия обратного импульсного поля 0.5 Тл. По сравнению с магнитооптическими изображениями, полученными после 1.5 Тл, количество областей обратного знака возрастает и при этом они имеют дискретную структуру, которую трудно описать какой-то определенной геометрией. На основании магнитооптических изображений, полученных после последовательного воздействия импульсного поля на магнит, размещенный на пленке, был построен график полевой зависимости остаточной намагниченности (рис. 2) в относительных единицах по вертикальной оси. На горизонтальной оси — величина импульсного поля, после воздействия которого определялась остаточная намагниченность. График, представленный на рис. 2а, имеет форму петли гистерезиса, где состояние насыщения

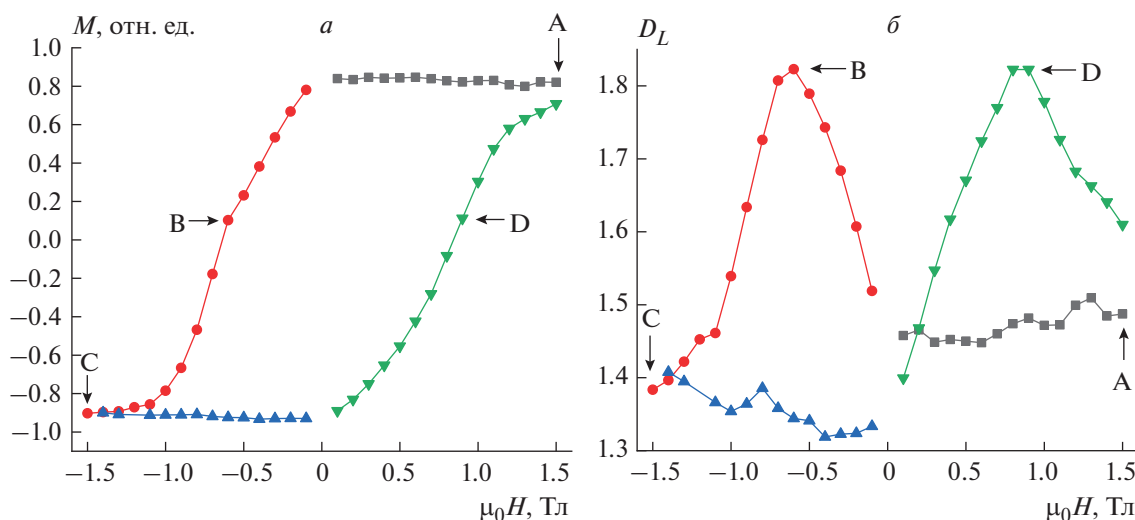


Рис. 2. Зависимость остаточной относительной намагниченности $M(H)$ (а) и ФР $D_L(H)$ (б) от внешнего импульсного МП. Цветовое обозначение соответствует следующему изменению внешнего импульсного магнитного поля: $\blacksquare$ — $H_{\max} \rightarrow 0$; $\bullet$ — $0 \rightarrow H_{\min}$; $\blacktriangle$ — $H_{\min} \rightarrow 0$; $\blacktriangledown$ — $0 \rightarrow H_{\max}$.

(участки А и С) соответствует остаточной намагниченности после воздействия импульсного поля максимальной величины. Последовательное воздействие обратным, возрастающим по величине импульсным полем, приводит к уменьшению значения остаточной намагниченности (участки В и D).

Анализ полученных магнитооптических изображений был выполнен также с применением инструментов фрактальной геометрии. Этот метод эффективен, когда рассматривается поведение системы в изменяющихся условиях на основе анализа сложных изображений [9–14]. В данной работе фрактальная размерность (ФР) определялась с использованием ПО [15]. На рис. 2б представлена полевая зависимость ФР $D_L(H)$ магнитооптических изображений полей рассеяния магнита, зарегистрированных с помощью индикаторной Ви:ФГ пленки после воздействия импульсным полем H в диапазоне от 0.1 до 1.5 Тл.

График зависимости $D_L(H)$ демонстрирует неоднозначную зависимость величины ФР от импульсного поля H при его циклическом изменении. Функция $D_L(H)$ характеризуется экстремумами со значениями ФР равными 1.82, соответствующими размагниченному состоянию образца по обеим ветвям петли гистерезиса (см. рис. 2а). Минимальное значение ФР составляет 1.32 и соответствует горизонтальным участкам на графике рис. 2а, т.е. состоянию предельной остаточной намагниченности после воздействия импульсным полем. Следует отметить, что экстремальные участки зависимости $D_L(H)$, соответствующие правой и левой ветвям петли гистерезиса на рис. 2а, являются симметричными относительно вертикальной оси значений (рис. 2б). Это свидетельствует о том, что несмотря на то, что изображения, полученные магнитооптическим методом

после воздействия положительным или отрицательным импульсным полем на одном и том же участке различаются, их ФР близки по величине и демонстрируют идентичное поведение при воздействии как возрастающим, так и убывающим ИП. Таким образом ФР, полученная на основе магнитооптических изображений полей рассеяния постоянного магнита после воздействия импульсным полем, отражает процессы его перемагничивания, демонстрируя гистерезис. Следовательно, наблюдается соответствие между магнитным состоянием магнитного материала (остаточной намагниченностью) и фрактальной размерностью его магнитооптических изображений, полученных с помощью индикаторной Ви:ФГ пленки.

Необходимо отметить, что изображения поверхности магнита, полученные с помощью Ви:ФГ индикаторной пленки не могут быть идентифицированы как доменная структура поверхности его зерен. На рис. 3 представлено изображение доменной структуры, выявленное на металлографическом микроскопе Neophot-30 (Zeiss) методом полярного эффекта Керра. Магнитооптический контраст на поверхности металлографического шлифа базисной плоскости магнита после размагничивания обратным полем демонстрирует два типа зерен: 1) размагниченные или частично размагниченные с ДС близкой к лабиринтной и 2) зерна, в которых отсутствует доменный контраст, так как они остаются в намагниченном состоянии (рис. 3). Средняя ширина доменов на рис. 3 составляет 8 мкм, а области контраста, выявленные с помощью индикаторной пленки (рис. 1), имеют характерный размер порядка 40 мкм, что сопоставимо со средним размером зерен магнита. Таким образом, представленный выше метод описания состояния остаточной намагниченности образца КС37 с применением инстру-

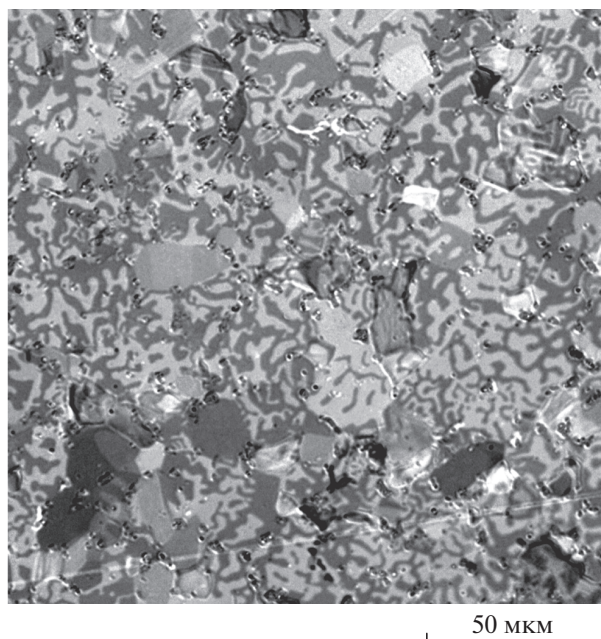


Рис. 3. Доменная структура, выявленная на базисной плоскости постоянного магнита КС37 после размагничивания обратным полем. Изображение получено методом полярного эффекта Керра.

ментов фрактальной геометрии использует магнитооптические изображения, являющиеся визуализацией магнитного состояния зерен и их конгломератов после воздействия ИП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Фрактальный подход был применен для анализа изображений базисной поверхности постоянного магнита КС37, полученных с помощью индикаторной пленки Вi:ФГ после воздействия перемагничивания импульсным полем 0.1–1.5 Тл. Показано, что полученные зависимости остаточной намагниченности от величины внешнего импульсного поля коррелируют с поведением фрактальной размерности соответствующих магнито-

оптических изображений, что указывает на то, что имеется взаимосвязь между магнитным состоянием магнитного материала (остаточной намагниченностью) и фрактальной размерностью его магнитооптических изображений, полученных с помощью индикаторной Вi:ФГ пленки.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках выполнения государственного задания в сфере научной деятельности (проект № 0817-2023-0006).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Coey M.H. // *Engineering*. 2020. V. 6. No. 2. P. 119.
2. Gutfleisch O., Willard M.A., Brück E. et al. // *Adv. Mater.* 2011. V. 23. No. 7. P. 821.
3. Wu C., Jin J. *Frontiers in magnetic materials: from principles to material design and practical applications*. CRC Press, 2022. 290 p.
4. Fiorillo F. // *Metrologia*. 2010. V. 47. No. 2. Art. No. S114.
5. Franco V., Dodrill B. *Magnetic measurement techniques for materials characterization*. Springer, 2021. 820 p.
6. Hubert A., Schaefer R. *Magnetic domains: analysis of magnetic microstructures*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1998. 686 p.
7. Karpenkov A., Skokov K.P., Dunaeva G. et al. // *J. Physics D*. 2022. V. 55. No. 45. Art. No. 455002.
8. Иванов В.Е., Лепаловский В.Н. // *Письма в ЖТФ*. 2022. Т. 48. № 13. С. 20;
9. Лисовский Ф.И., Лукашенко Л.И., Мансветова Е.Г. // *Письма в ЖЭТФ*. 2004. Т. 79. № 7. С. 432; Lisovskii F.V., Lukashenko L.I., Mansvetova E.G. // *JETP Lett.* 2004. V. 79. No. 7. P. 352.
10. Зигерт А.Д., Дунаева Г.Г., Сдобняков Н.Ю. // *Физ.-хим. асп. изуч. класт. наностр. и наномат.* 2021. № 13. С. 134.
11. Семенова Е.М., Иванов Д.В., Ляхова М.Б. и др. // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2021. Т. 85. № 9. С. 1245; Semenova E.M., Ivanov D.V., Lyakhova M.B. et al. // *Bull. Russ. Acad. Sci. Ser. Phys.* 2021. V. 85. No. 9. P. 955.
12. Attané J.P., Tissier M., Marty A., Vila L. // *Phys. Rev. B*. 2010. V. 82. No. 2. Art. No. 024408.
13. Semenova E.M., Lyakhova M.B., Kuznetsova Yu.V. et al. // *J. Phys. Conf. Ser.* 2020. V. 1658. Art. No. 012050.
14. Zigert A.D., Dunaeva G.G., Semenova E.M. et al. // *J. Supercond. Nov. Magn.* 2022. V. 35. No. 8. P. 2187.
15. <http://gwyddion.net>.

Fractal analysis of magneto-optical visualization of the remagnetization of a permanent magnet in a pulsed field

A. D. Zigert^a, N. B. Kuz'min^a, N. Yu. Sdobnyakov^{a, *}, A. I. Ivanova^a,
G. G. Dunaeva^a, E. M. Semenova^a

^aTver State University, Tver, 170002 Russia

*e-mail: nsdobnyakov@mail.ru

The results of fractal analysis of images of the surface of a permanent magnet KS37, obtained by the method of the polar Kerr effect using an indicator bismuth-containing ferrite-garnet film after magnetization reversal by a pulsed field of 0.1–1.5 T, are presented. The obtained dependences of the residual magnetization on the magnitude of the external pulsed field are compared with the fractal dimension of the magneto-optical images of the magnet surface after exposure to the pulsed field. It is shown that the maximum value of the fractal dimension corresponds to the demagnetized state of the magnet.