

Научная статья

УДК 621.318:621.373.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-10-174-184

**ЛАЗЕРНАЯ ПЕЧАТЬ МАГНИТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ
НА МИКРОМАГНИТАХ (PrDy)(FeCo)B**

Е.В. Дворецкая^{1,2}, М.В. Бахметьев¹, А.О. Колмаков¹, Р.А. Валеев²,
А.В. Бузенков², В.П. Пискорский², Р.Б. Моргунов^{1,2}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН, Черноголовка, Московская обл., Россия; office@icp.ac.ru

²Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Исследованы структура, химический состав и магнитные свойства микропроводов (PrDy)(FeCo)B после вакуумного отжига и локального лазерного облучения. Показано, что лазерное воздействие вызывает локальное изменение состава аморфного микропровода, включая уменьшение содержания редкоземельных элементов в зоне облучения, тогда как в поликристаллическом состоянии состав практически не меняется. Вакуумный отжиг приводит к кристаллизации материала и переходу из магнетомягкого в магнитотвердое состояние с увеличением коэрцитивной силы и магнитной анизотропии.

Ключевые слова: 3D-печать, аддитивные технологии, микромагниты, редкоземельные сплавы, переходные металлы, магнитный гистерезис

Для цитирования: Дворецкая Е.В., Бахметьев М.В., Колмаков А.О., Валеев Р.А., Бузенков А.В., Пискорский В.П., Моргунов Р.Б. Лазерная печать магнитных изображений на микромагнитах (PrDy)(FeCo)B // Труды ВИАМ. 2026. № 10 (164). С. 174–184. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-10-174-184.

Scientific article

**LASER PRINTING OF MAGNETIC IMAGES
ON (PrDy)(FeCo)B MICROMAGNETS**

E.V. Dvoretzskaya^{1,2}, M.V. Bakhmetyev¹, A.O. Kolmakov¹, R.A. Valeev²,
A.V. Buzenkov², V.P. Piskorsky², R.B. Morgunov^{1,2}

¹Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry RAS, Chernogolovka, Moscow region, Russia; office@icp.ac.ru

²Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The structure, chemical composition, and magnetic properties of (PrDy)(FeCo)B microwires were studied after vacuum annealing and localized laser irradiation. It was shown that laser irradiation of amorphous microwires causes localized changes in composition, including a decrease in the rare-earth element content in the irradiated zone, whereas in the polycrystalline state, the composition remains virtually unchanged. Vacuum annealing leads to crystallization of the material and transition from a magnetically soft to a magnetically hard state with an increase in coercivity and magnetic anisotropy.

Keywords: 3D printing, additive manufacturing, micromagnets, rare-earth alloys, transition metals, magnetic hysteresis

For citation: Dvoretzkaya E.V., Bakhmetyev M.V., Kolmakov A.O., Valeev R.A., Buzenkov A.V., Piskorsky V.P., Morgunov R.B. Laser printing of magnetic images on (PrDy)(FeCo)B micromagnets. *Trudy VIAM*, 2026, no. 10 (164), pp. 174–184. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-10-174-184.

Введение

Значительный практический интерес представляет изготовление микромагнитов с заданным распределением намагниченности в продольном направлении. Это способствует разработке устройств магнитного неразрушающего контроля, обработки сигналов и оптической записи магнитной информации [1–3], а также микроэлектромеханических систем (Micro-Electro-Mechanical Systems). Такие системы представляют собой миниатюрные устройства, объединяющие механические элементы, сенсоры, микроактуаторы и электронные схемы на одном микрочипе [4, 5]. Материалами для таких устройств могут служить сплавы редкоземельных и переходных металлов, которые занимают ключевое место в современной микроэлектромеханике благодаря сочетанию высокой коэрцитивной силы, значительной магнитокристаллической анизотропии и температурной стабильности [6]. Особый интерес вызывают микропровода, позволяющие реализовывать локализованные магнитные состояния и создавать материалы с заданными функциональными характеристиками [7–11].

Среди перспективных материалов выделяются системы (PrDy)(FeCo)B, в которых редкоземельные элементы Pr и Dy обеспечивают высокий уровень магнитокристаллической анизотропии и коэрцитивной силы, тогда как переходные металлы Fe и Co формируют высокий магнитный момент [12]. В зависимости от условий получения такие микропровода могут находиться как в аморфном, так и в поликристаллическом состоянии. Аморфная структура характеризуется сниженной коэрцитивной силой и изотропной намагниченностью, тогда как термическая обработка приводит к кристаллизации и формированию магнитотвердой фазы с магнитной анизотропией [13–15].

Перспективным инструментом локального управления структурой и магнитными характеристиками материала является лазерное облучение [16, 17]. Импульсное лазерное воздействие позволяет реализовать локальное плавление, испарение, а также быстрые нагрев и охлаждение материала, создавая области с измененной морфологией и модифицированными магнитными свойствами. При этом локальное плавление может приводить к перераспределению химических элементов, особенно редкоземельных компонентов, отличающихся высокой химической активностью и чувствительностью к термическому воздействию [16]. Программируемое сканирование лазером поверхности изделия допускает 3D-печать магнитных состояний и запись пикселя памяти в отдельной области. В связи с этой возможностью аддитивных технологий возникает задача совершенствования химической, структурной и магнитной стабильности материала, модифицированного лазерным облучением, а также исследования изменений морфологии, распределения химических элементов и магнитных свойств в локальных областях, подвергнутых лазерному облучению.

Цель работы – анализ последствий локального лазерного облучения и вакуумного отжига и их влияния на морфологию, химический состав и магнитные свойства микропроводов (PrDy)(FeCo)B, а также выявление связи лазерно-индуцированного изменения коэрцитивной силы и магнитной анизотропии со структурным состоянием материала и геометрическими параметрами поверхности микропровода.

Материалы и методы

Аморфные микропровода (PrDy)(FeCo)B (рис. 1) получали методом экстракции капли расплава от нагретой электронным пучком поверхности спеченного магнита. Торцевую поверхность спеченного магнита после оплавления и формирования капли захватывали выступом на вращающемся со скоростью ≤ 60 м/с латунном цилиндре с водяным охлаждением. При тепловом контакте расплава с цилиндром скорость охлаждения не превышала 10^6 К/с. Полученные микропровода (PrDy)(FeCo)B имели полуцилиндрическую форму (рис. 1, в), диаметр до 80 мкм и длину до 150 мкм. Для формирования поликристаллической структуры микропровода подвергали вакуумному отжигу при давлении 10^{-5} Торр (133,3 Па) и температуре 700 °С в течение 2 ч. На рис. 1, б приведено изображение торца микропровода (PrDy)(FeCo)B после вакуумного отжига, полученное методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ).

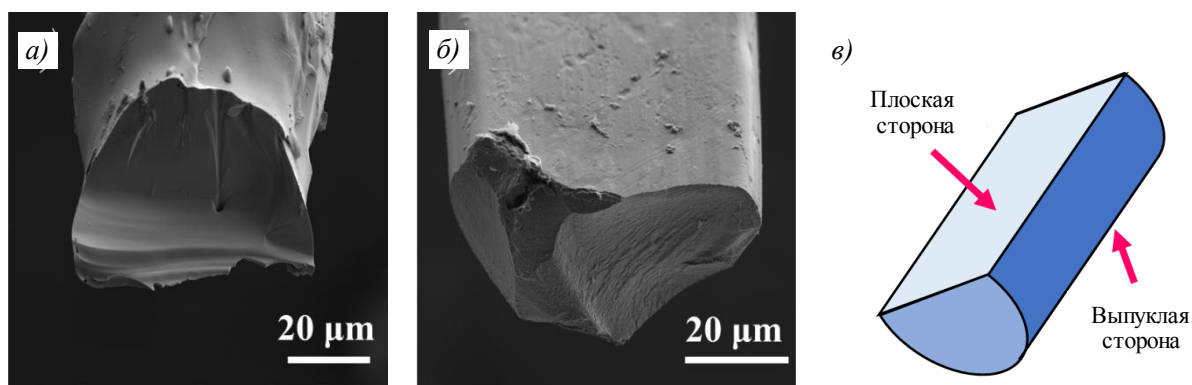


Рис. 1. СЭМ-изображения торца микропровода (PrDy)(FeCo)B до (а) и после (б) вакуумного отжига, модель микропровода (PrDy)(FeCo)B (в)

Локальное лазерное воздействие позволяет формировать контролируемую периодическую магнитную структуру на поверхности микропроводов (PrDy)(FeCo)B [16]. В ходе экспериментальных работ на плоскую и выпуклую стороны (рис. 1, в) аморфных и поликристаллических микропроводов (PrDy)(FeCo)B нанесены периодические лазерные метки перпендикулярно главной оси микропровода с помощью иттербиевого импульсного волоконного лазера со следующими параметрами: длина волны >1000 нм, скорость движения лазерного луча ≥ 200 мм/с, мощность лазерного импульса ≥ 15 Вт, частота следования импульсов ≥ 20 кГц, диаметр лазерного луча ≤ 15 мкм.

Получение электронных изображений, энергодисперсионную рентгеновскую спектроскопию (Energy Dispersive X-Ray (EDX)) и элементное картирование проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа.

Исследование продольного эффекта Керра и регистрация локальных петель магнитного гистерезиса выполнены с применением микроскопа.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ и ЦКП ФИЦ проблем химической физики и медицинской химии РАН.

Результаты и обсуждение

На рис. 2 и 3 представлены СЭМ-изображения микропроводов (PrDy)(FeCo)B с лазерным облучением до и после вакуумного отжига и соответствующие энергодисперсионные рентгеновские спектры, полученные в различных областях поверхности.

Поверхность микропроводов (PrDy)(FeCo)В до и после вакуумного отжига однородная, локальное оплавление и изменение рельефа поверхности наблюдаются только в области лазерной метки (рис. 2, а и 3, а).

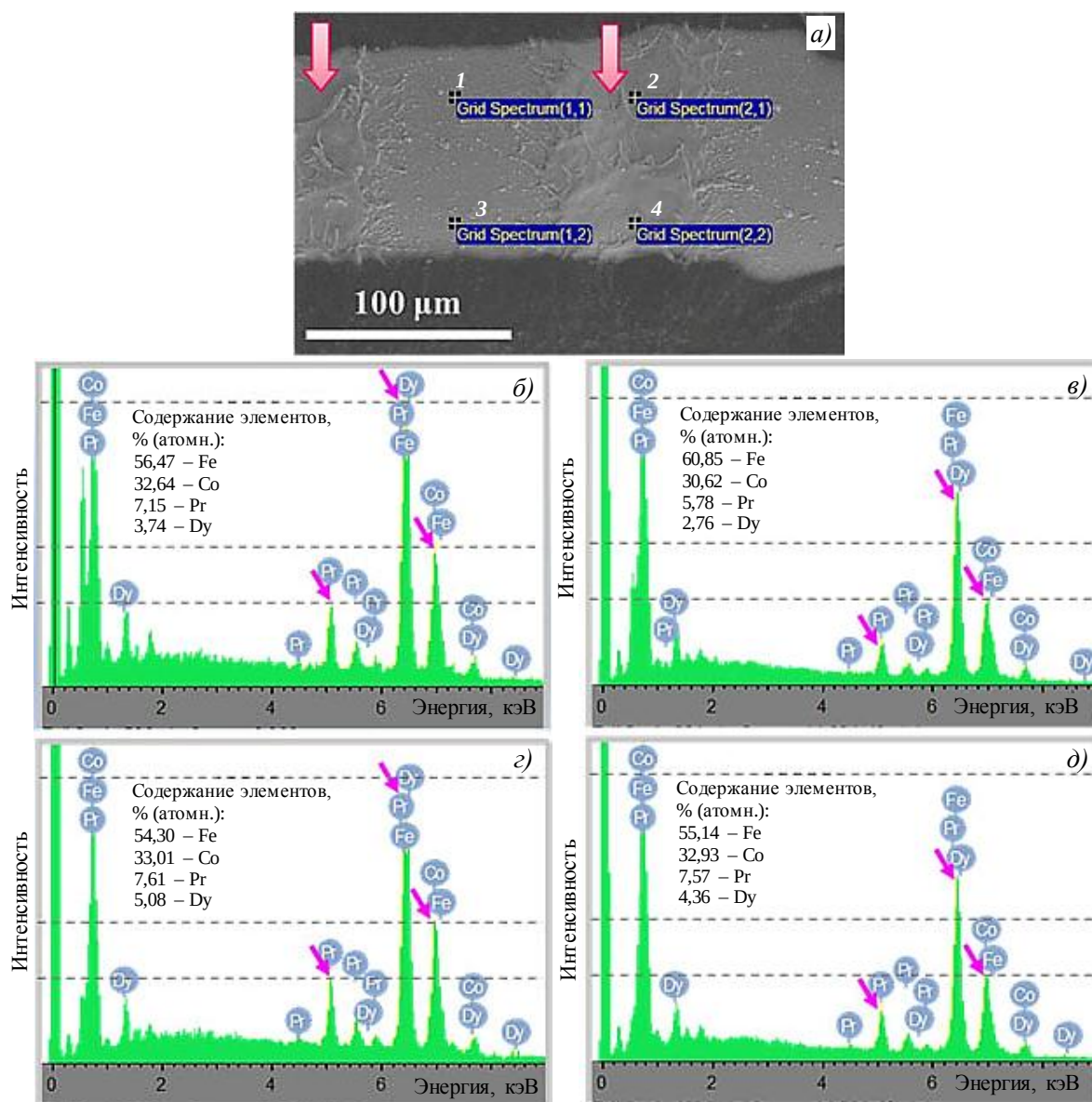


Рис. 2. СЭМ-изображение (а) аморфного микропровода (PrDy)(FeCo)В до вакуумного отжига с нанесенными локальными лазерными метками (показаны красными стрелками); EDX-спектры, полученные в областях без лазерной метки (б, г) и в зонах лазерного воздействия (в, д), розовыми стрелками показаны пики с наиболее изменившейся амплитудой. Области 1–4 соответствуют EDX-спектрам на позициях б–д

В аморфном микропроводе (PrDy)(FeCo)В до вакуумного отжига в области без лазерной метки наблюдается хорошая воспроизводимость формы и относительной интенсивности энергодисперсионных спектров (рис. 2, б, г), что указывает на химическую однородность. В области локальной лазерной метки (рис. 2, в, д) выявлены относительное увеличение интенсивности пиков железа, незначительное изменение вкладов кобальта и снижение интенсивности пиков празеодима и диспрозия, что может

свидетельствовать о неоднородности лазерного воздействия. При этом редкоземельные элементы Pr и Dy обладают большей склонностью к испарению и более высокой диффузионной подвижностью при локальном перегреве, что может вызывать относительное уменьшение их концентрации в зоне лазерной метки [14]. Таким образом, лазерное воздействие на поверхность аморфного микропровода (PrDy)(FeCo)В вызывает химические и морфологические изменения.

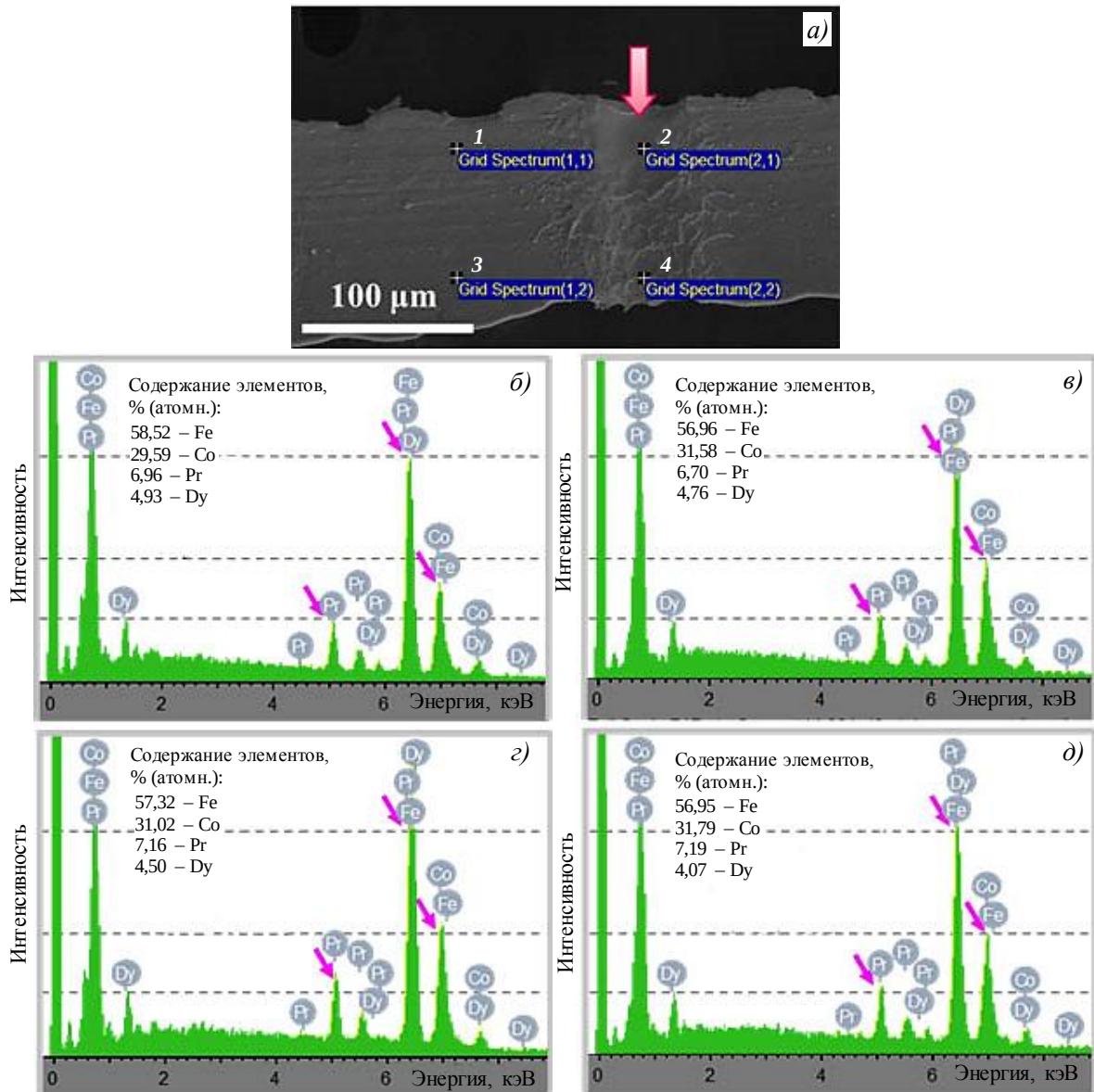


Рис. 3. СЭМ-изображение (а) поликристаллического микропровода (PrDy)(FeCo)В после вакуумного отжига с нанесенной локальной лазерной меткой (показана красной стрелкой); EDX-спектры, полученные в области без лазерной метки (б, г) и в зоне лазерного воздействия (в, д), розовыми стрелками показаны те же пики, что и на рис. 2, б–д. Области 1–4 соответствуют EDX-спектрам на позициях б–д

В поликристаллическом микропроводе (PrDy)(FeCo)В после вакуумного отжига в области без лазерной метки энергодисперсионные спектры демонстрируют хорошую воспроизводимость (рис. 3, б, г) с интенсивными пиками железа и кобальта (основная матрица) и стабильными сигналами празеодима и диспрозия, что свидетельствует

о химической однородности образца. На энергодисперсионных спектрах в зоне лазерной метки (рис. 3, в, д) относительные интенсивности пиков железа и кобальта сохраняются, линии празеодима и диспрозия сопоставимы с соответствующими линиями в исходном состоянии, что свидетельствует об отсутствии обеднения редкоземельными элементами. Лазерное воздействие на поверхность поликристаллического микропровода (PrDy)(FeCo)B вызывает только морфологические изменения, поскольку в этом состоянии химические элементы уже распределены по устойчивым фазам, а границы зерен могут ограничивать диффузию.

В таблице представлен усредненный химический состав микропроводов (PrDy)(FeCo)B до и после вакуумного отжига для областей без лазерной метки и в зоне лазерного воздействия.

**Химический состав микропроводов (PrDy)(FeCo)B
с лазерным облучением до и после вакуумного отжига**

Область	Содержание элементов			
	Fe	Co	Pr	Dy
% (атомн.)				
Без лазерной метки	$\frac{55,39 \pm 1,09}{57,74 \pm 0,78}$	$\frac{32,83 \pm 0,19}{30,59 \pm 1,00}$	$\frac{7,38 \pm 0,23}{6,83 \pm 0,13}$	$\frac{4,41 \pm 0,76}{4,85 \pm 0,09}$
С лазерной меткой	$\frac{58,00 \pm 2,86}{57,14 \pm 0,19}$	$\frac{31,78 \pm 1,16}{31,41 \pm 0,39}$	$\frac{6,68 \pm 0,90}{7,18 \pm 0,02}$	$\frac{3,56 \pm 0,80}{4,29 \pm 0,22}$
% (по массе)				
Без лазерной метки	$\frac{35,16 \pm 0,35}{41,16 \pm 0,75}$	$\frac{22,00 \pm 0,77}{23,00 \pm 0,65}$	$\frac{11,84 \pm 0,71}{12,28 \pm 0,29}$	$\frac{8,18 \pm 1,48}{10,05 \pm 0,23}$
С лазерной меткой	$\frac{39,11 \pm 2,00}{40,74 \pm 0,57}$	$\frac{22,61 \pm 0,78}{23,64 \pm 0,70}$	$\frac{11,35 \pm 1,50}{12,91 \pm 0,24}$	$\frac{6,98 \pm 1,56}{8,89 \pm 0,30}$
Примечание. В числителе и знаменателе указано содержание элементов до и после вакуумного отжига соответственно. Области определения химического состава указаны на рис. 2 и 3.				

Сравнение усредненных результатов EDX-анализа (см. таблицу) для аморфного и поликристаллического микропровода (PrDy)(FeCo)B показывает, что локальное лазерное воздействие и последующий вакуумный отжиг по-разному влияют на распределение элементов. В аморфном микропроводе (PrDy)(FeCo)B в зоне лазерной метки наблюдаются увеличение содержания Fe и снижение концентрации редкоземельных элементов Pr и Dy по сравнению с участками без лазерного воздействия. Это свидетельствует о локальном перераспределении компонентов, вероятно, связанном с кратковременным плавлением и возможной частичной потерей или диффузионным перераспределением редкоземельных элементов при лазерном нагреве [14]. После вакуумного отжига в поликристаллическом микропроводе (PrDy)(FeCo)B различия между участками с лазерной меткой и без нее менее выражены: концентрации основных элементов оказываются в пределах погрешности измерений. Это указывает на гомогенизацию химического состава при кристаллизации и подтверждает высокую химическую и структурную стабильность поликристаллического состояния микропроводов (PrDy)(FeCo)B после термического воздействия.

На рис. 4 представлено элементное картирование аморфного и поликристаллического микропроводов (PrDy)(FeCo)B с локальными лазерными метками. Все элементы (Fe, Co, Pr, Dy) в образцах распределены равномерно как до, так и после вакуумного

отжига. Лазерное облучение вызывает локальное плавление, но не приводит к выраженному химическому перераспределению элементов.

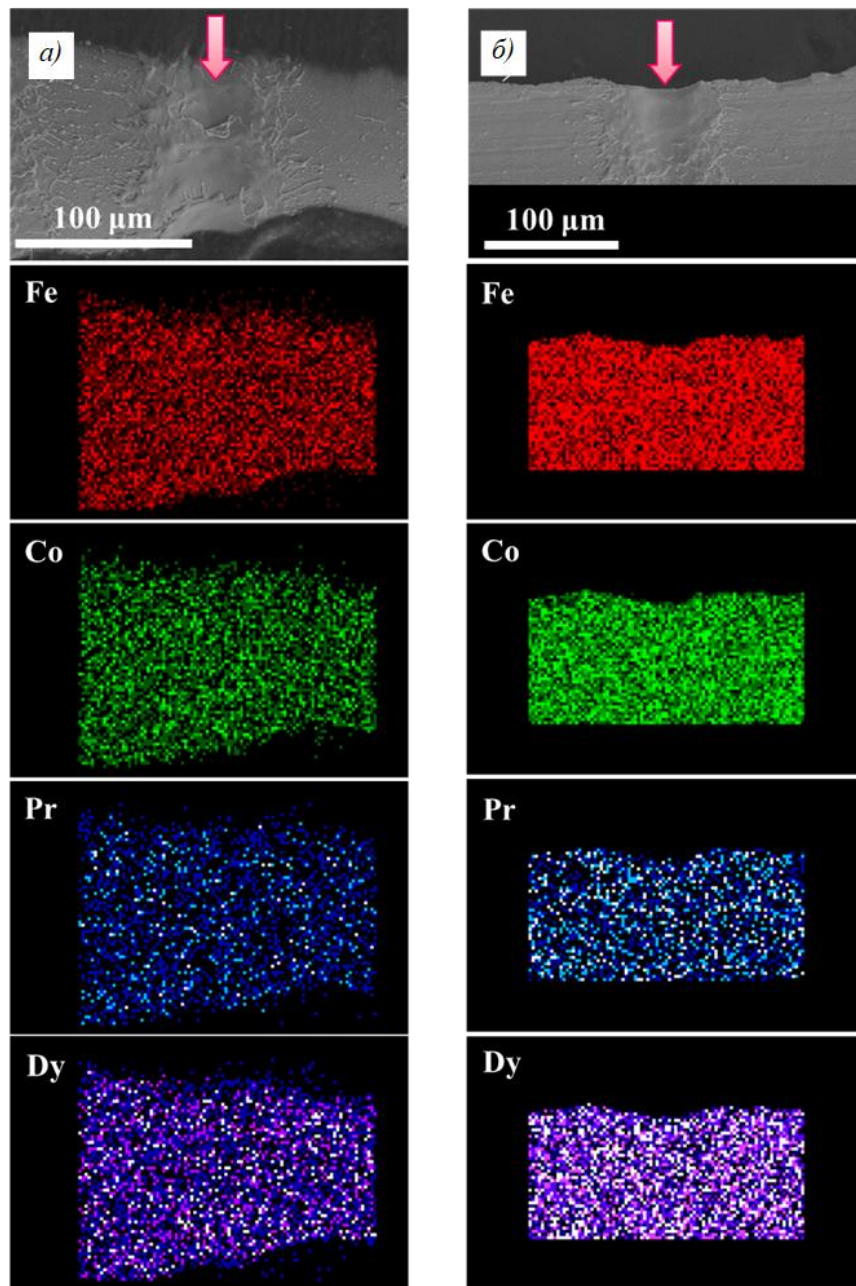


Рис. 4. СЭМ-изображения микропроводов $(\text{PrDy})(\text{FeCo})\text{B}$ с лазерными метками (показаны красными стрелками) до (а) и после (б) вакуумного отжига и соответствующие элементные картирования

На рис. 5 представлены локальные петли магнитного гистерезиса микропроводов $(\text{PrDy})(\text{FeCo})\text{B}$ для выпуклой и плоской сторон до и после вакуумного отжига, измеренные методом микроскопии Керра.

До вакуумного отжига (рис. 5, а, в, г, е) петли имеют наклонную форму с малой коэрцитивной силой и плавным процессом перемагничивания, что характерно для аморфного магнитомягкого состояния. Существенных различий между выпуклой и плоской сторонами в этом состоянии не наблюдается. Локальное лазерное облучение

приводит лишь к незначительному локальному изменению формы петли магнитного гистерезиса и уменьшению коэрцитивной силы, что свидетельствует о локальном характере структурной модификации без существенного влияния на магнитную анизотропию.

После вакуумного отжига (рис. 5, *жс, и, к, м*) петли гистерезиса характеризуются прямоугольной формой, увеличением коэрцитивной силы и резким процессом перемагничивания, что свидетельствует о формировании магнитотвердой поликристаллической структуры и увеличенной магнитной анизотропии. При этом различия между сторонами микропровода (PrDy)(FeCo)В становятся более явными: плоская поверхность (рис. 5, *к, м*) демонстрирует практически прямоугольные петли магнитного гистерезиса и более резкое перемагничивание по сравнению с выпуклой поверхностью (рис. 5, *жс, и*), что может быть связано с различиями в полях рассеяния. В области лазерной метки после отжига (рис. 5, *и, м*) наблюдаются лишь локальные вариации параметров петли магнитного гистерезиса, не нарушающие общего магнитотвердого состояния, что указывает на сохранение структурной и магнитной стабильности материала после термического воздействия.

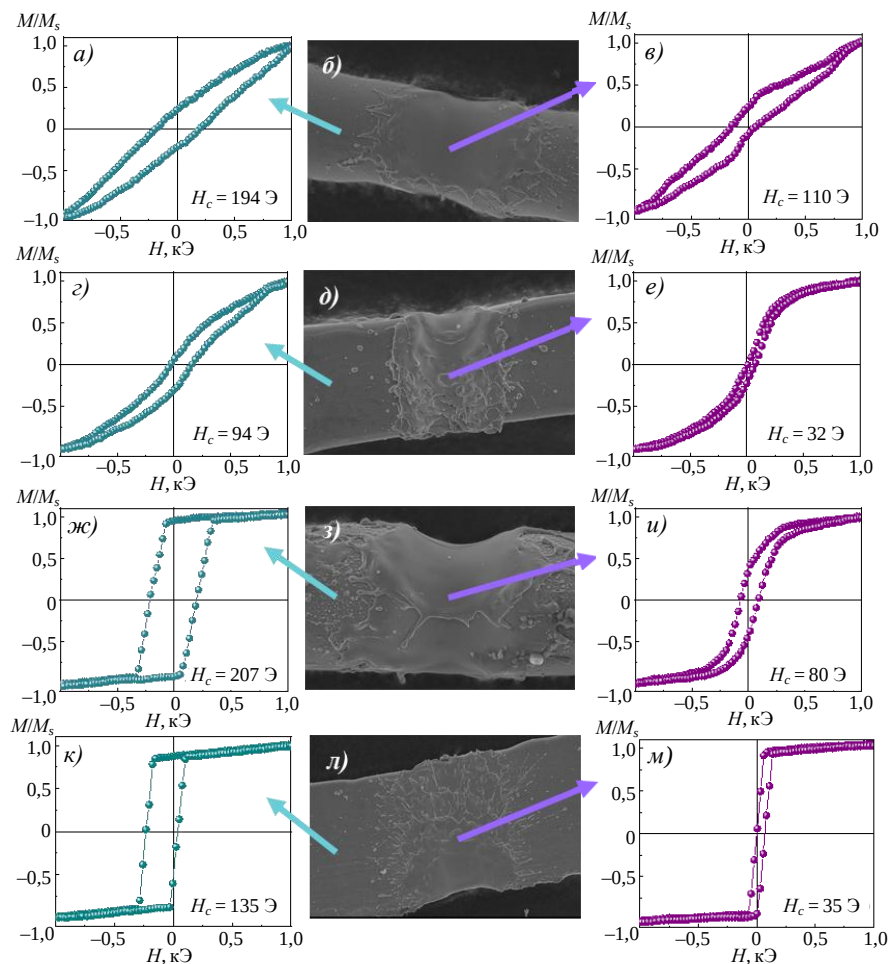


Рис. 5. Локальные петли магнитного гистерезиса до (*а, в, з, е*) и после (*жс, и, к, м*) вакуумного отжига; СЭМ-изображения микропроводов (PrDy)(FeCo)В с лазерным облучением до (*б, д*) и после (*з, л*) вакуумного отжига. Стрелками показаны области фокусировки лазера в микроскопе Керра при получении петель гистерезиса. Представлены данные для выпуклой (*а–в, жс–и*) и плоской (*з–е, к–м*) поверхностей микропровода. Внешнее магнитное поле направлено вдоль главной оси образца, температура во всех экспериментах составила 300 К. M – намагниченность, M_s – намагниченность насыщения, H – коэрцитивная сила

Заключения

Локальное лазерное облучение аморфного микропровода (PrDy)(FeCo)В приводит к снижению концентрации редкоземельных компонентов в зоне воздействия лазера при сохранении общего химического состава системы. В поликристаллическом микропроводе (PrDy)(FeCo)В лазерное облучение вызывает локальные морфологические изменения, однако химический состав остается практически неизменным, что подтверждает высокую структурную и химическую стабильность материала после вакуумного отжига. Вакуумный отжиг приводит к переходу микропроводов (PrDy)(FeCo)В из магнитомягкого аморфного состояния в магнитотвердое поликристаллическое, что сопровождается увеличением коэрцитивной силы и магнитной анизотропии. После отжига различия между выпуклой и плоской сторонами становятся более заметными – плоская поверхность демонстрирует практически прямоугольные петли гистерезиса. Полученные результаты можно использовать для нанесения магнитного 3D-рисунка, заданного программой, на поверхности деталей. При этом нанесенный магнитный узор устойчив к нагреву и легко обнаруживается оптическими методами.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ проблем химической физики и медицинской химии РАН № 124013100858-3.

Список источников

1. Леднев И.С. Магнитные методы неразрушающего контроля деталей авиационной техники // Авиационные материалы и технологии. 2024. № 1 (74). С. 111–120. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 05.02.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-111-120.
2. Леонов А.А., Трофимов Н.В., Панаев В.Г., Кудасов С.В., Широкожуков А.В. Магнелиевые сплавы в конструкции изделий навигационной системы // Авиационные материалы и технологии. 2024. № 3 (76). С. 25–34. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 05.02.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-3-25-34.
3. Feng B., Wu J., Tu H. et al. A Review of Magnetic Flux Leakage Nondestructive Testing // Materials. 2022. Vol. 15 (20). P. 7362. DOI: 10.3390/ma15207362.
4. Chircov C., Grumezescu A.M. Microelectromechanical Systems (MEMS) for Biomedical Applications // Micromachines. 2022. Vol. 13 (2). P. 164. DOI: 10.3390/mi13020164.
5. Algamili A.S., Khir M.H.M., Dennis J.O. et al. A Review of Actuation and Sensing Mechanisms in MEMS-Based Sensor Devices // Nanoscale Research Letters. 2021. Vol. 16 (1). P. 16. DOI: 10.1186/s11671-021-03481-7.
6. Gutfleisch O., Willard M.A., Brück E. et al. Magnetic Materials and Devices for the 21st Century: Stronger, Lighter, and More Energy Efficient // Advanced Materials. 2011. Vol. 23 (7). P. 821–842. DOI: 10.1002/adma.201002180.
7. Каблов Е.Н., Кондрашов С.В., Мельников А.А., Щур П.А. Применение функциональных и адаптивных материалов, полученных способом 3D-печати (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 2 (108). С. 32–51. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.02.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-32-51.
8. Sawane M., Prasad M. MEMS piezoelectric sensor for self-powered devices: A review // Materials Science in Semiconductor Processing. 2023. Vol. 158. P. 107324. DOI: 10.1016/j.mssp.2023.107324.
9. He J.-H., He C.-H., Qian M.-Y., Alsolami A.A. Piezoelectric Biosensor based on ultrasensitive MEMS system // Sensors and Actuators A: Physical. 2024. Vol. 376. P. 115664. DOI: 10.1016/j.sna.2024.115664.
10. Pagliano S., Marschner D.E., Maillard D. et al. Micro 3D printing of a functional MEMS accelerometer // Microsystems & Nanoengineering. 2022. Vol. 8 (105). DOI: 10.1038/s41378-022-00440-9.

11. Gemelli A., Tambussi M., Fusetto S. et al. Recent Trends in Structures and Interfaces of MEMS Transducers for Audio Applications: A Review // *Micromachines*. 2023. Vol. 14 (4). P. 847. DOI: 10.3390/mi14040847.
12. Chen Z., Zhang P., Ahmad I. et al. Enhancement of Magnetic Properties of Nanocomposite $\text{Pr}_2\text{Fe}_{14}\text{B}/\alpha\text{-Fe}$ Magnets by Small Substitution of Dy for Pr // *Journal of Applied Physics*. 2001. Vol. 89 (4). P. 2299–2303. DOI: 10.1063/1.1344221.
13. Hu S., Peng K., Chen H. Influence of Annealing Temperature on the Dy Diffusion Process in Nd–Fe–B Magnets // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2017. Vol. 426. P. 340–346. DOI: 10.1016/j.jmmm.2016.11.111.
14. Löewe K., Sepehri-Amin H., Hono K. Temperature-dependent Dy Diffusion Processes in Nd–Fe–B Permanent Magnets // *Acta Materialia*. 2015. Vol. 83. P. 248–255. DOI: 10.1016/j.actamat.2014.09.039.
15. Woodcock T.G., Zhang Y., Hrkac G. et al. Understanding the Microstructure and Coercivity of High Performance NdFeB-Based Magnets // *Scripta Materialia*. 2012. Vol. 67 (6). P. 536–541. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2012.05.038.
16. Дворецкая Е.В., Потапов М.В., Пискорский В.П., Моргунов Р.Б. Восстановление аморфной атомной структуры и магнитных доменов в микропроводах RE–TM–B методами термической и лазерной обработки // *Труды ВИАМ*. 2026. № 2 (156). С. 127–138. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.02.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-2-127-138.
17. Sridharan N., Cakmak E., List F.A. et al. Rationalization of Solidification Mechanism of Nd–Fe–B Magnets during Laser Directed-Energy Deposition // *Journal of Materials Science*. 2018. Vol. 53 (11). P. 8619–8626. DOI: 10.1007/s10853-018-2178-7.

References

1. Lednev I.S. Magnetic methods of non-destructive testing of aircraft parts. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 1 (74), pp. 111–120. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: February 05, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-111-120.
2. Leonov A.A., Trofimov N.V., Panaetov V.G., Kudasov S.V., Shirokozhukov A.V. Magnesium alloys in the design of navigation system products. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 3 (76), pp. 25–34. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: February 05, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-3-25-34.
3. Feng B., Wu J., Tu H. et al. A Review of Magnetic Flux Leakage Nondestructive Testing. *Materials*, 2022, vol. 15 (20), p. 7362. DOI: 10.3390/ma15207362.
4. Chircov C., Grumezescu A.M. Microelectromechanical Systems (MEMS) for Biomedical Applications. *Micromachines*, 2022, vol. 13 (2), p. 164. DOI: 10.3390/mi13020164.
5. Algamili A.S., Khir M.H.M., Dennis J.O. et al. A Review of Actuation and Sensing Mechanisms in MEMS-Based Sensor Devices. *Nanoscale Research Letters*, 2021, vol. 16 (1), p. 16. DOI: 10.1186/s11671-021-03481-7.
6. Gutfleisch O., Willard M.A., Brück E. et al. Magnetic Materials and Devices for the 21st Century: Stronger, Lighter, and More Energy Efficient. *Advanced Materials*, 2011, vol. 23 (7), pp. 821–842. DOI: 10.1002/adma.201002180.
7. Kondrashov S.V., Solovyanchik L.V., Larionov S.A., Volny O.S. Investigation of the effect of flame retardants on the flammability and fluidity of the melt of aliphatic polyamides. *Trudy VIAM*, 2022, no. 2 (108), pp. 32–51. URL: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 05, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-32-51.
8. Sawane M., Prasad M. MEMS piezoelectric sensor for self-powered devices: A review. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2023, vol. 158, p. 107324. DOI: 10.1016/j.mssp.2023.107324.
9. He J.-H., He C.-H., Qian M.-Y., Alsolami A.A. Piezoelectric Biosensor based on ultrasensitive MEMS system. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2024, vol. 376, p. 115664. DOI: 10.1016/j.sna.2024.115664.

10. Pagliano S., Marschner D.E., Maillard D. et al. Micro 3D printing of a functional MEMS accelerometer. *Microsystems & Nanoengineering*, 2022, vol. 8 (105). DOI: 10.1038/s41378-022-00440-9.
11. Gemelli A., Tambussi M., Fusetto S. et al. Recent Trends in Structures and Interfaces of MEMS Transducers for Audio Applications: A Review. *Micromachines*, 2023, vol. 14 (4), p. 847. DOI: 10.3390/mi14040847.
12. Chen Z., Zhang P., Ahmad I. et al. Enhancement of Magnetic Properties of Nanocomposite $\text{Pr}_2\text{Fe}_{14}\text{B}/\alpha\text{-Fe}$ Magnets by Small Substitution of Dy for Pr. *Journal of Applied Physics*, 2001, vol. 89 (4), pp. 2299–2303. DOI: 10.1063/1.1344221.
13. Hu S., Peng K., Chen H. Influence of Annealing Temperature on the Dy Diffusion Process in Nd–Fe–B Magnets. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2017, vol. 426, pp. 340–346. DOI: 10.1016/j.jmmm.2016.11.111.
14. Löwe K., Sepehri-Amin H., Hono K. Temperature-dependent Dy Diffusion Processes in Nd–Fe–B Permanent Magnets. *Acta Materialia*, 2015, vol. 83, pp. 248–255. DOI: 10.1016/j.actamat.2014.09.039.
15. Woodcock T.G., Zhang Y., Hrkac G. et al. Understanding the Microstructure and Coercivity of High Performance NdFeB-Based Magnets. *Scripta Materialia*, 2012, vol. 67 (6), pp. 536–541. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2012.05.038.
16. Dvoretzskaya E.V., Potapov M.V., Piskorsky V.P., Morgunov R.B. Restoration of amorphous atomic structure and magnetic domains in RE–TM–B microwires by thermal and laser processing. *Trudy VIAM*, 2026, no. 2 (156), pp. 127–138. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 05, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-2-127-138.
17. Sridharan N., Cakmak E., List F.A. et al. Rationalization of Solidification Mechanism of Nd–Fe–B Magnets during Laser Directed-Energy Deposition. *Journal of Materials Science*, 2018, vol. 53 (11), pp. 8619–8626. DOI: 10.1007/s10853-018-2178-7.

Информация об авторах

Дворецкая Елизавета Витальевна, к.ф.-м.н., научный сотрудник, ФИЦ ПХФ и МХ РАН, office@icp.ac.ru; ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Бахметьев Максим Владимирович, научный сотрудник, к.ф.-м.н., ФИЦ ПХФ и МХ РАН, office@icp.ac.ru

Колмаков Алексей Олегович, инженер I категории, ФИЦ ПХФ и МХ РАН, office@icp.ac.ru

Валеев Руслан Анверович, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Бузенков Александр Владимирович, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Пискорский Вадим Петрович, главный научный сотрудник, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Моргунов Роман Борисович, профессор, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник, ФИЦ ПХФ и МХ РАН, office@icp.ac.ru; ведущий научный сотрудник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Elizaveta V. Dvoretzskaya, Candidate of Sciences (Phys. & Math.), Researcher, FRC PCPMC RAS, office@icp.ac.ru; Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Maksim V. Bakhmetev, Researcher, Candidate of Sciences (Phys. & Math.), FRC PCPMC RAS, office@icp.ac.ru

Aleksey O. Kolmakov, First Category Engineer, FRC PCPMC RAS, office@icp.ac.ru

Ruslan A. Valeev, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Aleksandr V. Buzenkov, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Vadim P. Piskorsky, Chief Researcher, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Roman B. Morgunov, Professor, Doctor of Sciences (Phys. & Math.), Chief Researcher, FRC PCPMC RAS, office@icp.ac.ru; Leading Researcher, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 17.07.2026; одобрена и принята к публикации после рецензирования 29.07.2026.
The article was submitted 17.07.2026; approved and accepted for publication after reviewing 29.07.2026.