

Научная статья

УДК 669.85

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-4-193-204

НАНОИНДЕНТИРОВАНИЕ МИКРОПРОВОДОВ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ СПЛАВОВ

Е.В. Дворецкая^{1, 2}, А.О. Колмаков¹, А.В. Бузенков²,
М.В. Потапов², 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. Проведен анализ точного химического состава и пространственного распределения химических компонентов в тонких проводниках DyPrCoFeB. Исследовано магнитное поле рассеяния вблизи отполированного торца микропровода и определены особенности структуры его поверхности. Измерены значения микротвердости (9,56 ГПа) и модуля упругости (159 ГПа) отполированных образцов DyPrCoFeB. Определен максимально допустимый предел нагрузки (~6 Н), превышение которого вызывает необратимую пластическую деформацию микропроводов.

Ключевые слова: микропровода, микромагниты, редкоземельные сплавы, микротвердость, упругость, пластичность, модуль упругости

Для цитирования: Дворецкая Е.В., Колмаков А.О., Бузенков А.В., Потапов М.В., Пискорский В.П., Моргунов Р.Б. Наноиндентирование микропроводов редкоземельных сплавов // Труды ВИАМ. 2026. № 4 (158). С. 193–204. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-4-193-204.

Scientific article

MICROHARDNESS OF RARE EARTH MICROWIRES

E.V. Dvoretzskaya^{1, 2}, A.O. Kolmakov¹, A.V. Buzenkov²,
M.V. Potapov², 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. An analysis of the precise chemical composition and spatial distribution of chemical components in thin DyPrCoFeB conductors was conducted. The magnetic stray field near the polished end of the microwire was studied, and the features of its surface structure were determined. The microhardness (9,56 GPa) and modulus of elasticity (159 GPa) of polished DyPrCoFeB samples were measured. The maximum allowable load limit (~6 N) was determined; exceeding this limit causes irreversible plastic deformation of the microwires.

Keywords: microwires, micromagnets, rare earth alloys, microhardness, elasticity, plasticity, modulus of elasticity

For citation: Dvoretzkaya E.V., Kolmakov A.O., Buzenkov A.V., Potapov M.V., Piskorsky V.P., Morgunov R.B. Microhardness of rare earth microwires *Trudy VIAM*, 2026, no. 4 (158), pp. 193–204. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-4-193-204.

Введение

Микропровода редкоземельных магнитных сплавов являются перспективными материалами для множества применений. Отдельные микропровода могут служить микропинцетами, управляющими движением магнитомеченных клеток и таким образом решающими проблемы клеточной инженерии [1–3]. При этом важное значение имеет упругость и изгиб микропровода при взаимодействии с наночастицами в биологической клетке. Геометрически правильные сетки магнитных микропроводов могут быть основой магнитной нейросети при наличии нелинейности магнитных свойств в области магнитного насыщения [4–8]. Хаотичные ансамбли магнитных микропроводов могут служить основой для покрытий, поглощающих электромагнитные волны. Различные подходы разработаны для создания одномерных магнитных материалов на основе нанопроволок и наносеток. Основная идея большинства методик сводится к химическому синтезу с использованием пространственных матриц, которые обеспечивают ограничение роста частиц в радиальном направлении, сохраняя их удлинение в осевом. Тем не менее применяемые технологии имеют ряд существенных недостатков. Прежде всего, значительная часть методов сильно ограничена выбором базовых материалов, что значительно сокращает количество возможных соединений и ухудшает универсальность методики. Далее процедура требует чрезвычайно высокого уровня контроля над созданием шаблонной матрицы, необходимой для точной ориентации нанопроволок, достижение которой представляется крайне сложной задачей (особенно при масштабе единиц и десятков нанометров). Это создает серьезные проблемы при получении тонких структур с однородными механическими и магнитными свойствами, критически важными для многих приложений. Еще один важный недостаток существующих подходов – высокий уровень загрязнений продукта примесями, использовавшимися при синтезе. Остаточные примеси снижают качество полученных материалов, ухудшают эксплуатационные характеристики и уменьшают эффективность взаимодействия магнитных полей, повышая энергетические потери при эксплуатации. Таким образом, возникает задача разработки методов, позволяющих избежать жестких требований к выбору материалов и расширить диапазон доступных соединений, что дает возможность управлять топологией наноструктур непосредственно в процессе синтеза.

Изготовление микроэлектродвигателей, микроактуаторов и микророботов на основе микропроводов требует знания их механических характеристик, поскольку микропровода в таких системах являются ключевыми элементами [9–15]. Для успешного создания микроэлектродвигателей в микромасштабах необходимы специфичные микроструктуры с регулярно чередующимся распределением намагниченности. Обычно эта задача решается посредством изготовления тонких ферромагнитных микропроводов с периодически варьируемым диаметром. Периодичность распределения намагниченности определяется особенностями кристаллической решетки, составом фаз и химическим составом, а также геометрической формой и топологией самих микропроводов. Регулярность распределения можно регулировать с использованием термообработки и внешнего магнитного поля. Поскольку микропровода значительно отличаются от объемных образцов высокими внутренними механическими напряжениями, сохраняющимися в них длительное время после резкого охлаждения расплава, их магнитные свойства также отличны от магнитных свойств объемных образцов. В частности, было показано, что намагниченность и магнитокалорический эффект оказываются иными,

чем в объемном материале. Поэтому микропровода являются рабочим телом магнитных холодильных машин с тем преимуществом, что их свойства можно значительно изменять, регулируя уровень механических напряжений в них.

Исследования магнитокалорического эффекта в соединениях гадолиния продолжают демонстрировать впечатляющие открытия, важные для развития технологий охлаждения. Методы химической модификации составов и оптимизации условий перемещения образцов в магнитных полях служат инструментами повышения эффективности магнитокалорического эффекта с целью его промышленного внедрения [16–19]. Механические деформации способны улучшать характеристики магнитокалорического цикла в гадолиниевых сплавах [20–22]. Разработка устройств, работающих на механокалорическом эффекте, представляет собой многообещающее направление для совершенствования будущих методов охлаждения, в которых механизм охлаждения основан на изменении механических напряжений, влияющих на степень намагниченности.

Микропровода привлекают особое внимание благодаря своей способности легко осуществлять теплообмен, при этом требуются незначительные усилия для деформирования. Из приведенных примеров видно, что микропровода многофункциональны, востребованы и часто большое значение имеют их механические свойства. Однако работ, посвященных исследованию механических свойств микропроводов на основе сплавов редкоземельных металлов, в научно-технической литературе совсем немного, а о механических свойствах этих важных объектов почти ничего неизвестно. В научно-технических литературных источниках основное внимание уделяется исследованиям микропроводов, изготовленных на основе переходных металлов, таких как FeCoSiB, FeSi, FeSiB [23–25], и немагнитных материалов типа Si [26].

Несмотря на широкое распространение и значительный интерес со стороны большого числа исследовательских коллективов, эти провода часто демонстрируют низкую повторяемость свойств даже при одинаковых условиях производства. Причина заключается в сложности точного контроля локальных характеристик расплава и условий его охлаждения, поскольку зачастую используются усредненные значения таких параметров, как температура расплава и скорость подачи материала на охлаждающее устройство. Дополнительную проблему создают непредсказуемые температурные и концентрационные градиенты внутри расплава. Особенно сложной ситуация становится при работе с многокомпонентными сплавами на основе редкоземельных и переходных металлов, где возникают дополнительные трудности, обусловленные разнообразием формирующихся фаз, зависящих от температуры, и конкуренцией динамических процессов, сопровождаемых неизбежной стохастической природой зарождения микроструктурных объектов, проявляющейся гораздо интенсивнее, нежели в массивных образцах. Данная работа направлена на то, чтобы восполнить отчасти этот недостаток информации. Цель работы заключалась в определении ключевых параметров, таких как твердость и модуль упругости, а также в анализе однородности механических свойств микропроводов DyPrCoFeB.

Материалы и методы

Микропровода DyPrCoFeB (рис. 1) изготовлены методом экстракции висящей капли расплава (ЭВКР) при скорости водяного охлаждения 10^6 K/c на латунном диске [1–3]. Метод ЭВКР позволяет получать микропровода DyPrCoFeB радиусом от 12 до 200 мкм и длиной до 5 см. Оптическое изображение микропроводов DyPrCoFeB (рис. 1, б) получено с помощью универсального флуоресцентного оптического микроскопа.

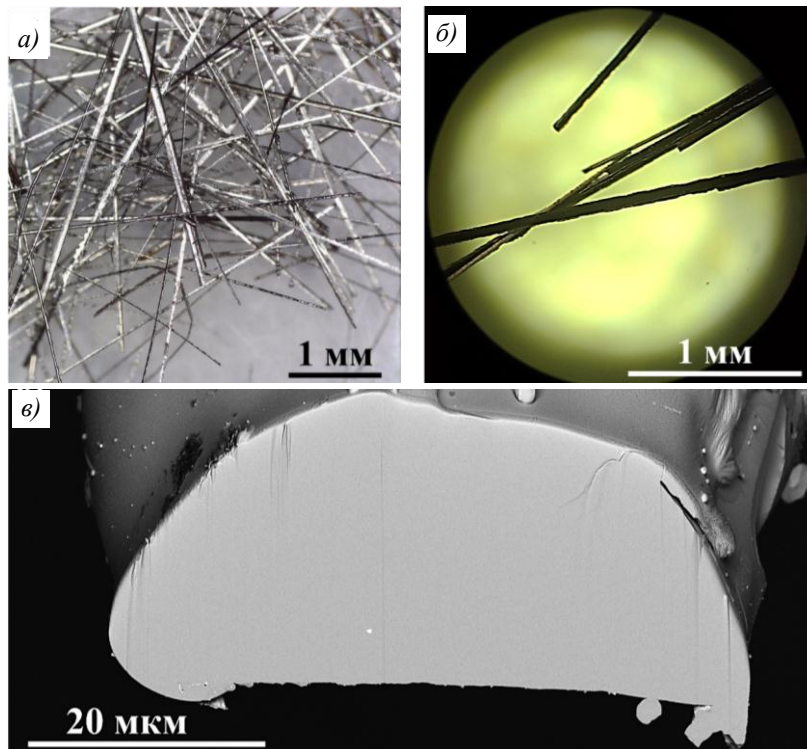


Рис. 1. Фотография (а) и оптическое изображение (б) микропроводов DyPrCoFeV, а также изображение отполированного торца микропровода (в), полученное в сканирующем электронном микроскопе

Для определения локального химического состава на поверхности торца микропровода DyPrCoFeV изготовлен микрошлиф (рис. 1, в) с помощью сфокусированного высокоэнергетического нанометрового пучка положительно заряженных ионов Ga в двухлучевом сканирующем электронно-ионном микроскопе, оснащенный энергодисперсионным спектрометром (EDS). Отполированная поверхность торца микропровода DyPrCoFeV имеет однородную структуру (рис. 1, в), на энергодисперсионном спектре всей поверхности торца микропровода (рис. 2) наблюдаются все химические элементы, входящие в состав образца, кроме бора, поскольку рентгеновские фотоны K_{α} имеют слишком небольшую энергию для достоверной регистрации методом EDS. Присутствующие в спектре небольшие следовые количества меди, цинка и кремния не относятся к образцу, а входят в состав деталей микроскопа, которые расположены под образцом и в стороне от него.

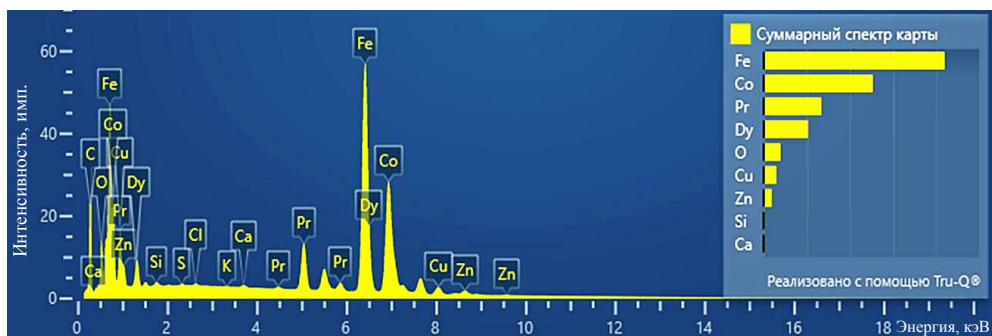


Рис. 2. Энергодисперсионный спектр торца микропровода DyPrCoFeV, полученный в сканирующем электронном микроскопе

Топология поверхности и локальный магнитный контраст отполированного торца микропровода DyPrCoFeV получены с помощью двухпроходного метода в атомно-силовом микроскопе, оснащённом ферромагнитным зондом (рис. 3). Предварительно образец помещали вертикально в эпоксидную матрицу с последующей полировкой торца микропровода DyPrCoFeV. Во время первого прохода в режиме атомно-силовой микроскопии (АСМ), вблизи резонансной частоты создавали вынужденные колебания зонда с амплитудой от 10 до 100 нм и регистрировали динамику изменений амплитуды и фазы этих колебаний. Изображение топографии поверхности поперечного сечения микропровода DyPrCoFeV (рис. 3, а) формировалось благодаря взаимодействию сил Ван-дер-Ваальса между зондом и образцом. Второй проход выполняли в режиме магнитосиловой микроскопии (МСМ), при этом измеряли отклонения зонда удаленного от поверхности образца микропровода DyPrCoFeV на постоянное расстояние $z_0 = \text{const}$, при котором доминирует магнитное взаимодействие над силами Ван-дер-Ваальса. Изображение, полученное в режиме магнитосиловой микроскопии, показывает неоднородности магнитных полей на отполированной поверхности торца микропровода DyPrCoFeV, воздействующих на ферромагнитный зонд со стороны образца (рис. 3, б). Профиль поверхности отполированного торца микропровода DyPrCoFeV (рис. 3, в), полученный в режиме магнитосиловой микроскопии, демонстрирует однородное распределение намагниченности в образце.

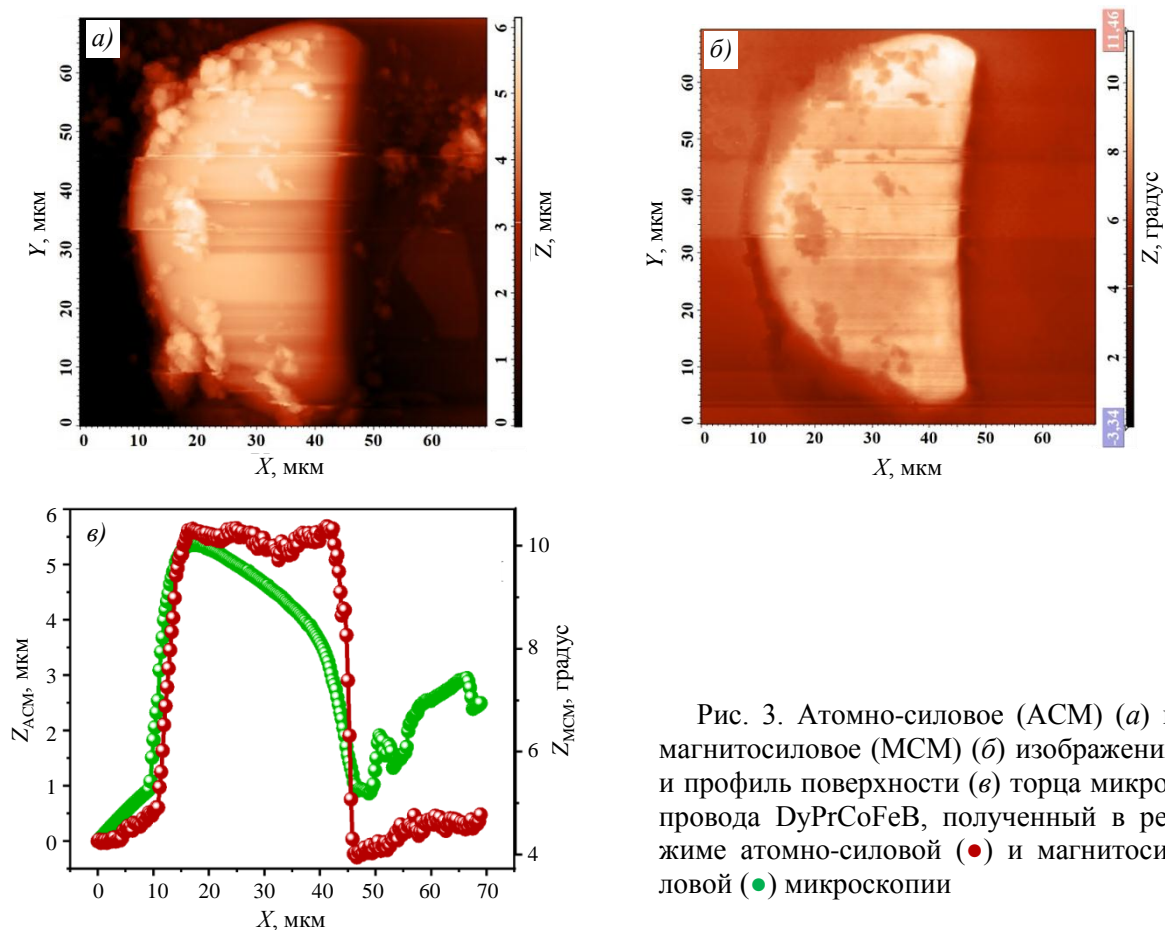


Рис. 3. Атомно-силовое (АСМ) (а) и магнитосиловое (МСМ) (б) изображения и профиль поверхности (в) торца микропровода DyPrCoFeV, полученный в режиме атомно-силовой (●) и магнитосиловой (●) микроскопии

Для проведения наноиндентирования микропровод DyPrCoFeV предварительно упаковали горизонтально в матрицу из пластмассы на основе фенольных смол и обработали на шлифовально-полировальном оборудовании. Измерение твердости и модуля

упругости микропровода DyPrCoFeV осуществляли на сканирующем нанотвердомере НаноСкан-4D, который позволяет производить индентирование в соответствии с рекомендациями стандартов ISO 14577-1:2002 и ГОСТ Р 8.748–2011. Данный метод базируется на исследовании взаимосвязи между нагрузкой P при внедрении индентора в материал и глубиной его проникновения h . В качестве индентора используется трехгранная алмазная пирамида Берковича (рис. 4, б) с вершиной, угол которой близок к 142 градусам. Динамическое наноиндентирование осуществляется следующим образом: алмазный наноиндентор внедряется в образец с фиксированной скоростью до достижения определенной нагрузки, после этого нагрузка снимается и материал выталкивает алмазный индентор обратно. На рис. 4, а изображена характерная для данного метода экспериментальная зависимость, отображающая взаимосвязь между силой давления P и глубиной погружения индентора h . Кривая включает два участка «Нагружение» и «Разгрузка» (рис. 4, а), отражающих стадии приложения и снятия нагрузки.

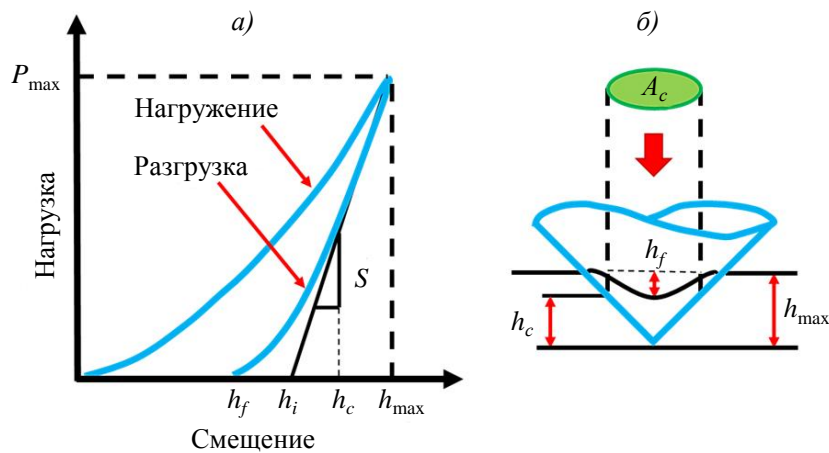


Рис. 4. Общий вид кривой «нагружение–разгрузка» (а) и схема контакта индентора и исследуемого образца (б) с обозначениями величин, используемых в методике расчета модуля упругости и твердости

Согласно вышеописанному методу, микротвердость H исследуемого образца рассчитывается по формуле

$$H = \frac{P_{max}}{A_c}, \quad (1)$$

где P_{max} – максимальное значение приложенной нагрузки; A_c – площадь проекции отпечатка при максимальном значении нагрузки, которая зависит от глубины погружения индентора:

$$A_c = f(h_c), \quad (2)$$

где h_c – глубина погружения алмазного индентора за вычетом упругого прогиба поверхности.

Приведенный модуль упругости E_r рассчитывается по формуле

$$E_r = \frac{1}{\beta} \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{S}{\sqrt{A_c}}, \quad (3)$$

где β – константа, зависящая от формы индентора; S – жесткость контакта, которая определяется по углу наклона касательной к кривой разгрузки в точке с максимальным значением приложенной нагрузки P_{max} :

$$S = \left(\frac{dP}{dh} \right)_{P=P_{max}}. \quad (4)$$

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, а также оборудования центра коллективного пользования Федерального исследовательского центра Проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук.

Результаты и обсуждение

Участок микропровода DyPrCoFeB для осуществления процесса наноиндентирования предварительно определен с применением оптического микроскопа. Затем на данном участке последовательно проведены механические испытания вдоль отполированной поверхности образца. Предварительную калибровку оборудования осуществляли на образце плавленого кварца с характеристиками: микротвердость $H_{\text{SiO}_2} = 9,3$ ГПа и модуль упругости $E_{\text{SiO}_2} = 72,7$ ГПа. На рис. 5, а, б представлены следы алмазного наноиндентора на отполированной поверхности микропровода DyPrCoFeB после проведения испытаний. На рис. 5, в представлено оптическое изображение отполированной поверхности микропровода DyPrCoFeB с серией последовательных отпечатков наноиндентирования. Величина максимальной приложенной нагрузки составила $P_{\text{max}} = 10$ мН (рис. 5, г). Процесс нагружения продолжался 5 с, выдержка при максимальной нагрузке составляла 1 с.

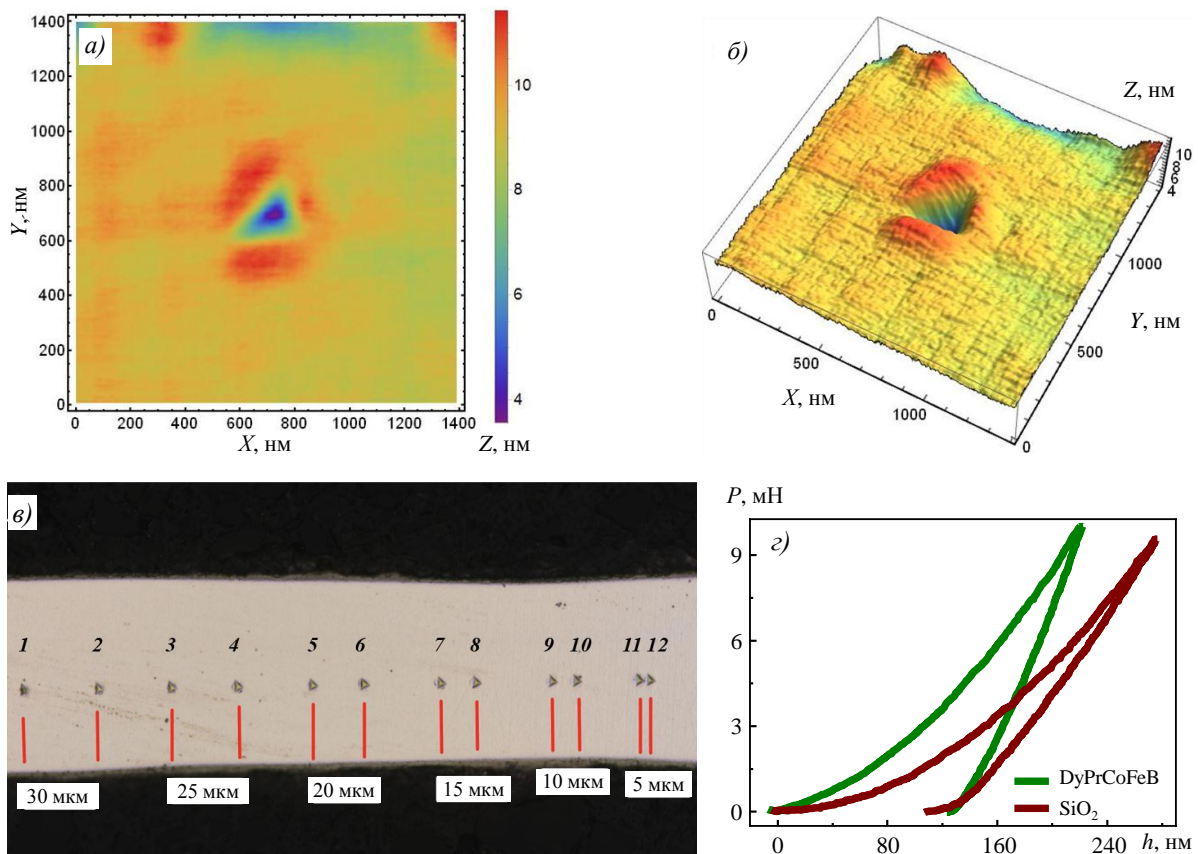


Рис. 5. 2D- (а) и 3D- (б) визуализация отпечатка алмазного индентора на отполированной поверхности микропровода DyPrCoFeB, полученная с помощью сканирующего зондового микроскопа. Оптическое изображение серии отпечатков алмазного индентора на отполированной поверхности микропровода DyPrCoFeB (в). Зависимости силы нагружения P от глубины смещения алмазного индентора h для образца микропровода DyPrCoFeB и контрольного образца плавленого кварца SiO₂ (г)

В таблице приведены значения микротвердости и модуля упругости для участков проведения наноиндентирования, представленных на рис. 5, в. Модуль упругости E связан с приведенным модулем упругости E_r уравнением

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1-\nu_s^2}{E} + \frac{1-\nu_i^2}{E_i}, \quad (5)$$

где E_i – модуль упругости материала индентора; ν_s – коэффициент Пуассона анализируемого материала; ν_i – коэффициент Пуассона материала индентора.

Механические характеристики микропровода DyPrCoFeB

Порядковый номер отпечатка на рис. 5, в	Микротвердость H , ГПа	Модуль упругости E , ГПа
1	10,52	167
2	9,36	166
3	9,64	158
4	9,15	150
5	9,5	156
6	9,37	157
7	9,42	162
8	9,81	164
9	9	159
10	9,91	157
11	9,71	158
12	9,37	154
Среднее значение	9,56	159

Таким образом, микротвердость и модуль упругости вдоль главной оси микропровода DyPrCoFeB преимущественно однородны, незначительные отклонения микротвердости H и модуля упругости E могут быть связаны с методической ошибкой метода инструментального наноиндентирования. Полученные данные позволяют оценить и предел текучести – максимальную нагрузку, до которой деформация все еще может считаться упругой. Согласно классическим представлениям, значение предела текучести составляет $H/3 \approx 3,19$ ГПа. Это дает представление о том, какую нагрузку можно прикладывать к микропроводам, оставляя их деформацию обратимой. Для микропровода, исследуемого в экспериментах, представленных в данной статье, эта сила составляет ~6 Н.

Заключение

Аттестован точный химический состав и распределение химических элементов в микропроводах DyPrCoFeB. Построен профиль распределения магнитного поля рассеяния на торце микропровода и представлена топология поверхности. Установлено, что распределение магнитного поля на торце однородно. Получены значения микротвердости (9,56 ГПа) и модуля упругости (159 ГПа) полированных микропроводов DyPrCoFeB. Максимальная сила, которую можно прикладывать к микропроводам DyPrCoFeB, оставляя их деформацию упругой, составляет ~6 Н.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ Проблем химической физики и медицинской химии РАН (номер госрегистрации АААА-А19-119092390079-8,124013100858-3).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Королев Д.В., Пискорский В.П., Валеев Р.А., Бакрадзе М.М., Дворецкая Е.В., Коплак О.В., Моргунов Р.Б. Инженерия редкоземельных микромагнитов RE–TM–B (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 1 (62). С. 44–60. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 08.09.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-44-60.
2. Дворецкая Е.В., Потапов М.В., Валеев Р.А., Пискорский В.П., Моргунов Р.Б. Магнитосопротивление микроигл (Pr, Dy)(Fe, Co)B // *Труды ВИАМ*. 2025. № 1 (143). С. 46–59. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.09.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-1-46-59.
3. Дворецкая Е.В., Королев Д.В., Пискорский В.П., Валеев Р.А., Коплак О.В., Моргунов Р.Б. Магнетронное напыление оболочки железа и микровключения в микропроводах PrDyFeCoB // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 2 (67). С. 85–96. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 12.09.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-85-96.
4. Potočník J., Nenadović M., Bundaleski N. et al. The influence of thickness on magnetic properties of nanostructured nickel thin films obtained by GLAD technique // *Materials Research Bulletin*. 2016. Vol. 84. P. 455–461. DOI: 10.1016/j.materresbull.2016.08.044.
5. Kurenkov A., DuttaGupta S., Zhang C. et al. Artificial Neuron and Synapse Realized in an Antiferromagnet/Ferromagnet Heterostructure Using Dynamics of Spin–Orbit Torque Switching // *Advanced Materials*. 2019. Vol. 31. P. 1900636. DOI: 10.1002/adma.201900636.
6. Thomson T. 10 - Magnetic properties of metallic thin films // *Metallic Films for Electronic, Optical and Magnetic Applications*. 2014. P. 454–546. DOI: 10.1533/9780857096296.2.454.
7. Gordon E.B., Stepanov M.E., Kulish M.I. et al. The nanowires growth by laser ablation of metals inside rotating superfluid helium // *Laser Physics Letters*. 2019. Vol. 16 (2). P. 026002. DOI: 10.1088/1612-202X/aaf6a1.
8. Lai C., Tsai W., Yang M. et al. A two-dimensional immunomagnetic nano-net for the efficient isolation of circulating tumor cells in whole blood // *Nanoscale*. 2019. Vol. 11. P. 21119. DOI: 10.1039/C9NR06256D.
9. 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: 17.09.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-32-51.
10. Algamili A.S., Md. Khir M.H., Dennis J.O. et al. A Review of Actuation and Sensing Mechanisms in MEMS-Based Sensor Devices // *Nanoscale Research Letters*. 2021. Vol. 16 (16). P. 21. DOI: 10.1186/s11671-021-03481-7.
11. Chircov C., Grumezescu A.M. Microelectromechanical Systems (MEMS) for Biomedical Applications // *Micromachines*. 2022. Vol. 13 (2). P. 164. DOI: 10.3390/mi13020164.
12. 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.
13. 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.
14. Pagliano S., Marschner D.E., Maillard D. et al. Micro 3D printing of a functional MEMS accelerometer // *Microsystems & Nanoengineering*. 2022. Vol. 8 (105). P. 1–11. DOI: 10.1038/s41378-022-00440-9.
15. 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.
16. Xie Y., Wang L., Na Y., Zhang Y. Magnetic properties and magnetocaloric responses in the Gd₆₀Al₂₀Cu₂₀ amorphous ribbon // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2025. Vol. 658. P. 123526. DOI: 10.1016/j.jnoncrsol.2025.123526.

17. Chen W., Lin J., Wang X., Li L. Structural, magnetic, and cryogenic magnetocaloric properties of $Gd_{11}O_{10}(SiO_4)(PO_4)_3$ phosphosilicate // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2025. Vol. 626. P. 173107. DOI: 10.1016/j.jmmm.2025.173107.
18. Gschneidner Jr.K.A., Pecharsky V.K., Tsokol A.O. Recent developments in magnetocaloric materials // *Reports on Progress in Physics*. 2005. Vol. 68. P. 1479–1539. DOI: 10.1088/0034-4885/68/6/R04.
19. Zhang Y., Na Y., Xie Y., Zhao X. Unveiling the structural and magnetic properties of $RENaGeO_4$ (RE = Gd, Dy, and Ho) oxides and remarkable low-temperature magnetocaloric responses in $GdNaGeO_4$ oxide // *Journal of Materials Chemistry A*. 2025. Vol. 13. P. 19923–19932. DOI: 10.1039/D5TA00892A.
20. Gottschall T., Gràcia-Condal A., Fries M. et al. A multicaloric cooling cycle that exploits thermal hysteresis // *Nature Materials*. 2018. Vol. 17. P. 929–934. DOI: 10.1038/s41563-018-0166-6.
21. Pecharsky V.K., Gschneidner Jr.K.A. Giant Magnetocaloric Effect in $Gd_5(Si_2Ge_2)$ // *Physical Review Letters*. 1997. Vol. 78. P. 4494–4497. DOI: 10.1103/PhysRevLett.78.4494.
22. Lu B., Liu J. Mechanocaloric materials for solid-state cooling // *Science Bulletin*. 2015. Vol. 60. P. 1638–1643. DOI: 10.1007/s11434-015-0898-5.
23. Baranov S.A., Laroze D., Vargas P., Vazquez M. Domain structure of Fe-based microwires // *Physica B: Condensed Matter*. 2006. Vol. 372 (1-2). P. 324–327. DOI: 10.1016/j.physb.2005.10.077.
24. Zhukov A., Zhukova V., Blanco J.M. et al. Magnetostriction in glass-coated magnetic microwires // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2003. Vol. 258. P. 151–157. DOI: 10.1016/s0304-8853(02)01029-6.
25. Galdun L., Ryba T., Prid V.M. et al. Advances in the Fabrication and Magnetic Properties of Heusler Alloy Glass-Coated Microwires with high Curie Temperature // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2018. Vol. 453. P. 96. DOI: 10.20944/preprints202504.1176.v1.
26. Goryu A., Ikedo A., Ishida M., Kawano T. Nanoscale sharpening tips of vapor-liquid-solid grown silicon microwire arrays // *Nanotechnology*. 2010. Vol. 21 (12). P. 125302. DOI: 10.1088/0957-4484/21/12/125302.

References

1. Korolev D.V., Piskorskii V.P., Valeev R.A., Bakradze M.M., Dvoretzkaya E.V., Koplak O.V., Morgunov R.B. Rare-earth RE–TM–B micromagnets engineering (review). *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), pp. 44–60. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 08, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-44-60.
2. Dvoretzkaya E.V., Potapov M.V., Valeev R.A., Piskorsky V.P., Morgunov R.B. Magnetoresistance of microneedles (Pr, Dy)(Fe, Co)B. *Trudy VIAM*, 2025, no. 2 (144), pp. 46–59. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 10, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-1-46-59.
3. Dvoretzkaya E.V., Korolev D.V., Piskorskii V.P., Valeev R.A., Koplak O.V., Morgunov R.B. Magnetron sputtering of the iron shell and microinclusions in microwires PrDyFeCoB. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 2 (67), pp. 85–96. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 12, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-85-96.
4. Potočnik J., Nenadović M., Bundaleski N. et al. The influence of thickness on magnetic properties of nanostructured nickel thin films obtained by GLAD technique. *Materials Research Bulletin*, 2016, vol. 84, pp. 455–461. DOI: 10.1016/j.materresbull.2016.08.044.
5. Kurenkov A., DuttaGupta S., Zhang C. et al. Artificial Neuron and Synapse Realized in an Antiferromagnet/Ferromagnet Heterostructure Using Dynamics of Spin–Orbit Torque Switching. *Advanced Materials*, 2019, vol. 31, p. 1900636. DOI: 10.1002/adma.201900636.
6. Thomson T. 10 - Magnetic properties of metallic thin films. *Metallic Films for Electronic, Optical and Magnetic Applications*, 2014, pp. 454–546. DOI: 10.1533/9780857096296.2.454.

7. Gordon E.B., Stepanov M.E., Kulish M.I. et al. The nanowires growth by laser ablation of metals inside rotating superfluid helium. *Laser Physics Letters*, 2019, vol. 16 (2), p. 026002. DOI: 10.1088/1612-202X/aaf6a1.
8. Lai C., Tsai W., Yang M. et al. A two-dimensional immunomagnetic nano-net for the efficient isolation of circulating tumor cells in whole blood. *Nanoscale*, 2019, vol. 11, p. 21119. DOI: 10.1039/C9NR06256D.
9. Kablov E.N., Kondrashov S.V., Melnikov A.A., Schur P.A. Application of functional and adaptive materials obtained by 3D printing (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 2 (108), pp. 32–51. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 17, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-32-51.
10. Algamili A.S., Md. Khir M.H., Dennis J.O. et al. A Review of Actuation and Sensing Mechanisms in MEMS-Based Sensor Devices. *Nanoscale Research Letters*, 2021, vol. 16 (16), p. 21. DOI: 10.1186/s11671-021-03481-7.
11. Chircov C., Grumezescu A.M. Microelectromechanical Systems (MEMS) for Biomedical Applications. *Micromachines*, 2022, vol. 13 (2), p. 164. DOI: 10.3390/mi13020164.
12. 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.
13. 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.
14. Pagliano S., Marschner D.E., Maillard D. et al. Micro 3D printing of a functional MEMS accelerometer. *Microsystems & Nanoengineering*, 2022, vol. 8 (105), pp. 1–11. DOI: 10.1038/s41378-022-00440-9.
15. 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.
16. Xie Y., Wang L., Na Y., Zhang Y. Magnetic properties and magnetocaloric responses in the Gd₆₀Al₂₀Cu₂₀ amorphous ribbon. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2025, vol. 658, p. 123526. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2025.123526.
17. Chen W., Lin J., Wang X., Li L. Structural, magnetic, and cryogenic magnetocaloric properties of Gd₁₁O₁₀(SiO₄)(PO₄)₃ phosphosilicate. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2025, vol. 626, p. 173107. DOI: 10.1016/j.jmmm.2025.173107.
18. Gschneidner Jr.K.A., Pecharsky V.K., Tsokol A.O. Recent developments in magnetocaloric materials. *Reports on Progress in Physics*, 2005, vol. 68, pp. 1479–1539. DOI: 10.1088/0034-4885/68/6/R04.
19. Zhang Y., Na Y., Xie Y., Zhao X. Unveiling the structural and magnetic properties of RE-NaGeO₄ (RE = Gd, Dy, and Ho) oxides and remarkable low-temperature magnetocaloric responses in GdNaGeO₄ oxide. *Journal of Materials Chemistry A*, 2025, vol. 13, pp. 19923–19932. DOI: 10.1039/D5TA00892A.
20. Gottschall T., Gràcia-Condal A., Fries M. et al. A multicaloric cooling cycle that exploits thermal hysteresis. *Nature Materials*, 2018, vol. 17, pp. 929–934. DOI: 10.1038/s41563-018-0166-6.
21. Pecharsky V.K., Gschneidner Jr.K.A. Giant Magnetocaloric Effect in Gd₅(Si₂Ge₂). *Physical Review Letters*, 1997, vol. 78, pp. 4494–4497. DOI: 10.1103/PhysRevLett.78.4494.
22. Lu B., Liu J. Mechanocaloric materials for solid-state cooling. *Science Bulletin*, 2015, vol. 60, pp. 1638–1643. DOI: 10.1007/s11434-015-0898-5.
23. Baranov S.A., Laroze D., Vargas P., Vazquez M. Domain structure of Fe-based microwires. *Physica B: Condensed Matter*, 2006, vol. 372 (1-2), pp. 324–327. DOI: 10.1016/j.physb.2005.10.077.
24. Zhukov A., Zhukova V., Blanco J.M. et al. Magnetostriction in glass-coated magnetic microwires. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2003, vol. 258, p. 151–157. DOI: 10.1016/s0304-8853(02)01029-6.

25. Galdun L., Ryba T., Prid V.M. et al. Advances in the Fabrication and Magnetic Properties of Heusler Alloy Glass-Coated Microwires with high Curie Temperature. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2018, vol. 453, p. 96. DOI: 10.20944/preprints202504.1176.v1.
26. Goryu A., Ikedo A., Ishida M., Kawano T. Nanoscale sharpening tips of vapor-liquid-solid grown silicon microwire arrays. *Nanotechnology*, 2010, vol. 21 (12), p. 125302. DOI: 10.1088/0957-4484/21/12/125302.

Информация об авторах

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

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

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

Потапов Максим Викторович, инженер, 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, главный научный сотрудник, д.ф.-м.н., 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. Dvoretzkaya, Researcher, Candidate of Sciences (Phys. & Math.), FRC PCP MC RAS, office@icp.ac.ru; Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexey O. Kolmakov, First Category Engineer, FRC PCP MC RAS, office@icp.ac.ru

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

Maxim V. Potapov, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

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

Статья поступила в редакцию 13.11.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 28.11.2025.
The article was submitted 13.11.2025; approved and accepted for publication after reviewing 28.11.2025