

Научная статья

УДК 631.437.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-3-114-123

## АТТЕСТАЦИЯ ПРОДУКТОВ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ Ni В СВЕРХТЕКУЧЕМ ГЕЛИИ

Е.В. Дворецкая<sup>1, 2</sup>, М.В. Потапов<sup>1</sup>, В.П. Пискорский<sup>1</sup>, А.О. Колмаков<sup>2</sup>, Р.Б. Моргунов<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН, Черноголовка, Московская обл., Россия; office@icp.ac.ru

**Аннотация.** Изучены магнитные свойства тонких ( $d < 4$  нм) никелевых нанопроволок, полученных методом лазерной абляции металлической мишени в сверхтекучем гелии. Обнаружено, что при малых концентрациях Ni образцы обладают прямоугольной петлей гистерезиса, становящейся пологой при увеличении концентрации Ni на поверхности подложки. На поздних стадиях лазерной абляции растет концентрация и диаметр круглых наночастиц Ni, что способствует уменьшению коэрцитивной силы наносетки и отклонению формы петли гистерезиса от прямоугольной.

**Ключевые слова:** ферромагнитные нанопроволоки, наночастицы, наносетки, наномagnеты, лазерная абляция, переходные металлы, магнитный гистерезис

**Для цитирования:** Дворецкая Е.В., Потапов М.В., Пискорский В.П., Колмаков А.О., Моргунов Р.Б. Аттестация продуктов лазерной абляции Ni в сверхтекучем гелии // Труды ВИАМ. 2026. № 3 (157). С. 114–123. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-3-114-123.

Scientific article

## QUALIFICATION OF Ni LASER ABLATION PRODUCTS IN SUPERFLUID HELIUM

E.V. Dvoretzkaya<sup>1, 2</sup>, M.V. Potapov<sup>1</sup>, V.P. Piskorsky<sup>1</sup>, A.O. Kolmakov<sup>2</sup>, R.B. Morgunov<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup>Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

<sup>2</sup>Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry RAS, Chernogolovka, Moscow region, Russia; office@icp.ac.ru

**Abstract.** Vacuum annealing of the initially amorphous microwire of the (PrDy)–(CoFe)–B composition the magnetic properties of thin ( $d < 4$  nm) nickel nanowires obtained by laser ablation of a metal target in superfluid helium were studied. It has been found that at low Ni concentrations the samples have a rectangular hysteresis loop, which becomes flatter with increasing Ni concentration on the substrate surface. At late stages of laser ablation the concentration and diameter of round Ni nanoparticles increase, which contributes to a decrease in the coercive force of the nanogrid and a deviation of the hysteresis loop shape from a rectangular one.

**Keywords:** ferromagnetic nanowires, nanoparticles, nanomeshes, nanomagnets, laser ablation, transition metals, magnetic hysteresis

**For citation:** Dvoretzkaya E.V., Potapov M.V., Piskorsky V.P., Kolmakov A.O., Morgunov R.B. Qualification of Ni laser ablation products in superfluid helium. *Trudy VIAM*, 2026, no. 3 (157), pp. 114–123. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-3-114-123.

## Введение

Большой практический интерес представляет проблема создания материала для наиболее эффективной реализации магнитных устройств неразрушающего контроля и магнитной записи информации [1–4]. Требования, предъявляемые к подобным материалам, достаточно высоки: для плотной записи материал необходимо разделить на небольшие намагниченные области, не взаимодействующие или слабо взаимодействующие друг с другом; для надежного и долгосрочного хранения информации каждая из областей должна обладать максимально медленно релаксирующим при комнатных температурах магнитным моментом. Направление момента каждой области должно быть строго задано его одноосной магнитной анизотропией (прямоугольность петли гистерезиса) для однозначности записи, при этом ось анизотропии должна быть ориентирована в определенном направлении (как правило, out-of-plane, т. е. перпендикулярно подложке) для более удобной реализации процессов считывания и записи. В настоящее время хорошее соответствие указанным и другим требованиям демонстрируют нанопленки, однако они обладают рядом недостатков [5, 6], среди которых зависимость намагниченности от шероховатости пленки и размера составляющих ее структурных элементов, а также зависимость анизотропии от состояния подложки. В качестве альтернативы можно рассматривать ферромагнитные нанопроволоки, обладающие необходимой одноосной анизотропией из-за своей геометрической формы [7], сохраняющимися при комнатной температуре ферромагнитными свойствами и достаточно небольшими размерами, чтобы обеспечить высокую плотность записи.

Важность анализа ферромагнитных нанопроволок и наносеток соответствует современной тенденции по разработке магнитных логических устройств, где большое внимание специалистов уделяется объектам, имитирующим нейрофизические системы [8, 9]. Ферромагнитные материалы обладают уникальными свойствами, позволяющими создавать структуры, способные воспроизводить поведение сложных природных систем – нейронных сетей головного мозга. Гальванические и магнитные отклики искусственной металлической сетки могут использоваться для разработки нового вида вычислительных систем, удовлетворяющих требованиям искусственного интеллекта. Серия современных исследований магнитных наносетей представлена в работах [10, 11]. Искусственные наносетки применяются для захвата редких живых клеток из биологических смесей, что позволяет повысить эффективность диагностики заболеваний и медицинских процедур [12]. Этот подход основан на способности ферромагнитных частиц избирательно взаимодействовать с клеточными структурами, обеспечивая высокую точность и надежность методик. Кроме того, исследование магнитных свойств ферромагнитных наносеток представляет интерес для математики, поскольку позволяет моделировать новые решения классических дифференциальных уравнений. Обнаружено, что такие структуры способны формировать устойчивые конфигурации магнитного момента, что открывает возможности для изучения фундаментальных законов физики и математики, связанных с поведением динамических систем [13]. Важность анализа ферромагнитных нанопроволок и наносеток выходит далеко за рамки традиционных областей техники, физики и информатики, охватывая биологию, медицину и даже абстрактные разделы математики, делая этот объект одним из наиболее перспективных направлений современных междисциплинарных исследований.

Для получения магнитного квазиодномерного материала на основе нанопроволок и наносеток разработано множество методов. В основном они сводятся к химическому синтезу с организацией пространственного шаблона, который ограничивал бы рост в радиальном направлении, но поддерживал в аксиальном. Однако при использовании существующих методов сталкиваются с рядом существенных ограничений. Во-первых,

большинство из них ограничены выбором исходного материала для изготовления нанопроволок, что значительно сужает спектр применяемых веществ и снижает универсальность подхода. Во-вторых, процесс требует высокой степени контроля за структурой шаблона, необходимого для формирования строго ориентированных волокон, однако добиться такого точного позиционирования крайне сложно, особенно на уровне нескольких десятков нанометров. Это существенно затрудняет получение тонких одномерных структур с равномерным диаметром, необходимых для ряда практических применений. Еще одна серьезная проблема существующих методов – высокая степень загрязнения конечных продуктов посторонними веществами, используемыми в процессе синтеза. Эти вещества часто остаются в структуре готового изделия, снижая его физические свойства и стабильность. Примеси оказывают негативное воздействие на характеристики материала, снижая эффективность взаимодействия магнитных полей и увеличивая потери энергии при эксплуатации изделий. Поэтому разработка альтернативных методов, позволяющих минимизировать эти недостатки, становится актуальной научной задачей современности. Важно отметить, что многие исследователи стремятся разработать методы, исключающие необходимость строгого подбора материала, допускающие использование широкого спектра соединений, а также обладающие возможностью контролировать толщину и диаметр наноструктур на этапе синтеза.

В данной работе рассматривается альтернативный метод получения нанопроволок и наносеток методом лазерной абляции в сверхтекучем гелии, предложенный Е.Б. Гордоном с соавторами [14], позволяющий получать нанобъекты разной размерности – нанопроволоки, пленки, наносетки и наночастицы практически из любых веществ, в том числе и из ферромагнитных материалов.

Цель работы направлена на визуализацию постепенного преобразования наносетки из никеля, состоящей из нанопроволок и наночастиц, а также на анализ сопутствующих изменений магнитных свойств сетки при увеличении продолжительности лазерной абляции.

### **Материалы и методы**

Наносетка, нанопроволоки и наночастицы Ni получены методом лазерной абляции в криостате со сверхтекучим гелием (He II) [15]. Криостат оснащен системой лазерной фокусировки, кварцевым окном, мишенью из Ni, постоянным магнитом и подложкой из Si (рис. 1). Этот метод основан на росте нанопроволок в квантовых вихрях He II (рис. 1), которые известны как одномерные возбуждения, возникающие в жидком He. Когда металлические частицы и кластеры притягиваются к центру вихря, их движение становится ограниченным силой Бернулли [16]. Аксиальное направление вдоль оси вихря становится благоприятным для роста нанопроволок. Результирующий диаметр получаемых нанопроволок переходных металлов составляет  $\sim(2-5)$  нм и определяется теплофизическими параметрами материала [17, 18]. Эти параметры схожи для многих сплавов и металлов, традиционно используемых для создания нанопроволок в жидком He II, что обеспечивает универсальность метода. Лазерная абляция в He II приводит к образованию наночастиц, количество и размер которых увеличиваются с увеличением продолжительности абляции и концентрации Ni.

Изображения наносетки получены с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ). Рентгенограммы наносетки получены на просвечивающем электронном микроскопе. Магнитный момент одиночной наночастицы, атомно-силовые и магнитосиловые изображения наносетки получены с помощью атомно-силового микроскопа, магнитный гистерезис наносетки – с помощью SQUID-магнитометра.

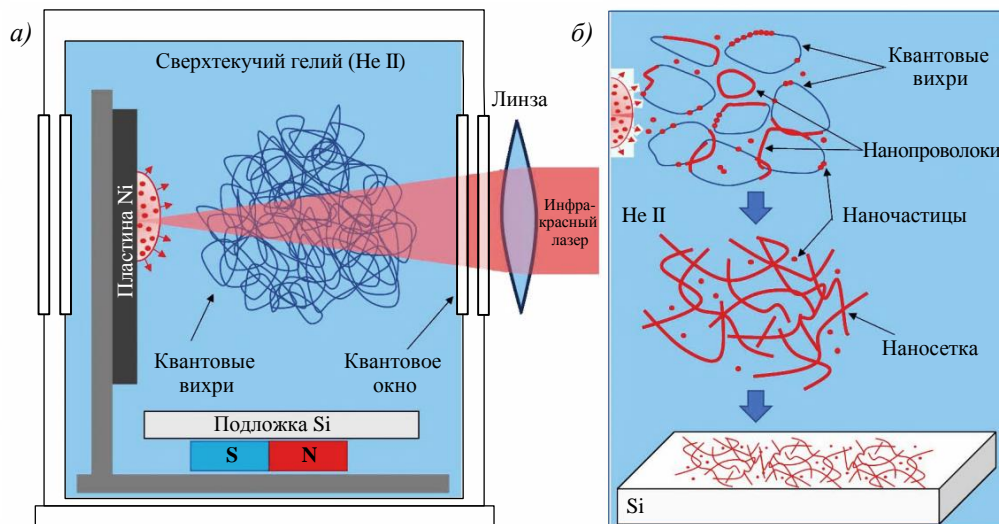


Рис. 1. Схема лазерно-индуцированного испарения никеля (а), сопровождающегося созданием квантовых вихрей в He II; атомы и кластеры никеля, захваченные вихрями (б). Удлиненные сегменты нанопроволок пересекаются и приводят к образованию наносетки, содержащей наночастицы. Все продукты, притянутые постоянным магнитом, осаждаются на подложке из Si

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 РАН.

### Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлена серия изображений продуктов абляции никеля, полученных методом СЭМ. При сравнительно малых временных интервалах абляции (10 и 20 мин на рис. 2) наносетка состоит преимущественно из нанопроволок, средняя длина свободных сегментов которых составляет  $\sim 200$  нм. Такая форма обусловлена особенностями механизма образования наноструктур в процессе абляции, где быстрый нагрев и охлаждение приводят к формированию вытянутых структур. С увеличением продолжительности абляции до 30 и 60 мин (рис. 2) помимо удлиненных нанопроволок в наносетке формируются сферические наночастицы, диаметр которых может достигать 250 нм, что обусловлено накоплением атомов никеля в областях роста. Эти изменения позволяют сделать вывод о существовании критического временного порога, после которого основной механизм роста переходит от продольного вытягивания нанопроволок к формированию изолированных сферических наночастиц. Данная закономерность важна для понимания динамики процессов формирования наноструктур и имеет прикладное значение для целенаправленного управления формой и размерами создаваемых нанобъектов.

На рис. 3 представлены электронограммы наносетки после 10 и 60 мин абляции. На рентгенограмме наносетки после 10 мин абляции не обнаружено точечных рефлексов (рис. 3, а), в то время как на рентгенограмме наносетки после 60 мин абляции наблюдаются четкие рефлексы (рис. 3, б). Таким образом, идентифицируются поликристаллическая структура наночастиц Ni, которые дают рефлексы на поздних стадиях абляции, когда наночастицы появляются, а также сильно разупорядоченная аморфная или нанокристаллическая структура нанопроволок, которые присутствуют и на начальной стадии, однако рефлексов не дают. Кристаллическая структура наночастиц

предполагает, что они не могут состоять из аморфных нанопроволок, свернутых в клубки. Поэтому существуют следующие два механизма увеличения размера шаров:

- рост поликристаллических шаров, зародившихся во время абляции за счет абсорбции никеля;
- наматывание аморфных нанопроволок на наночастицы, полученные в результате абляции.

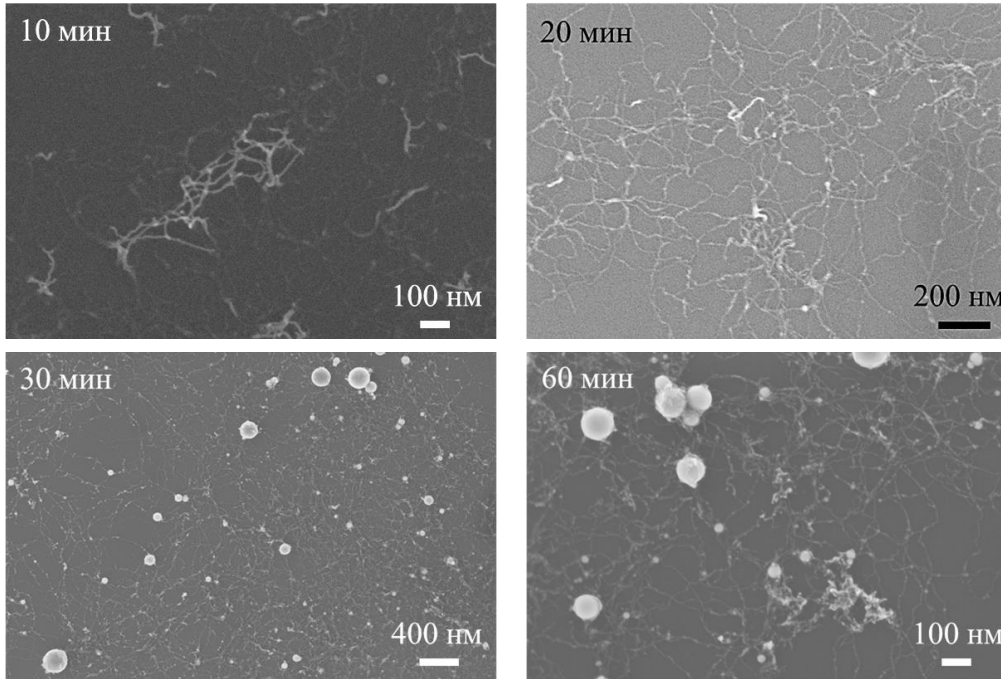


Рис. 2. СЭМ-изображения наносетки из никеля при разной продолжительности абляции

Можно предположить, что аморфные нанопроволоки образуются при очень высокой скорости охлаждения в вихрях He, в то время как поликристаллические наночастицы растут при более низкой скорости охлаждения в объеме сверхтекучего He.

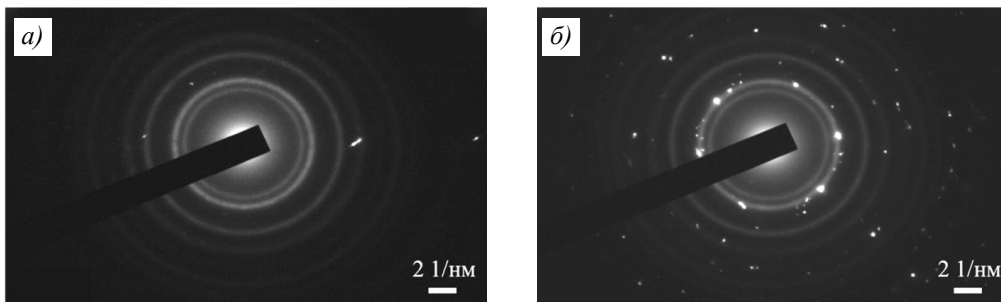


Рис. 3. Рентгенограммы наносетки, состоящей из нанопроволок, после 10 мин абляции (а) и наносетки, состоящей из нанопроволок и наночастиц, после 60 мин абляции (б)

На рис. 4, а–г представлены петли гистерезиса магнитного момента наносетки Ni на разных этапах абляции, которые наглядно демонстрируют динамику изменения магнитных свойств наносетки в зависимости от продолжительности лазерной абляции. Все измерения проводили при комнатной температуре и в геометрии *in-plane*, поскольку сигнал в направлении, перпендикулярном плоскости подложки, практически не наблюдался. Замечено, что на фоне монотонного возрастания намагниченности

насыщения происходит монотонное убывание коэрцитивной силы (рис. 4, *д*). Петли гистерезиса представлены после вычитания диамагнитного вклада кремниевой подложки. Нарастание магнитного момента наносетки происходит из-за увеличения количества никеля, осевшего на подложку, с ростом продолжительности абляции. Поскольку условия абляции постоянны, предполагается, что рост массы никеля и его магнитного момента на подложке прямо пропорционален продолжительности лазерной абляции.

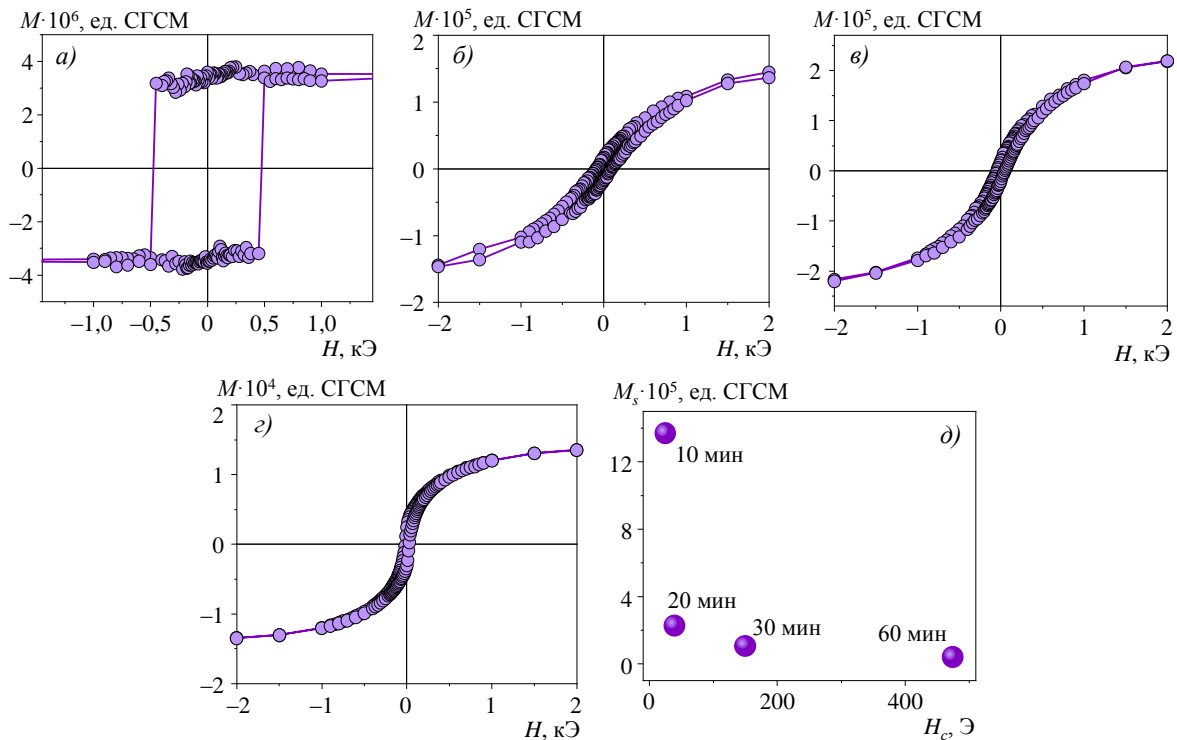


Рис. 4. Петли магнитного гистерезиса для наносетки из никеля при продолжительности абляции 10 (*а*), 20 (*б*), 30 (*в*) и 60 мин (*г*); *д* – зависимость намагниченности насыщения  $M_s$  от коэрцитивной силы  $H_c$  для разной продолжительности абляции (СГСМ – Centimetre-Gramme-Second-Magnetic – электромагнитная система СГС)

При малых концентрациях Ni в наносетке (абляция в течение 10 мин) петля гистерезиса имеет строго прямоугольный вид (рис. 4, *а*) с коэрцитивной силой  $\sim 480$  Э. Такая петля характерна для ансамбля несуперпарамагнитных невзаимодействующих магнитных стрелок. В этом случае каждая нанопроволока обладает магнитным моментом, который может быть направлен вдоль легкой оси, меняя направление скачком по достижении порогового значения перемангнивающего поля. Вклады в измеряемую намагниченность от отдельных нанопроволок (индивидуальные прямоугольные петли) суммируются, и результирующая петля приобретает приблизительно прямоугольный вид. Увеличение концентрации Ni ведет, помимо увеличения намагниченности насыщения и уменьшения коэрцитивной силы, к появлению заметного наклона и сглаживанию петли (рис. 4, *б–г*). Такое поведение кривых намагниченности может быть связано с двумя факторами:

- с ростом концентрации нанопроволок, когда происходит их сближение, которое вызывает дипольное магнитное взаимодействие между магнитными моментами соседних проволок;

- с наличием сферических наночастиц Ni, у которых иная магнитная анизотропия по сравнению с нанопроволоками, либо они механически вращаются под действием поля.

На рис. 5 представлены атомно-силовое (рис. 5, *a*) и магнитосиловое (рис. 5, *б*) изображения наносетки после 30 мин абляции. Атомно-силовые изображения одиночной наночастицы записаны в режимах магнитосиловой и атомно-силовой микроскопии (рис. 5, *в*).

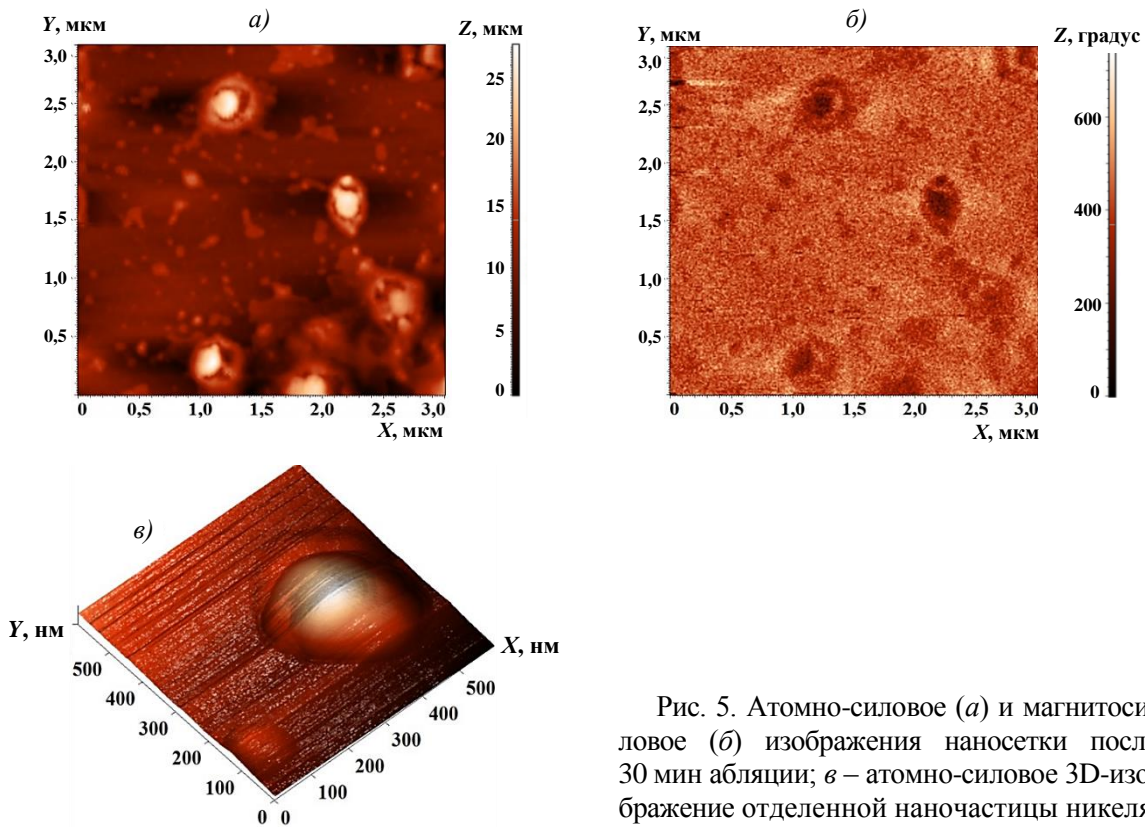


Рис. 5. Атомно-силовое (*a*) и магнитосиловое (*б*) изображения наносетки после 30 мин абляции; *в* – атомно-силовое 3D-изображение отделенной наночастицы никеля

Магнитосиловая микроскопия позволяет визуализировать распределение магнитных полей вблизи поверхности образца и получать количественную оценку магнитных характеристик отдельных наночастиц. Определение магнитного момента ( $\mu$ ) отдельной наночастицы методом магнитосиловой микроскопии описано в работе [19]. Экспериментально установлено, что магнитный момент одной сферической наночастицы Ni диаметром 75 нм составляет  $\mu = 4,5 \cdot 10^{-19} \text{ А} \cdot \text{м}^2$ , а теоретически рассчитанное значение –  $\mu = M_S \pi d^3 / 6 = 4,2 \cdot 10^{-19} \text{ А} \cdot \text{м}^2$  при табличных значениях намагниченности насыщения никеля  $M_S$ . Разница между экспериментальным и теоретическим значениями магнитного момента (~10 %) объясняется различием реальных условий эксперимента и упрощенной моделью расчетов. Возможные факторы включают поверхностные эффекты, неоднородность распределения напряженностей поля вокруг наночастицы, отклонения от идеальной сферической формы и другие микроскопические особенности структуры.

### Заключения

Методом лазерной абляции в среде сверхтекучего гелия получены образцы никелевой наносетки с различной концентрацией нанопроволок и наночастиц на поверхности подложки из кремния. При малых концентрациях Ni на подложке из Si петля магнитного гистерезиса при температуре 300 К – широкая и прямоугольная, при увеличении концентрации Ni петля гистерезиса – узкая и пологая, что, по-видимому, обусловлено двумя факторами:

– близко расположенные нанопроволоки за счет слабого магнитного взаимодействия начинают вести себя приблизительно как стонер-вольфартовские частицы, обладающие суперпарамагнетизмом при комнатной температуре;

– на общую картину гистерезиса влияет некоторое содержание сферических наночастиц.

Количество наночастиц Ni возрастает при увеличении экспозиции быстрее, чем число нанопроволок. Наночастицы вносят значительный вклад как в наклон кривых гистерезиса за счет суперпарамагнитного поведения малых частиц, так и в уменьшение коэрцитивной силы из-за возможного накопления наночастиц большего диаметра.

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

### 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: 28.05.2025). 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. Магниево-алюминиевые сплавы в конструкции изделий навигационной системы // Авиационные материалы и технологии. 2024. № 3 (76). С. 25–34. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 28.05.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-3-25-34.
3. 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: 28.05.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-1-46-59.
4. Потапов М.В., Валеев Р.А., Моргунов Р.Б., Пискорский В.П. Свойства спеченных магнитов (Pr, Nd, Ce, Dy)(Fe, Co)B, полученных из неочищенных редкоземельных металлов // Труды ВИАМ. 2025. № 2 (144). С. 65–74. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.05.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-2-65-74.
5. 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.
6. Thomson T. Magnetic properties of metallic thin films // Metallic Films for Electronic, Optical and Magnetic Applications. Woodhead Publishing, 2014. P. 454–546. DOI: 10.1533/9780857096296.2.454.
7. O’Handley R.C. Modern magnetic materials: principles and applications. New York, USA: Wiley, 2000. 768 p.
8. Kittel C. Theory of the Structure of Ferromagnetic Domains in Films and Small Particles // Physical Review. 1946. Vol. 70. P. 965. DOI: 10.1103/PhysRev.70.965.
9. Vajda F., Torre E.D. Characteristics of the complete moving hysteresis model // Journal of Applied Physics. 1993. Vol. 73. P. 5833. DOI: 10.1063/1.353542.
10. 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.
11. 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.
12. Mateo D., Eloranta J., Williams G.A. Interaction of ions, atoms, and small molecules with quantized vortex lines in superfluid 4He // Journal of Chemical Physics. 2015. Vol. 142 (6). P. 064510. DOI: 10.1063/1.4907597.

13. 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.
14. Gordon E.B., Nishida R., Nomura R., Okuda Y. Filament formation by impurities embedding into superfluid helium // *JETP Letters*. 2007. Vol. 85. P. 581–584.
15. Bürger D., Zhou S., Höwler M. et al. *Subsecond Annealing of Advanced Materials*. Springer International Publishing Switzerland, 2014. Vol. 192. P. 15–33. DOI: 10.1007/978-3-319-03131-6\_2.
16. Lin Y., Zhou S., Sheehan S.W., Wang D. Nanonet-Based Hematite Heteronanostructures for Efficient Solar Water Splitting // *Journal of the American Chemical Society*. 2011. Vol. 133. No. 8. P. 2398–2401. DOI: 10.1021/ja110741z.
17. Saitoh E., Tanaka M., Miyajima H., Yamaoka T. Domain-wall trapping in a ferromagnetic nanowire network // *Journal of Applied Physics*. 2003. Vol. 93. P. 7444–7446. DOI: 10.1063/1.1544499.
18. Labbé S., Privat Y., Trélat E. Stability properties of steady-states for a network of ferromagnetic nanowires // *Journal of Differential Equations*. 2012. Vol. 253. P. 1709–1728. DOI: 10.1016/j.jde.2012.06.005.
19. Tian F., Huang Z.P., Whitmore L. Fabrication and magnetic properties of Ni nanowire arrays with ultrahigh axial squareness // *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2012. Vol. 14. P. 8537–8541. DOI: 10.1039/C2CP40892A.

### 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: May 28, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-111-120.
2. Leonov A.A., Trofimov N.V., Panaetov V.G., Kudasov S.V., Shirokozhuikov 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: May 28, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-3-25-34.
3. Dvoret'skaya 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. 1 (143), pp. 46–59. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 28, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-1-46-59.
4. Potapov M.V., Valeev R.A., Morgunov R.B., Piskorsky V.P. Properties of sintered magnets (Pr, Nd, Ce, Dy)(Fe, Co)B obtained from unrefined rare earth metals. *Trudy VIAM*, 2025, no. 2 (144), pp. 65–74. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 28, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-2-65-74.
5. 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, pp. 455–461. DOI: 10.1016/j.materresbull.2016.08.044.
6. Thomson T. *Magnetic properties of metallic thin films. Metallic Films for Electronic, Optical and Magnetic Applications*. Woodhead Publishing, 2014, pp. 454–546. DOI: 10.1533/9780857096296.2.454.
7. O'Handley R.C. *Modern magnetic materials: principles and applications*. New York, USA: Wiley, 2000, 768 p.
8. Kittel C. Theory of the Structure of Ferromagnetic Domains in Films and Small Particles. *Physical Review*, 1946, vol. 70, p. 965. DOI: 10.1103/PhysRev.70.965.
9. Vajda F., Torre E.D. Characteristics of the complete moving hysteresis model. *Journal of Applied Physics*, 1993, vol. 73, p. 5833. DOI: 10.1063/1.353542.
10. 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.

11. 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.
12. Mateo D., Eloranta J., Williams G.A. Interaction of ions, atoms, and small molecules with quantized vortex lines in superfluid  $^4\text{He}$ . *Journal of Chemical Physics*, 2015, vol. 142 (6), p. 064510. DOI: 10.1063/1.4907597.
13. 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.
14. Gordon E.B., Nishida R., Nomura R., Okuda Y. Filament formation by impurities embedding into superfluid helium. *JETP Letters*, 2007, vol. 85, pp. 581–584.
15. Bürger D., Zhou S., Höwler M. et al. *Subsecond Annealing of Advanced Materials*. Springer International Publishing Switzerland, 2014, vol. 192, pp. 15–33. DOI: 10.1007/978-3-319-03131-6\_2.
16. Lin Y., Zhou S., Sheehan S.W., Wang D. Nanonet-Based Hematite Heteronanostructures for Efficient Solar Water Splitting. *Journal of the American Chemical Society*, 2011, vol. 133, no. 8, pp. 2398–2401. DOI: 10.1021/ja110741z.
17. Saitoh E., Tanaka M., Miyajima H., Yamaoka T. Domain-wall trapping in a ferromagnetic nanowire network. *Journal of Applied Physics*, 2003, vol. 93, pp. 7444–7446. DOI: 10.1063/1.1544499.
18. Labbé S., Privat Y., Trélat E. Stability properties of steady-states for a network of ferromagnetic nanowires. *Journal of Differential Equations*, 2012, vol. 253, pp. 1709–1728. DOI: 10.1016/j.jde.2012.06.005.
19. Tian F., Huang Z.P., Whitmore L. Fabrication and magnetic properties of Ni nanowire arrays with ultrahigh axial squareness. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2012, vol. 14, pp. 8537–8541. DOI: 10.1039/C2CP40892A.

#### Информация об авторах

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

**Потапов Максим Викторович**, техник 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

**Колмаков Алексей Олегович**, инженер 1 категории, ФИЦ ПХФ и МХ РАН, office@icp.ac.ru

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

#### Information about the authors

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

**Maxim V. Potapov**, First Category Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

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

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

Статья поступила в редакцию 03.07.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 03.07.2025.  
The article was submitted 03.07.2025; approved and accepted for publication after reviewing 03.07.2025.