

ISSN 1561-8331 (Print)
ISSN 2524-2342 (Online)
УДК 361.3.06; 621.382
<https://doi.org/10.29235/1561-8331-2020-56-4-399-407>

Поступила в редакцию 28.09.2020
Received 28.09.2020

Е. Е. Шумская¹, А. А. Рогачев¹, В. Е. Агабеков¹, Е. М. Довыденко¹, А. В. Петкевич¹,
И. В. Корольков², А. Л. Козловский², М. В. Здоровец³, В. Д. Бундюкова⁴,
Д. В. Якимчук⁴, Е. Ю. Каниуков⁵

¹Институт химии новых материалов Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

²Астанинский филиал института ядерной физики, Нур-Султан, Казахстан

³Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева, Нур-Султан, Казахстан

⁴Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению,
Минск, Беларусь

⁵Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

НАНОТРУБКИ СО СТРУКТУРОЙ ТИПА «МАГНИТНОЕ ЯДРО–ОБОЛОЧКА ИЗ БЛАГОРОДНОГО МЕТАЛЛА»

Аннотация. С использованием простого двухстадийного метода, включающего электрохимический синтез Ni нанотрубок в порах ПЭТФ-мембран и их покрытие золотом или платиной химическим методом, синтезированы нанотрубки со структурой типа «магнитное ядро–оболочка из благородного металла». Морфология покрытия представляет собой тонкие постоянные пленки с наростами различной формы. Рентгеноструктурный анализ выявил отдельные фазы никеля (ядро) и благородного металла (покрытие). Магнитные свойства покрытых нанотрубок существенно не отличаются от свойств исходных нанотрубок. Метод позволяет синтезировать одномерные наноструктуры типа «магнитное ядро–оболочка из благородного металла» для применения при детектировании химических и биологических соединений, в качестве магнитных носителей при доставке лекарств и генов, а также могут быть использованы в качестве многоциклических катализаторов на магнитном носителе.

Ключевые слова: шаблонный синтез, нанотрубки, магнитные свойства, плазмонные покрытия, платина, золото

Для цитирования. Нанотрубки со структурой типа «магнитное ядро–оболочка из благородного металла» / Е. Е. Шумская [и др.] // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2020. – Т. 56, № 4. – С. 399–407. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2020-56-4-399-407>

Е. Е. Shumskaya¹, А. А. Rogachev¹, V. E. Agabekov¹, E. M. Dovydenko¹, A. V. Petkevich¹, I. V. Korolkov²,
A. L. Kozlovskiy², M. V. Zdorovets³, V. D. Bundyukova⁴, D. V. Yakimchuk⁴, E. Yu. Kaniukov⁵

¹Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Science of Belarus, Minsk, Belarus

²Astana branch of the Institute of Nuclear Physics, Nur-Sultan, Republic of Kazakhstan

³L. N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan,

⁴Scientific and Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

⁵Research Technological University «MISIS», Moscow, Russia

NANOTUBES WITH A STRUCTURE OF THE «MAGNETIC CORE–NOBLE METAL SHELL» TYPE

Abstract. Using a simple two-stage method including the electrochemical synthesis of Ni nanotubes in the pores of PET membranes and their coating with gold or platinum, nanotubes with a structure of the «magnetic core – noble metal shell» type have been synthesized. The morphology of the coating is a thin continuous film with growths of various shapes. X-ray diffraction analysis estimated separate phases of nickel (core) and noble metal (coating). The magnetic properties of coated nanotubes do not differ significantly from the properties of the initial nanotubes. The method allows one to synthesize structures such as one-dimensional nanostructures of the «magnetic core – noble metal shell» type for use in the detection of chemical and biological compounds, as magnetic carriers for the delivery of drugs and genes, which can also be used as multicyclic catalysts on a magnetic carrier.

Keywords: template synthesis, nanotubes, magnetic properties, plasmonic coatings, platinum, gold

For citation. Shumskaya E. E., Rogachev A. A., Agabekov V. E., Dovydenko E. M., Petkevich A. V., Korolkov I. V., Kozlovskiy A. L., Zdorovets M. V., Bundyukova V. D., Yakimchuk D. V., Kaniukov E. Yu. Nanotubes with a structure of the «magnetic core–noble metal shell» type. *Vestsi Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical Series*, 2020, vol. 56, no. 4, pp. 399–407. (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2020-56-4-399-407>

Введение. Металлические наноструктуры (НС) широко изучаются благодаря их уникальным оптическим, электромагнитным и каталитическим свойствам. Большое количество работ посвящено синтезу, определению структурных, электрических и магнитных свойств, созданию сложной структуры массивов нанопроволок (НП) и нанотрубок (НТ) [1], в том числе и многослойных [2, 3], моделированию физических свойств [4], а также использованию одиночных НТ/НП и их массивов для нанoeлектронных устройств [5], для катализа [6], магнитной записи высокой плотности [7] и в биоприложениях [8, 9]. НТ/НП могут быть синтезированы методом шаблонного синтеза, при этом наиболее эффективным способом является электроосаждение, позволяющее контролировать структуру, элементный и фазовый составы путем варьирования условий осаждения [7, 10, 11].

Для использования НС в различных рабочих условиях (широкий диапазон рН, биологические объекты) в качестве оптических элементов, магнитных сенсоров, контрастных жидкостей, систем доставки лекарств и катализаторов [12–15] требуется покрытие, способное защитить НС от деградации. Наиболее химически стойкими и биологически безопасными материалами для покрытий считаются благородные металлы: золото и платина [16, 17], которые могут обеспечить новые полезные свойства и снизить токсикологический эффект металлического ядра. Кроме того, покрытия из благородных металлов позволяют использовать композитные НС для приложений *in vivo* и *in vitro*. Для формирования золотой или платиновой оболочки вокруг металлических НС рассматривают два основных метода: (1) прямое осаждение на поверхность и (2) не прямое осаждение через «медиаторный» слой.

Прямое осаждение благородных металлов можно проводить из водного раствора или из органической фазы. Для золота самым распространенным методом является осаждение Au из хлорида добавлением цитрата натрия [18]. Опосредованный метод имеет поэтапный подход, когда на первом этапе происходит создание «медиаторного» слоя на поверхности магнитных НС, а затем осуществляется осаждение золота на его поверхность. Покрытиям НС платиной в литературе уделено недостаточно внимания. В этом случае обычно рассматривается соосаждение с образованием твердого раствора компонентов [19].

Стоит отметить, что Ni@Au и Ni@Pt НТ за счет своей нетривиальной морфологии, магнитной природы и поверхности из благородного металла могут получить ряд новых интересных направлений для применения в катализе, при детектировании химических и биологических соединений, а также в качестве магнитных носителей при доставке лекарств и генов.

Учитывая недостаточное количество исследований в области получения и исследования НТ со структурой типа «магнитное ядро–оболочка из благородного металла», наша работа посвящена получению Ni@Au и Ni@Pt НТ двухстадийным методом, включающим электроосаждение магнитного металла в поры шаблонов и формирование покрытия из благородного металла, таких как золото и платина, на поверхности высвобожденных из шаблона НТ, а также комплексное исследование их морфологии, структуры, магнитных характеристик.

Экспериментальная часть. Синтез НТ «магнитное ядро–оболочка из благородного металла» проводился в две стадии (рис. 1): сначала были синтезированы Ni НТ в порах ионно-трековых мембран электрохимическим методом, а затем на поверхности НТ создавалась оболочка из благородного металла за счет восстановления золота или платины на никеле.

В качестве шаблонов использовали трековые мембраны на основе полиэтилентерефталата (ПЭТФ) толщиной 12 мкм (диаметр пор 380 нм, плотность $4 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2}$) [20–23]. Электрохимическое осаждение проводили при напряжении 1,75 В из электролита $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (100 г/л), H_3BO_3 (45 г/л) при комнатной температуре.

Золотое покрытие на поверхности Ni НТ формировалось осаждением из 0,01 М водного раствора хлорида золота и 1 % плавиковой кислоты [24] при 25 °С в течение 30 с. Платиновое покрытие на поверхности Ni НТ формировалось также осаждением из 0,01 М водного раствора гидрохлорида платины и 1 % плавиковой кислоты при 25 °С в течение 30 с. После реакции образцы промывали 3 раза слабым раствором гидроксида натрия и водой.

Определение структурных параметров проводили с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ, Hitachi TM3030), энергодисперсионного рентгеновского анализа (ЭДА, Bruker

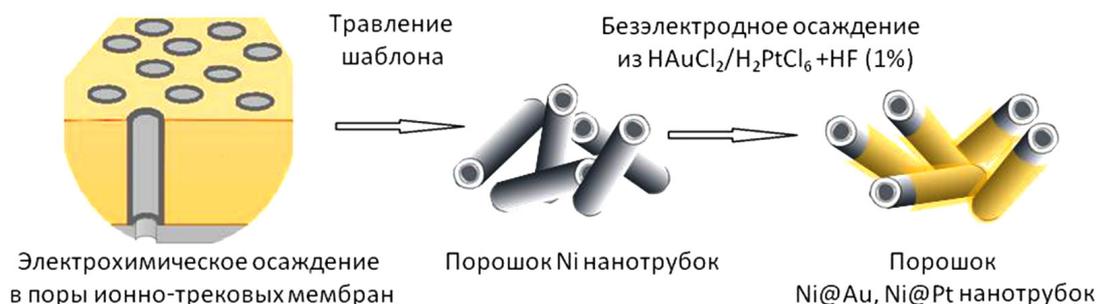


Рис. 1. Схема получения нанотрубок типа «магнитное ядро–оболочка из благородного металла»

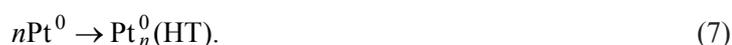
Fig. 1. Scheme of the production of the «magnetic core–noble metal shell» type nanotubes

XFlash MIN SVE), рентгеноструктурного анализа (РФА, Bruker D8 ADVANCE) с использованием излучения Cu K_α , просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ, JEOL JEM-100). Изучение диаметров пор и внутренних диаметров находящихся в ПЭТФ-шаблонах НТ велось манометрическим методом определения газопроницаемости [20], основанном на измерении изменения давления газа в замкнутой камере при давлении в интервале от 8 до 20 кПа с шагом 4 кПа.

Значения основных магнитных параметров определялись на основании данных вибромагнитометра универсальной измерительной системы «Liquid Helium Free High Field Measurement System (Cryogenic LTD)». Индукционным методом проводились измерения наведенной электродвижущей силы индукции в сигнальных катушках с намагниченным образцом, колеблющимся с определенной частотой в диапазоне магнитного поля $B = \pm 2$ Тл при комнатной температуре.

Результаты и их обсуждение. Синтезированные НС представляют собой полые трубки (вставка к рис. 2, а) длиной $8 \pm 0,2$ мкм и внешним диаметром, соответствующим диаметру пор 380 ± 20 нм (процесс электроосаждения был остановлен до начала фазы формирования «крышек» [25]). Внутренние диаметры никелевых НТ составляли 180 ± 20 нм, соответствующая толщина стенок – примерно 95 ± 20 нм. Определение элементного состава методом ЭДА показало, что НТ состоят из чистого никеля и не содержат примесей.

Второй этап получения НТ типа «магнитное ядро–оболочка из благородного металла» проводился за счет восстановления благородного металла на поверхности Ni по реакции замещения. Пошаговые механизмы образования наноструктур Au и Pt [26] на поверхности Ni НТ показаны в следующих уравнениях:



Анализ СЭМ-изображений Ni@Au (рис. 2, с) и Ni@Pt НТ (рис. 2, д) указывает на изменение морфологии поверхности НТ после проведения осаждения благородного металла. Видно, что на поверхности в обоих случаях образуется гранулированная пленка, однако провести анализ

размера отдельных гранул не представляется возможным. Уточнение морфологических особенностей поверхности проводилось посредством ПЭМ (рис. 3).

ПЭМ-изображение Ni@Au НТ свидетельствует, что при химическом восстановлении золота на поверхности Ni НТ происходит образование гранулированных наростов сложной геометрии и размерами до 15 нм, которые покрывают всю поверхность тонкой пленкой. Из анализа ПЭМ-изображения Ni@Pt указывает, что образование платинового покрытия происходит с образованием сферических наростов со средними размерами до 100 нм. Структурные параметры исследуемых НТ были вычислены по РФА-спектрам (рис. 2, *d* и 2, *f*) по методике, изложенной в [25], и приведены в таблице.

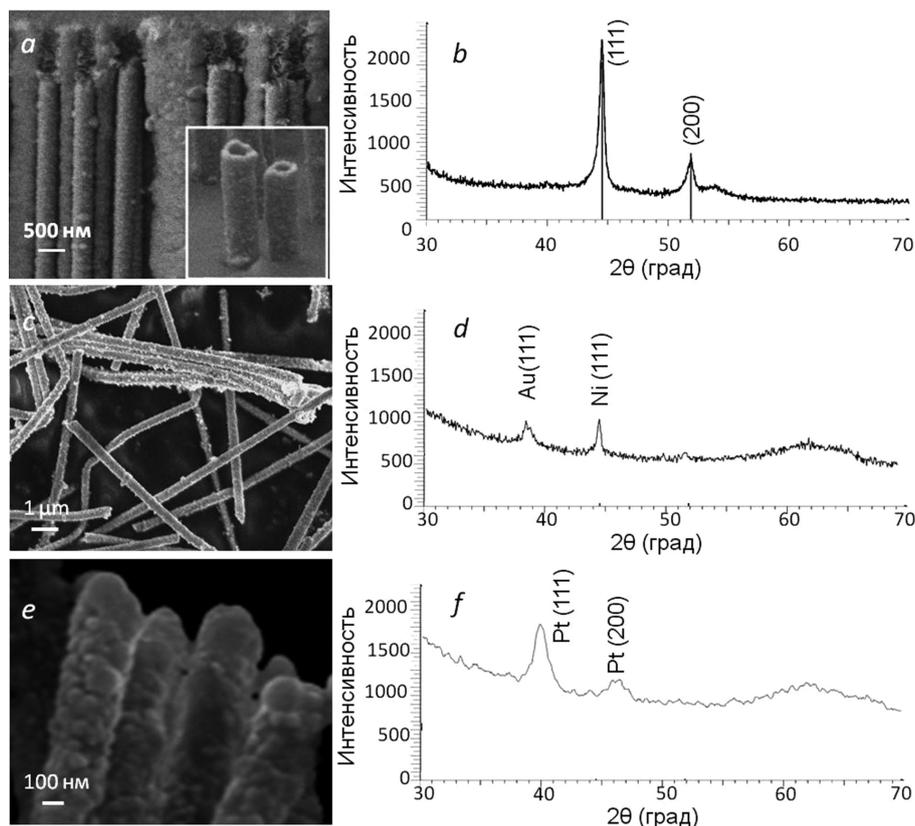


Рис. 2. Типичное СЭМ-изображение массива никелевых нанотрубок в полимерном шаблоне (*a*) и РФА-спектр Ni нанотрубок (*b*), Ni@Au нанотрубки (*c*) и их РФА-спектры: Ni (*b*), Ni@Au (*d*), Ni@Pt (*f*)

Fig. 2. Typical SEM image of an array of nickel nanotubes in a polymer template (*a*) and XRD spectrum of Ni nanotubes (*b*), Ni@Au nanotubes (*c*) and their XRD spectra: Ni (*b*), Ni@Au (*d*), Ni@Pt (*f*)

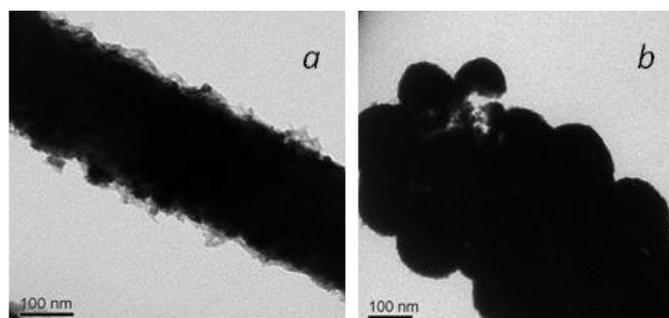


Рис. 3. ПЭМ-изображения Ni@Au (*a*) и Ni@Pt (*b*) нанотрубок

Fig. 3. TEM images of Ni@Au (*a*) and Ni@Pt (*b*) nanotubes

Структурныя параметры нанотрубок Ni, Ni@Au і Ni@Pt
Structural parameters of Ni, Ni@Au and Ni@Pt nanotubes

Показатель	Фаза	(hkl)	2θ°	d, Å	L, нм	a, Å	FWHM
Ni	Ni-Cubic Fm-3m(225)	111	44,599	2,03005	17,33	3,51760	0,550
		200	51,827	1,76264	15,61		0,629
		220	76,500	1,24424	17,67		0,636
Ni@Au	Ni-Cubic Fm-3m(225)	111	44,586	2,03061	26,36	3,51980	0,362
	Au-Cubic Fm-3m(225)	111	38,420	2,34109	12,29	4,06261	0,761
Ni@Pt	Ni-Cubic Fm-3m(225)	111	44,599	2,03005	17,33	3,52380	0,550
	Pt-Cubic Fm-3m(225)	111	40,221	2,24036	9,16	3,88868	1,027

Никелевые НТ имеют преимущественное направление роста (111), что также подтверждается большим соотношением пиков (111) на рентгеновских дифракционных спектрах. На рентгенограмме, записанной при углах дифракции $2\theta < 35^\circ$ и $2\theta = 53^\circ$, присутствуют пики, характерные для пленки ПЭТФ [27]. На рентгенограмме присутствуют уширенные пики, характерные для дифракции наноразмерных объектов. Исследования рентгеновских спектров показывают, что НТ имеют гранецентрированную кубическую (ГЦК) структуру. Параметр решетки a составляет $3,5176 \pm 0,0007 \text{ \AA}$, а средний размер кристаллитов – $17,5 \pm 1,1 \text{ нм}$.

У Ni@Au НТ на дифрактограмме образцов наблюдаются малоинтенсивные пики, характерные для фазы ГЦК-Ni с параметром элементарной ячейки $a = 3,5198 \text{ \AA}$ и фазы ГЦК-Au с параметром $a = 4,0626 \text{ \AA}$, отличным от эталонного значения ($a = 4,0780 \text{ \AA}$) (PDF # 040784). Ni@Pt НТ имеют ГЦК-фазу Ni с параметром элементарной ячейки $a = 3,52380 \text{ \AA}$ и фазы ГЦК-Pt с параметром $a = 3,88868 \text{ \AA}$, отличным от эталонного значения ($a = 3,92400 \text{ \AA}$) (PDF # 03-065-2868). Для определения равномерности покрытия было проведено ЭДА-картирование поверхности Ni@Au и Ni@Pt НТ (рис. 4).

Результаты ЭДА-картирования показали, что атомное содержание Au и Ni в структуре составляет 18 и 82 % соответственно; атомное содержание Pt и Ni в структуре – 46 и 54 % соответственно. Прочие элементы на ЭДА-спектрах наблюдались в следовых количествах. Отсутствие солей и включений также подтверждается методом рентгеноструктурного анализа (рис. 2, *d* и *f*).

Основные магнитные параметры и их изменения в результате нанесения покрытий из благородных металлов определялись посредством анализа петлей гистерезиса для выделенных при

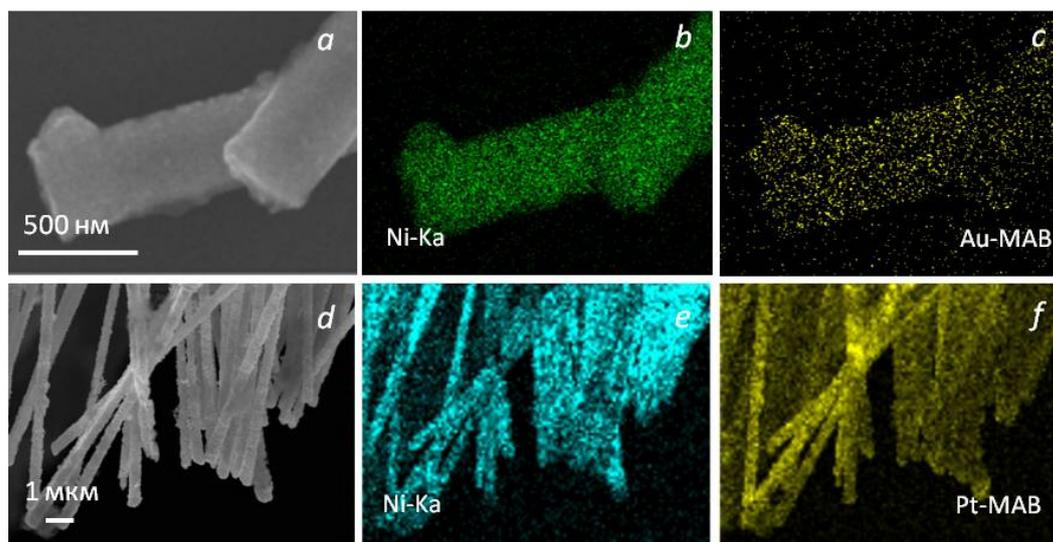


Рис. 4. СЭМ-изображения Ni@Au (*a*) и Ni@Pt нанотрубок (*d*); ЭДА-карты в режиме детектирования никеля (*b*, *e*), золота (*c*) и платины (*f*)

Fig. 4. SEM images of Ni@Au (*a*) and Ni@Pt nanotubes (*d*); EDA mapping in the mode of nickel (*b*, *e*), gold (*c*) and platinum (*f*) detecting

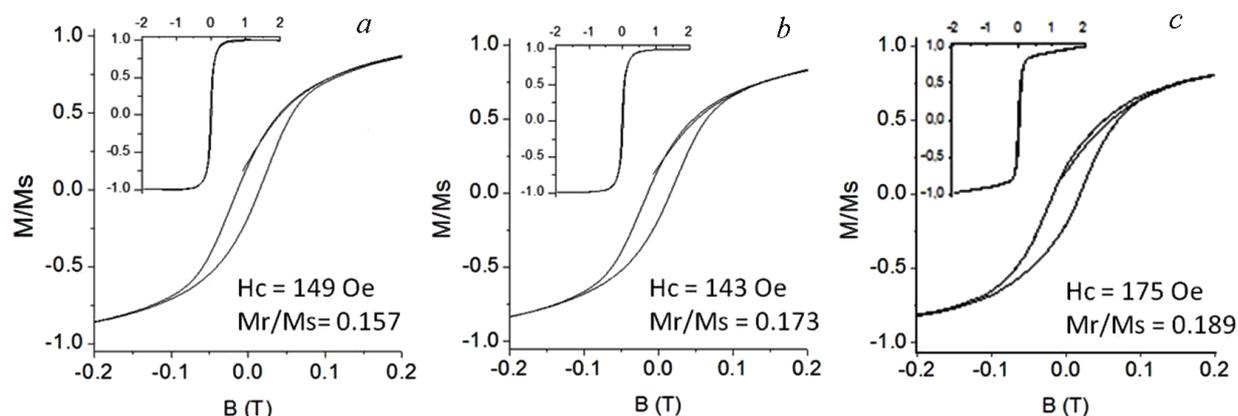


Рис. 5. Петли гистерезиса нанотрубок Ni (a), Ni@Au (b) и Ni@Pt (c) в виде порошка

Fig. 5. Hysteresis loops of Ni (a), Ni@Au (b), and Ni@Pt (c) nanotubes in the form of a powder

страивании полимерной мембраны порошков Ni, Ni@Au и Ni@Pt НТ. Петли гистерезиса приведены на рис. 5.

Петли гистерезиса характерны для ферромагнитных материалов и хорошо согласуются с ранее полученными результатами [17]. Магнитные свойства – коэрцитивность и квадратичность петель гистерезиса для образцов НТ Ni и Ni@Au, Ni@Pt несколько различаются. И если петли для чистых Ni НТ и НТ, покрытых золотом, практически идентичны, незначительно отличаясь только в значении квадратичности (рис. 5, a и b и значения на них), то для покрытых платиной НТ наблюдается значительный парамагнитный вклад (вставка к рис. 5, c). Отличие в поведении магнитных петель Ni@Pt НТ от других объектов исследования связано с большим количеством парамагнитной платины, количество которой достигает 46 %, согласно ЭДА-исследованиям. Более интересным видится увеличение коэрцитивности Ni@Pt НТ относительно чистых Ni НТ. Такое изменение может быть связано как с образованием интерметаллических соединений Ni_xPt_{1-x} на интерфейсе никелевая НТ-платиновое покрытие, так и с изменением магнитного состояния поверхности Ni за счет покрытия их платиной.

Заключение. Магнитные нанотрубки типа «ядро–оболочка» длиной $8 \pm 0,2$ мкм и диаметром 380 ± 20 нм были синтезированы простым двухстадийным методом, включающим электрохимическое осаждение нанотрубок Ni в порах ионно-трековых шаблонов и их покрытие слоем наноструктурированного золота или платины посредством восстановления благородного металла на поверхности никеля. Порошки никелевых, позолоченных и покрытых платиной нанотрубок были охарактеризованы методами СЭМ, ПЭМ, ЭДА, РФА и вибрационной магнитометрии. Показано, что слой золота представляет собой плотно осажденные наночастицы золота в кристаллической форме со сформированными неровностями на поверхности Ni с характеристическими размерами до 15 нм. Слой платины состоит из полусферических наростов кристаллической платины размерами до 100 нм, образующих плотный слой по всей поверхности нанотрубки. Магнитное поведение полученных наноструктур типа «магнитное ядро–оболочка» имеет схожий с исходными нанотрубками характер. Некоторое различие в магнитных характеристиках обуславливается наличием парамагнитного покрытия на поверхности никелевых наноструктур. Полученные нанотрубки со структурой типа «магнитное ядро–оболочка из благородного металла» имеют потенциал для применения при детектировании химических и биологических соединений, в качестве магнитных носителей при доставке лекарств и генов, а также могут быть использованы в качестве многоциклических катализаторов на магнитном носителе.

Список использованных источников

1. Ferromagnetic Nanotubes in Pores of Track Membranes for the Flexible Electronic Elements / E. Y. Kaniukov [et al.] // Devices Methods Meas. – 2017. – Vol. 8, N. 3. – P. 214–221. <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2017-8-3-214-221>
2. Magnetostrictive Fe-Ga Nanowires for actuation and sensing applications / A. B. Flatau [et al.]. – Elsevier Ltd., 2020. – P. 737–776. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102832-2.00025-6>

3. Microscopy investigation of conical and layered nanowires / D. Cherkasov [et al.] // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. – 2019. – Vol. 699. – P. 012005. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/699/1/012005>.
4. Signal Enhancement for Ferromagnetic Resonance Measurement of Magnetic Nanowire array / Y. Zhang [et al.] // 2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting. – 2019. – P. 1305–1306. <https://doi.org/10.1109/apusncursinrsm.2019.8889102>.
5. Guo, C. F. Flexible transparent conductors based on metal nanowire networks / C. F. Guo, Z. Ren // Mater. Today. – 2014. – Vol. 18, N. 3. – P. 143–154. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2014.08.018>
6. Smart Nanotubes for Bioseparations and Biocatalysis / D. T. Mitchell [et al.] // J. Am. Chem. Soc. – 2002. – Vol. 124, N. 40. – P. 11864–11865. <https://doi.org/10.1021/ja027247b>
7. Towards smooth and pure iron nanowires grown by electrodeposition in self-organized alumina membranes / V. Haehnel [et al.] // Acta Mater. – 2010. – Vol. 58, N. 7. – P. 2330–2337. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2009.12.019>
8. Salem, A. K. Multifunctional nanorods for gene delivery / A. K. Salem, P. C. Searson, K. W. Leong // Nat. Mater. – 2003. – Vol. 2, N. 10. – P. 668–671. <https://doi.org/10.1038/nmat974>
9. Template synthesized nanotubes for biomedical delivery applications / H. Hillebrenner [et al.] // Nanomedicine (Lond). – 2006. – Vol. 1, N. 1. – P. 39–50. <https://doi.org/10.2217/17435889.1.1.39>.
10. Magnetic properties of Co nanopillar arrays prepared from alumina templates. / L. G. Vivas [et al.] // Nanotechnology. – 2013. – Vol. 24, N. 10. – P. 105703. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/24/10/105703>
11. Nanomaterials: A membrane-based synthetic approach / C. R. Martin // Science. – 1994. – Vol. 266, N. 5193. – P. 1961–1966. <https://doi.org/10.1126/science.266.5193.1961>
12. Zhao, X. Recent progress in hydrogen storage alloys for nickel/metal hydride secondary batteries / X. Zhao, L. Ma // Int. J. Hydrogen Energy. – 2009. – Vol. 34, N. 11. – P. 4788–4796. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.03.023>
13. Murphy, J. J. Organic chemistry: Light opens pathways for nickel catalysis / J. J. Murphy, P. Melchiorre // Nature. – 2015. – Vol. 524, N. 7565. – P. 297–298. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2018.09.010>
14. Effectiveness of the magnetostatic shielding by the cylindrical shells / S. S. Grabchikov [et al.] // J. Magn. Magn. Mater. – 2016. – Vol. 398. – P. 49–53. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2015.08.122>
15. Targeted cargo delivery using a rotating nickel nanowire / L. Zhang [et al.] // Nanomedicine Nanotechnology, Biol. Med. – 2012. – Vol. 8, N. 7. – P. 1074–1080. <https://doi.org/10.1016/j.nano.2012.03.002>
16. Gold coated magnetic nanoparticles: From preparation to surface modification for analytical and biomedical applications / S. Moraes Silva [et al.] // Chem. Commun. – 2016. – Vol. 52, N. 48. – P. 7528–7540. <https://doi.org/10.1039/c6cc03225g>
17. Evolution of morphology, structure, and magnetic parameters of Ni nanotubes with growth in pores of a PET template / A. Shumskaya [et al.] // J. Magn. Magn. Mater. – 2020. – Vol. 497. – P. 165913. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.165913>
18. Gold-Coated Iron Oxide Nanoparticles as a contrast Agent in Magnetic Resonance Imaging / T. Ahmad [et al.] // J. Nanosci. Nanotechnol. – 2012. – Vol. 12, N. 7. – P. 5132–5137. <https://doi.org/10.1166/jnn.2012.6368>
19. Differential Surface Elemental Distribution Leads to Significantly Enhanced Stability of PtNi-Based ORR Catalysts / L. Cao [et al.] // Matter. – 2019. – Vol. 1, N. 6. – P. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.matt.2019.07.015>
20. Evolution of the polyethylene terephthalate track membranes parameters at the etching process / E. Y. Kaniukov [et al.] // J. Contemp. Phys. (Armenian Acad. Sci). – 2017. – Vol. 52, N. 2. – P. 155–160. <https://doi.org/10.3103/S1068337217020098>
21. Применение трековых мембран в процессах прямого и обратного осмоса / А. Л. Козловский [и др.] // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2017. – № 1. – P. 45–51.
22. Enhancing hydrophilicity and water permeability of PET track-etched membranes by advanced oxidation process / I. V. Korolkov [et al.] // Nucl. Instruments Methods Phys. Res. B. – 2015. – Vol. 365. – P. 651–655. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2015.10.031>
23. Radiation induced deposition of copper nanoparticles inside the nanochannels of poly(acrylic acid)-grafted poly(ethylene terephthalate) track-etched membranes / I. V. Korolkov [et al.] // Radiat. Phys. Chem. – 2017. – Vol. 130. – P. 480–487. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2016.10.006>
24. Gold nanoflowers grown in a porous Si / SiO₂ matrix: the fabrication process and plasmonic properties / L. A. Osminikina [et al.] // Appl. Surf. Sci. – 2019. – Vol. 507. – P. 144989. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.144989>
25. Correlation between structural and magnetic properties of FeNi nanotubes with different lengths / A. E. Shumskaya [et al.] // J. Alloys Compd. – 2019. – Vol. 810. – P. 151874. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.151874>
26. Electrochemistry Communications Conformal deposition of Pt on titania nanotubes to produce a bio-electrode for neuro-stimulating applications / Y. Wu [et al.] // Electrochem. commun. – 2018. – Vol. 88. – P. 61–66. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2018.01.019>
27. Tunable synthesis of copper nanotubes / E. Kaniukov [et al.] // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. – 2016. – Vol. 110. – P. 012013. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/110/1/012013>

References

1. Kaniukov E. Y., Shumskaya E. E., Kutuzau M. D., Borgekov D. B., Kenzhina I. E., Kozlovskiy A. L., Zdorovets M. V. Ferromagnetic Nanotubes in Pores of Track Membranes for the Flexible Electronic Elements. *Devices and Methods of Measurements*, 2017, vol. 8, no. 3, pp. 214–221. <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2017-8-3-214-221>
2. Flatau A. B., Stadler B. J. H., Park J., Sai K., Reddy M., Downey P. R., Mudivarthi C., Order M. Van. *Magnetostrictive Fe-Ga Nanowires for actuation and sensing applications*, 2nd ed. Elsevier Ltd., 2020, pp. 737–776. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102832-2.00025-6>

3. Cherkasov D., Panov D., Doludenko I., Kanevskiy V., Muslimov A., Zagorskiy D., Biziaev D., Bukharaev A. Microscopy investigation of conical and layered nanowires. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 699, p. 012005. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/699/1/012005>
4. Zhang Y., Um J., Stadler B., Franklin R. Signal Enhancement for Ferromagnetic Resonance Measurement of Magnetic Nanowire array. *2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting*, 2019, pp. 1305–1306. <https://doi.org/10.1109/apuscursinrsm.2019.8889102>
5. Guo C. F., Ren Z. Flexible transparent conductors based on metal nanowire networks. *Materials Today*, 2014, vol. 18, no. 3, pp. 143–154. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2014.08.018>
6. Mitchell D. T., Lee S. B., Trofin L., Li N., Nevanen T. K., Söderlund H., Martin C. R. Smart Nanotubes for Bioseparations and Biocatalysis. *Journal of the American Chemical Society*, 2002, vol. 124, no. 40, pp. 11864–11865. <https://doi.org/10.1021/ja027247b>
7. Haehnel V., Fähler S., Schaaf P., Miglierini M., Mickel C., Schultz L. and Schlörb H. Towards smooth and pure iron nanowires grown by electrodeposition in self-organized alumina membranes. *Acta Materialia*, 2010, vol. 58, no. 7, pp. 2330–2337. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2009.12.019>
8. Salem A. K., Searson P. C., Leong K. W. Multifunctional nanorods for gene delivery. *Nature Materials*, 2003, vol. 2, no. 10, pp. 668–671. <https://doi.org/10.1038/nmat974>
9. Hillebrenner H., Buyukserin F., Stewart J. D., Martin C. R. Template synthesized nanotubes for biomedical delivery applications. *Nanomedicine (Lond)*, 2006, vol. 1, no. 1, pp. 39–50. <https://doi.org/10.2217/17435889.1.1.39>
10. Vivas L. G., Ivanov Y. P., Trabada D. G., Proenca M. P., Chubykalo-Fesenko O., Vázquez M. Magnetic properties of Co nanopillar arrays prepared from alumina templates. *Nanotechnology*, 2013, vol. 24, no. 10, p. 105703. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/24/10/105703>
11. Martin C. R. Nanomaterials: A membrane-based synthetic approach. *Science*, 1994, vol. 266, no. 5193, pp. 1961–1966. <https://doi.org/10.1126/science.266.5193.196112>
12. Zhao X., Ma L. Recent progress in hydrogen storage alloys for nickel/metal hydride secondary batteries. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, vol. 34, no. 11, pp. 4788–4796. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.03.023>
13. Murphy J. J. and Melchiorre P. Organic chemistry: Light opens pathways for nickel catalysis. *Nature*, 2015, vol. 524, no. 7565, pp. 297–298. <https://doi.org/10.1038/nature15200>
14. Grabchikov S. S., Trukhanov A. V., Trukhanov S. V., Kazakevich I. S., Solobay A. A., Erofeenko V. T., Vasilenkov N. A., Volkova O. S., Shakin A. Effectiveness of the magnetostatic shielding by the cylindrical shells. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2016, vol. 398, pp. 49–53. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2015.08.122>
15. Zhang L., Petit T., Peyer K. E., Nelson B. J. Targeted cargo delivery using a rotating nickel nanowire. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*, 2012, vol. 8, no. 7, pp. 1074–1080. <https://doi.org/10.1016/j.nano.2012.03.002>
16. Moraes Silva S., Tavallaie R., Sandiford L., Tilley R. D., Gooding J. J. Gold coated magnetic nanoparticles: From preparation to surface modification for analytical and biomedical applications. *Chemical Communications*, 2016, vol. 52, no. 48, pp. 7528–7540. <https://doi.org/10.1039/c6cc03225g>
17. Shumskaya A., Bundyukova V., Kozlovskiy A., Zdorovets M., Kadyrzhanov K., Kalkabay G., Kaniukov E. Evolution of morphology, structure, and magnetic parameters of Ni nanotubes with growth in pores of a PET template. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2020, vol. 497, p. 165913. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.165913>
18. Ahmad T., Bae H., Rhee I., Chang Y., Jin S.-U., Hong S. Gold-Coated Iron Oxide Nanoparticles as a contrast Agent in Magnetic Resonance Imaging. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2012, vol. 12, no. 7, pp. 5132–5137. <https://doi.org/10.1166/jnn.2012.6368>
19. Cao L., Zhao Z., Cao L., Zhao Z., Liu Z., Gao W., Dai S., Gha J., Xue W. Differential Surface Elemental Distribution Leads to Significantly Enhanced Stability of PtNi-Based ORR Catalysts. *Matter*, 2019, vol. 1, no. 6, pp. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.matt.2019.07.015>
20. Kaniukov E. Y., Shumskaya E. E., Yakimchuk D. V., Kozlovskiy A. L., Ibragimova M. A., Zdorovets M. V. Evolution of the polyethylene terephthalate track membranes parameters at the etching process. *Journal of Contemporary Physics (Armenian Academy of Sciences)*, 2017, vol. 52, no. 2, pp. 155–160. <https://doi.org/10.3103/S1068337217020098>
21. Kozlovskii A., Borgekov K., Zdorovets M., Arkhangelsky E., Shumskaya A., Kanukov E. Application of track membranes in processes of direct and reverse osmosis. *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2017, no. 1, pp. 45–51 (in Russian).
22. Korolkov I. V., Mashentseva A. A., Güven O., Zdorovets M. V., Taltenov A. A. Enhancing hydrophilicity and water permeability of PET track-etched membranes by advanced oxidation process. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2015, vol. 365, pp. 651–655. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2015.10.031>
23. Korolkov I. V., Güven O., Mashentseva A. A., Atıcı A. B., Gorin Y. G., Zdorovets M. V., Taltenov A. A. Radiation induced deposition of copper nanoparticles inside the nanochannels of poly(acrylic acid)-grafted poly(ethylene terephthalate) track-etched membranes. *Radiation Physics and Chemistry*, 2017, vol. 130, pp. 480–487. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2016.10.006>
24. Osminkina L. A., Žukovskaja O., Agafilushkina S. N., Stranik O., Gonchar K. A., Yakimchuk D., Chermoshentsev D. A., Dyakov S. A., Nikolay A., Weber K., Popp J., May D. C. and Sivakov V. Gold nanoflowers grown in a porous Si / SiO₂ matrix: the fabrication process and plasmonic properties. *Applied Surface Science*, 2019, vol. 507, p. 144989. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.144989>

25. Shumskaya A. E., Kozlovskiy A. L., Zdorovets M. V., Evstigneeva S. A., Trukhanov A. V., Trukhanov S. V., Vinnik D. A., Kaniukov E. Y., Panina L. V. Correlation between structural and magnetic properties of FeNi nanotubes with different lengths. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, vol. 810, p. 151874. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.151874>

26. Wu Y., Chung T., Huang J., Wu P., Chen P., Lee J., Chan T. Electrochemistry Communications Conformal deposition of Pt on titania nanotubes to produce a bio-electrode for neuro-stimulating applications. *Electrochemistry Communications*, 2018, vol. 88, pp. 61–66. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2018.01.019>

27. Kaniukov E., Kozlovsky A., Shlimas D., Yakimchuk D., Zdorovets M., Kadyrzhanov K. Tunable synthesis of copper nanotubes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 110, p. 012013. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/110/1/012013>

Информация об авторах

Шумская Елена Евгеньевна – науч. сотрудник. Институт химии новых материалов НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 36, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: Lunka7@mail.ru

Рогачев Александр Александрович – д-р техн. наук, профессор, директор Института химии новых материалов НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 36, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: rogachev78@mail.ru

Агабеков Владимир Енокович – академик, д-р хим. наук, профессор. Институт химии новых материалов НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 36, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: agabekov@ichnm.by

Довыденко Егор Михайлович – мл. науч. сотрудник. Институт химии новых материалов НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 36, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: dovydenko.e93@mail.ru

Петкевич Анна Васильевна – мл. науч. сотрудник. Институт химии новых материалов НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 36, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: m_a_w1987@mail.ru

Корольков Илья Владимирович – канд. техн. наук, зав. лаб. Астанинский филиал Институт ядерной физики (пр. Абылай хана, 2/1, 010008, Астана, Республика Казахстан). E-mail: korolkovelf@gmail.com

Козловский Артем Леонидович – канд. техн. наук, зав. лаб. Астанинский филиал Институт ядерной физики (пр. Абылай хана, 2/1, 010008, Астана, Республика Казахстан). E-mail: artem88sddt@mail.ru

Здоровец Максим Викторович – канд. физ.-мат. наук, руководитель лаб. инженерного профиля, Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева (пр. Абылай хана, 2/1, 010008, Астана, Республика Казахстан). E-mail: mzdorovets@gmail.com

Бундюкова Виктория Дмитриевна – мл. науч. сотрудник. НПЦ НАН Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: victoria.bundyukova@gmail.com

Якимчук Дмитрий Владимирович – ст. науч. сотрудник. НПЦ НАН Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: dim2yakim@gmail.com

Канюков Егор Юрьевич – ст. науч. сотрудник. Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (Ленинский пр-т, 4, 119049, Москва, Российская Федерация). E-mail: ka.egor@mail.ru

Information about of authors

Alena E. Shumskaya – Researcher. Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Science of Belarus (36, F. Skoryna Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Lunka7@mail.ru

Alexandr A. Rogachev – D. Sc. (Engineering), Professor, Director of The Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Science of Belarus (36, F. Skoryna Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: rogachev78@mail.ru

Vladimir E. Agabekov – Academician, D. Sc. (Chemistry), Professor. Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Science of Belarus (36, F. Skoryna Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: agabekov@ichnm.by

Egor M. Dovydenko – Junior Researcher. Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Science of Belarus (36, F. Skoryna Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dovydenko.e93@mail.ru

Anna V. Petkevich – Junior Researcher. Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Science of Belarus (36, F. Skoryna Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: m_a_w1987@mail.ru

Ilya V. Korolkov – Ph. D. (Engineering), Head of the Laboratory. Astana branch of the Institute of Nuclear Physics (2/1, Abylaikhan Ave., 010008, Astana, Republic of Kazakhstan). E-mail: korolkovelf@gmail.com

Artem L. Kozlovskiy – Ph. D. (Engineering), Acting Head of the Laboratory. Astana branch of the Institute of Nuclear Physics (2/1, Abylaikhan Ave., 010008, Astana, Republic of Kazakhstan). E-mail: artem88sddt@mail.ru

Maxim V. Zdorovets – Ph. D. (Physics and Mathematics), Head of the Laboratory, L. N. Gumilyov Eurasian National University (2/1, Abylaikhan Ave., 010008, Astana, Republic of Kazakhstan). E-mail: mzdorovets@gmail.com

Victoria D. Bundyukova – Junior Researcher, Scientific and Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: victoria.bundyukova@gmail.com

Dmitry V. Yakimchuk – Leading Researcher, Scientific and Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dim2yakim@gmail.com

Egor Yu. Kaniukov – Senior Researcher, National Research Technological University «MISiS» (4, Leninsky Prospect, 119049, Moscow, Russian Federation). E-mail: ka.egor@mail.ru