
НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGIES

УДК 669.25:621.762.24

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ ДЛЯ СИНТЕЗА КАЧЕСТВЕННЫХ НАНОПОРОШКОВ ГИДРОКСИДНОГО И МЕТАЛЛИЧЕСКОГО КОБАЛЬТА

В. М. НГУЕН¹⁾, Т. Х. НГУЕН²⁾, С. В. ГОРОБИНСКИЙ³⁾

¹⁾Технологический институт, ул. Каувонг, 3, 100000, г. Ханой, Вьетнам

²⁾Государственный технический университет им. Ле Куи Дона,
ул. Хоангкуоквьет, 236, 100000, г. Ханой, Вьетнам

³⁾Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
пр. Ленинский, 4, 119049, г. Москва, Россия

Нанопорошки (НП) $\text{Co}(\text{OH})_2$ получали методом химического осаждения из водных растворов нитрата кобальта $\text{Co}(\text{NO}_3)_2$ и щелочи NaOH (10 мас. %) с добавлением поверхностно-активных веществ (ПАВ) – додецилсульфата натрия (ДСН) и цетилпиридиния хлорида (ЦПХ) (0,1 мас. %). Независимо от условий получения частицы $\text{Co}(\text{OH})_2$ имеют вид чешуек неправильной формы и обладают размером в нанометровом диапазоне. Показано, что наиболее качественный продукт представляет собой НП $\text{Co}(\text{OH})_2$, синтезированный с использованием 0,1 %

Образец цитирования:

Нгуен ВМ, Нгуен ТХ, Горобинский СВ. Использование поверхностно-активных веществ для синтеза качественных нанопорошков гидроксидного и металлического кобальта. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика.* 2021;1:4–11.
<https://doi.org/10.33581/2520-2243-2021-1-4-11>

For citation:

Nguyen VM, Nguyen TH, Gorobinsky SV. Application of surfactants for the synthesis of qualitative hydroxide and metallic cobalt nanopowders. *Journal of the Belarusian State University. Physics.* 2021;1:4–11. Russian.
<https://doi.org/10.33581/2520-2243-2021-1-4-11>

Авторы:

Ван Минь Нгуен – кандидат технических наук; исследователь отдела технологий материалов.
Тиен Хиен Нгуен – лектор кафедры материаловедения факультета механики и машиностроения.
Станислав Викторович Горобинский – инженер-физик кафедры функциональных наносистем и высокотемпературных материалов Института новых материалов и нанотехнологий.

Authors:

Van Minh Nguyen, PhD (engineering); researcher at the department of materials technology.
chinhnhan88@gmail.com
Tien Hiep Nguyen, lecturer at the department of materials science and engineering, faculty of mechanical engineering.
htrru7@yandex.ru
Stanislav V. Gorobinsky, physical engineer at the department of functional nanosystems and high-temperature materials, College of New Materials and Nanotechnologies.

ДСН, так как его дисперсность увеличивается более чем в 2 раза по сравнению с образцами, осажденными в присутствии 0,1 % ЦПХ и без добавления ПАВ. Именно он был выбран для синтеза НП металлического кобальта. Установлено, что для НП Co, полученного водородным восстановлением НП $\text{Co}(\text{OH})_2$ с 0,1 % ДСН при 280 °С, максимум на гистограмме распределения частиц по размерам находится в интервале 41–50 нм. Данный образец характеризуется узким распределением частиц по размерам и представляет собой спекшиеся друг с другом частицы сферической формы.

Ключевые слова: нанопорошок; кобальт; гидроксид кобальта; химическое осаждение; поверхностно-активное вещество.

APPLICATION OF SURFACTANTS FOR THE SYNTHESIS OF QUALITATIVE HYDROXIDE AND METALLIC COBALT NANOPOWDERS

V. M. NGUYEN^a, T. H. NGUYEN^b, S. V. GOROBINSKY^c

^a*Institute of Technology, 3 Cau Vong Street, Hanoi 100000, Vietnam*

^b*Le Quy Don Technical University, 236 Hoang Quoc Viet Street, Hanoi 100000, Vietnam*

^c*National University of Science and Technology «MISIS», 4 Leninsky Avenue, Moscow 119049, Russia*

Corresponding author: T. H. Nguyen (htnru7@yandex.ru)

In this work, $\text{Co}(\text{OH})_2$ nanopowders (NP) were obtained by chemical precipitation from aqueous solutions of cobalt nitrate $\text{Co}(\text{NO}_3)_2$ and alkali NaOH (10 wt. %) using surfactants – sodium dodecyl sulfate (SDS) and cetylpyridinium chloride (CPC) (0.1 wt. %). Regardless of the preparation conditions, the $\text{Co}(\text{OH})_2$ particles have the form of flakes with an irregular shape and have a size in the nanometer range. It was shown that $\text{Co}(\text{OH})_2$ NP obtained with the addition of 0.1 % SDS is the best quality product, since its dispersion increases by more than 2 times as compared to the samples obtained in the presence of 0.1 % CPC and without surfactants. The $\text{Co}(\text{OH})_2$ NP synthesized under the condition of adding 0.1 % SDS was chosen to obtain metallic cobalt NP. It was found that for the Co NP sample obtained by hydrogen reduction of $\text{Co}(\text{OH})_2$ NP with 0.1 % SDS at 280 °C, the maximum on the histogram of the particle size distribution is in the range 41–50 nm. The obtained Co NP is characterized by a narrow particle size distribution and represents spherical particles sintered with each other.

Keywords: nanopowder; cobalt; cobalt hydroxide; chemical precipitation; surfactant.

Введение

В настоящее время расширяется практическое применение нанопорошков (НП) на основе металлов, поскольку они характеризуются комплексом аномальных физико-химических параметров: механических, адсорбционных, каталитических, тепловых, оптических, электромагнитных и др. [1–3]. В частности, особый интерес представляет получение НП металлического кобальта с заданными свойствами, которые определяются прежде всего морфологией и дисперсностью частиц, для использования в качестве дисперсно-упрочняющей связки при изготовлении алмазного инструмента, наноструктурных покрытий, присадок к машинным маслам, легирующих добавок [4–10]. Регулирование данных свойств может осуществляться путем применения поверхностно-активных веществ (ПАВ) в ходе получения НП и изменения таких параметров синтеза, как концентрация, температура и давление [11]. Кроме того, присутствующие в растворе ПАВ могут оказывать сильное влияние на процесс кристаллизации. В зависимости от природы они способны изменять скорость образования и роста зародышей новой фазы, распределение наночастиц (НЧ) по размерам, а также форму кристаллов [12; 13].

Получение НП Co осуществляется различными способами, большинство из которых характеризуются рядом недостатков, таких как пониженная производительность и высокие затраты энергии [14–16]. Химико-металлургический метод, включающий в себя этапы химического осаждения кислородсодержащих соединений металлов и водородного восстановления полученных соединений, представляется высокоэффективным с точки зрения экономии энергии, а также возможности утилизации промышленных отходов в качестве исходного сырья и регулировки размерных характеристик НЧ металлов в ходе их получения [15; 17].

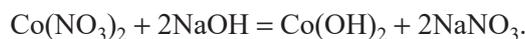
В связи с этим актуальной задачей является изучение влияния различных ПАВ на свойства НП $\text{Co}(\text{OH})_2$, полученного методом химического осаждения, в целях уменьшения агрегации и достижения высокой дисперсности и заданной морфологии частиц $\text{Co}(\text{OH})_2$, что позволит выбрать качественный НП $\text{Co}(\text{OH})_2$ для синтеза НП Co водородным восстановлением и обеспечит снижение затрат энергии и сырья.

Материалы и методики эксперимента

Объектами исследования выступали НП на основе кобальта ($\text{Co}(\text{OH})_2$ и Co), полученные методом химического осаждения с применением различных ПАВ и последующим низкотемпературным водородным восстановлением.

Исходными материалами для синтеза $\text{Co}(\text{OH})_2$ являлись соль $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ («ч. д. а.») и щелочь NaOH («ч. д. а.»). Растворителем служила дистиллированная вода, полученная с помощью дистиллятора ДЭ-10 (ООО «Завод «Электромедоборудование»», Россия).

Осаждение прекурсоров $\text{Co}(\text{OH})_2$ проводили из водного раствора соли нитрата кобальта щелочью по реакции



В качестве ПАВ были выбраны ЦПХ ($\text{C}_{21}\text{H}_{38}\text{ClN}$) и ДСН ($\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{SO}_4\text{Na}$), так как они принадлежат к разным классам по характеру диссоциации [18]. Исходя из литературных данных, ПАВ добавляли в исходные растворы реагентов, а также в реакционный сосуд перед осаждением в концентрации 0,1 мас. % [13; 19; 20]. Для сравнения $\text{Co}(\text{OH})_2$ также был получен без добавления ПАВ.

Осаждение проводили в реакторе системы АПК «Нанохим» (НИТУ «МИСиС», Россия) (рис. 1) при комнатной температуре, pH 9,0 и непрерывном перемешивании. Растворы в реакционный сосуд подавали с помощью дозаторов со скоростью, обеспечивающей постоянство pH реакционной среды. Контроль pH осуществляли pH-метром марки «Эксперт 001» (ООО «Эконикс-Эксперт», Россия), погрешность измерений составляла $\pm 0,03$.

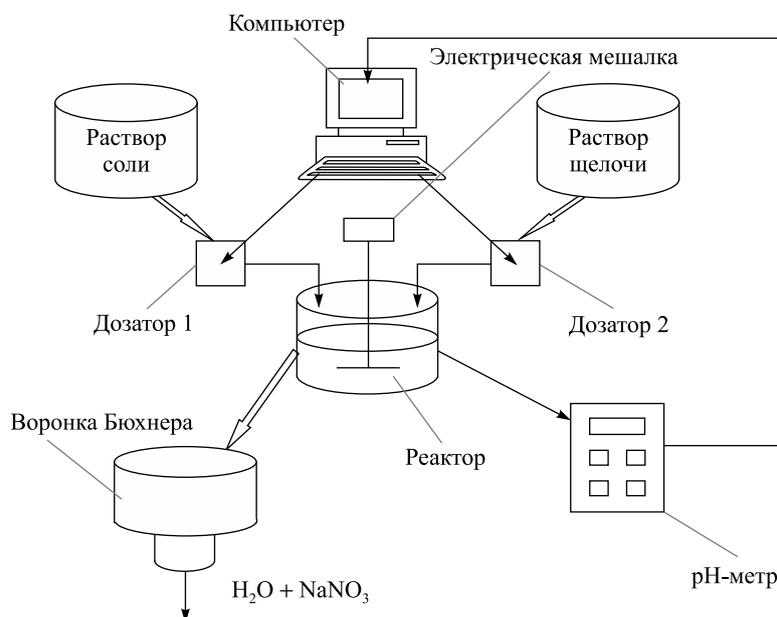


Рис. 1. Система для синтеза гидроксидного прекурсора $\text{Co}(\text{OH})_2$
Fig. 1. System for the synthesis of a hydroxide precursor $\text{Co}(\text{OH})_2$

Полученные осадки гидроксидов промывали дистиллированной водой методом декантации до полной отмывки ионов растворенной соли. Полноту отмывки контролировали по pH раствора над осадком. Затем осадки сушили при комнатной температуре в течение 48 ч. Высушенный $\text{Co}(\text{OH})_2$ измельчали на мельнице-ступке Pulverisette 2 (Fritsch, Германия). Полученный НП $\text{Co}(\text{OH})_2$ использовали для дальнейшего исследования.

Фазовый состав и структура образцов исследовались методом рентгенофазового анализа (РФА) на дифрактометре Дифрей-401 (АО «Научные приборы», Россия). Размер и форму НЧ изучали методами СЭМ и ПЭМ на установках JSM-6700F (JEOL, Япония) и LEO 912 AB OMEGA (Carl Zeiss, Германия) соответственно. Величина удельной поверхности образцов ($S_{уд}$) определялась методом БЭТ по

низкотемпературной адсорбции азота с помощью анализатора NOVA 1200e (*Quantachrome Instruments*, США). Средний размер частиц порошков (D_{cp}) (в метрах) рассчитывали по формуле

$$D_{cp} = \frac{6}{\rho S_{уд}},$$

где ρ – плотность материала, кг/м³.

Результаты и их обсуждение

Результаты РФА полученных образцов НП $Co(OH)_2$ представлены на рис. 1.

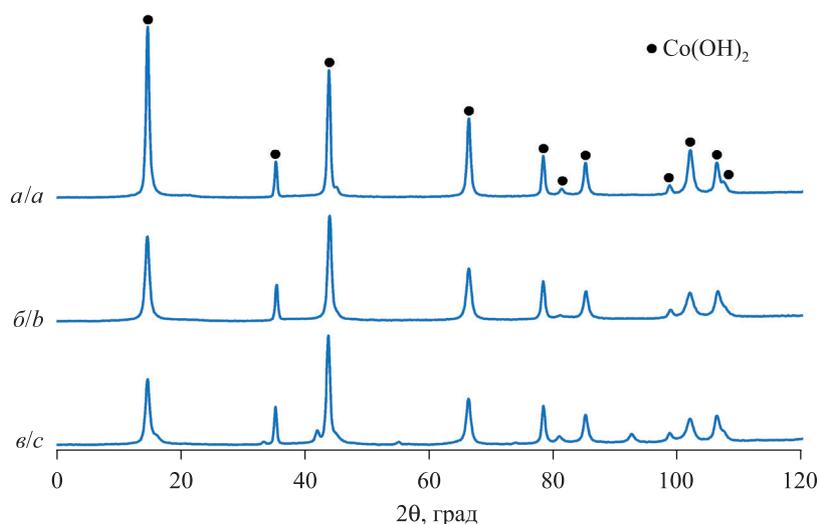


Рис. 2. Результаты РФА образцов, полученных при различных условиях:
a – без ПАВ; *б* – с добавлением 0,1 % ЦПХ; *в* – с добавлением 0,1 % ДСН

Fig. 2. XRD results of the samples obtained in various conditions:
a – without surfactants; *b* – with 0.1 % CPC; *c* – with 0.1 % SDS

РФА (см. рис. 1, *a*) выявил, что исследуемые НП являются однофазными, содержат только гидроксидную фазу $Co(OH)_2$ и обладают кристаллической структурой. Установлено, что все образцы гидроксидного соединения кобальта представляют собой стабильную β -форму $Co(OH)_2$.

На рис. 3 приведены ПЭМ-микротографии НЧ $Co(OH)_2$, осажденных с использованием ПАВ в концентрации 0,1 мас. %.

Как видно из микротографий на рис. 3, независимо от условий получения частицы $Co(OH)_2$ представляют собой чешуйки неправильной формы средней толщиной 30 нм. Характеристики дисперсности изученных образцов $Co(OH)_2$ в зависимости от условий получения даны в таблице.

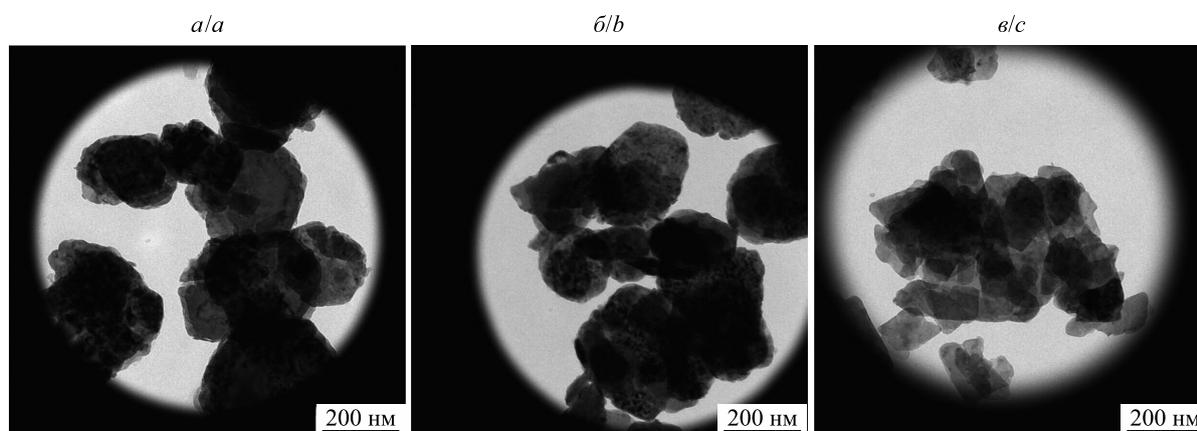


Рис. 3. ПЭМ-изображения НЧ $Co(OH)_2$, полученных при различных условиях:
a – без ПАВ; *б* – с добавлением 0,1 % ЦПХ; *в* – с добавлением 0,1 % ДСН

Fig. 3. TEM images of $Co(OH)_2$ NPs obtained in various conditions:
a – without surfactants; *b* – with 0.1 % CPC; *c* – with 0.1 % SDS

Свойства НП $\text{Co}(\text{OH})_2$, осажденных при различных условиях
 Properties of $\text{Co}(\text{OH})_2$ NP deposited in various conditions

Условие получения	$D_{\text{ср1}}$ по ПЭМ, нм	Средняя толщина частиц, нм	$S_{\text{уд}}$, $\text{м}^2/\text{г}$	$D_{\text{ср2}}$ по $S_{\text{уд}}$, нм
Без ПАВ	163	29	13,7	122
С добавлением 0,1 % ЦПХ	158	31	14,5	115
С добавлением 0,1 % ДСН	96	25	27,9	60

Средний размер частиц НП $\text{Co}(\text{OH})_2$, синтезированного без ПАВ, составляет порядка 163 нм (см. таблицу), средний размер частиц образца, полученного с добавлением 0,1 % ЦПХ, – около 158 нм, а образца, осажденного в присутствии 0,1 % ДСН, – приблизительно 96 нм.

Анализ результатов измерения $S_{\text{уд}}$ показывает, что у НП $\text{Co}(\text{OH})_2$, полученного без ПАВ, данный показатель равен $13,7 \text{ м}^2/\text{г}$. Видно, что добавление 0,1 % ЦПХ на стадии осаждения незначительно повышает $S_{\text{уд}}$ осадка, тогда как в случае осаждения $\text{Co}(\text{OH})_2$ в присутствии 0,1 % ДСН величина $S_{\text{уд}}$ возрастает примерно в 2 раза. Таким образом, наиболее существенное влияние на дисперсность НП $\text{Co}(\text{OH})_2$ оказала добавка 0,1 % ДСН.

По результатам электронно-микроскопических исследований были построены гистограммы распределения НЧ образцов $\text{Co}(\text{OH})_2$ по размерам (рис. 4).

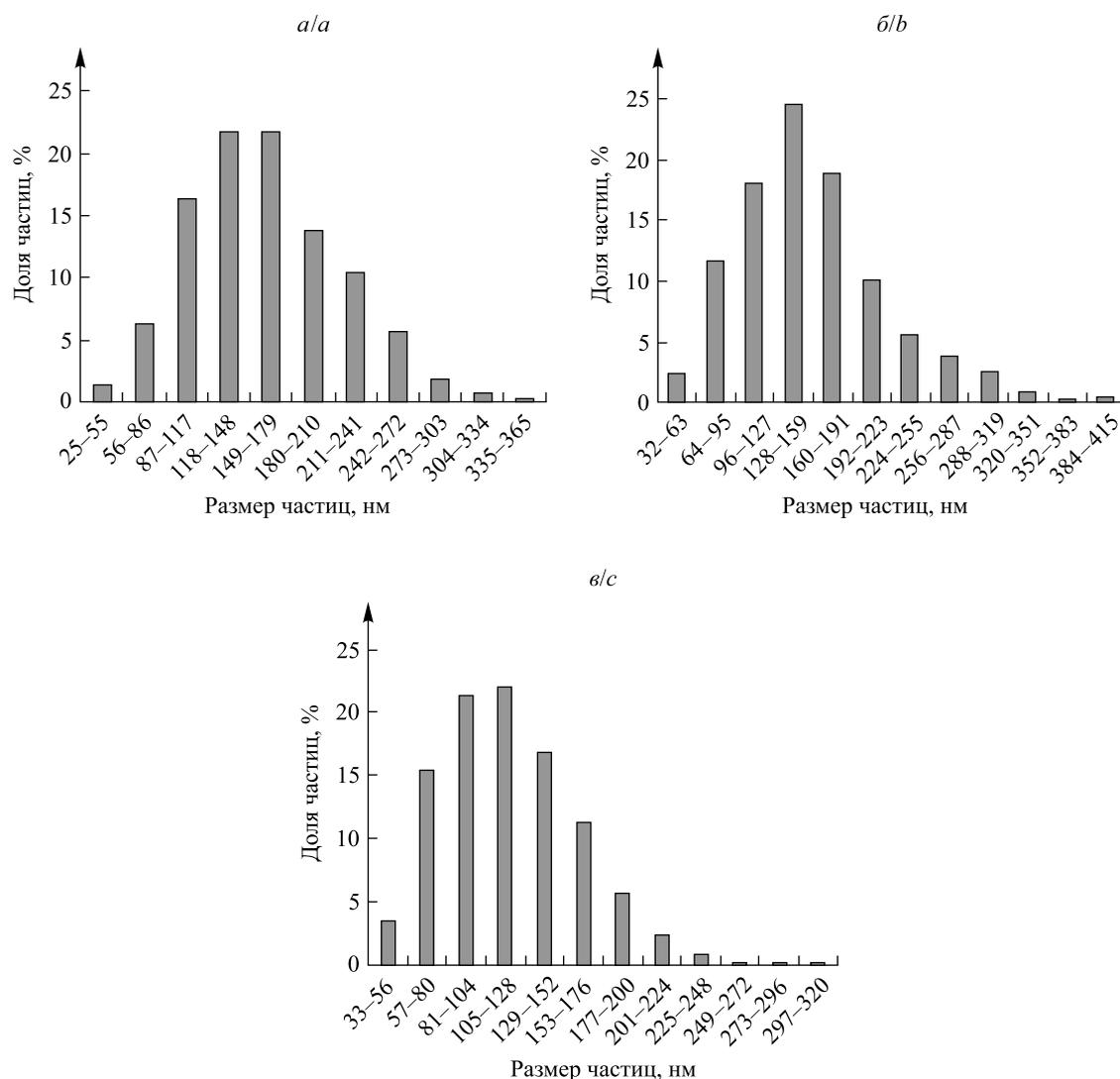


Рис. 4. Гистограммы распределения НЧ $\text{Co}(\text{OH})_2$, полученных при различных условиях:
 а – без ПАВ; б – с добавлением 0,1 % ЦПХ; в – с добавлением 0,1 % ДСН

Fig. 4. Histograms of the distribution of $\text{Co}(\text{OH})_2$ NPs obtained under different conditions:
 а – without surfactants; б – with 0.1 % CPC; в – with 0.1 % SDS

Показано, что кривые распределения частиц по размерам для всех полученных образцов НП $\text{Co}(\text{OH})_2$ имеют асимметричную форму со смещением кривой в область больших величин.

На рис. 4 видно, что все образцы характеризуются достаточно широким распределением частиц по размерам. Для НП, полученного без добавления ПАВ (см. рис. 4, *a*), максимум на гистограмме распределения соответствует размерам частиц в интервале 118–179 нм. Наиболее узким распределением обладает $\text{Co}(\text{OH})_2$, осажденный в присутствии 0,1 % ЦПХ (см. рис. 4, *б*), так как у него доля частиц, лежащих в одном интервале, выше, чем у остальных образцов, и составляет 24,7 %. Наименьшим средним размером частиц характеризуется образец, полученный с использованием 0,1 % ДСН (см. рис. 4, *в*). Для него максимум на гистограмме распределения лежит в интервале 105–128 нм.

Проанализировав все данные исследования свойств НП $\text{Co}(\text{OH})_2$, синтезированных при разных условиях, можно сделать вывод, что по сравнению с осаждением без ПАВ и с 0,1 % ЦПХ использование 0,1 % ДСН обеспечивает получение наиболее качественного продукта. Поэтому для синтеза НП Co был выбран НП $\text{Co}(\text{OH})_2$, осажденный при добавлении 0,1 % ДСН.

Далее приведены результаты исследования свойств НП Co (рис. 5), синтезированного водородным восстановлением НП $\text{Co}(\text{OH})_2$ с 0,1 % ДСН в трубчатой печи SNOL 0.2/1250 (*AB Umega*, Литва) при 280 °С в течение 3 ч. Такая температура восстановления соответствует литературным данным [13].

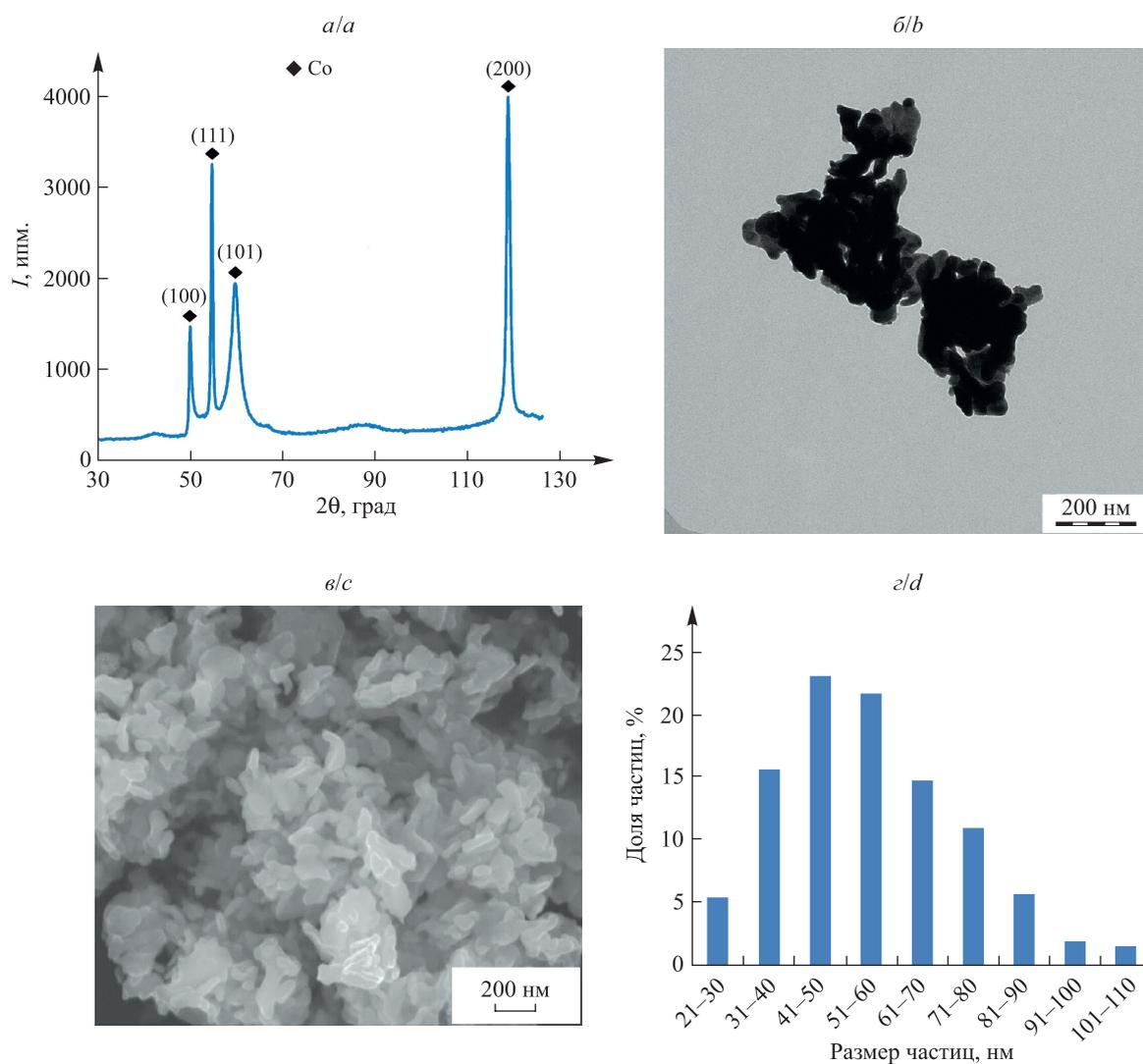
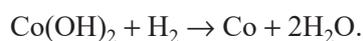


Рис. 5. Рентгенограмма (*a*), ПЭМ- и СЭМ-изображения (*б*, *в*), а также гистограмма распределения по размерам (*г*) НЧ Co , полученных восстановлением $\text{Co}(\text{OH})_2$ (с 0,1 % ДСН) при 280 °С в течение 3 ч

Fig. 5. X-ray pattern (*a*), TEM and SEM images (*b*, *c*) and histogram of size distribution (*d*) of the Co NPs obtained by reduction of $\text{Co}(\text{OH})_2$ (with 0.1 % SDS) at 280 °С for 3 h

Результаты РФА показывают, что фазовый состав восстановленного образца включал только фазу α -Co (см. рис. 5, а). Как видно из ПЭМ- и СЭМ-микрофотографий (см. рис. 5, б и в), НЧ Co представляют собой спекшиеся друг с другом частицы сферической формы. Анализируя распределение частиц по размерам (см. рис. 5, г), можно сделать вывод, что для полученного образца НП Co максимум на гистограмме распределения находится в интервале 41–50 нм. Также можно видеть, что продукт восстановления характеризуется узким распределением частиц по размерам.

Размер НЧ Co, рассчитанный по данным измерения величины удельной поверхности ($S_{уд} = 9,5 \text{ м}^2/\text{г}$), составляет 70 нм, что хорошо согласуется с результатом исследования размера НЧ Co методами СЭМ и ПЭМ.

Заключение

С использованием ПАВ методом химического осаждения были получены НП $\text{Co}(\text{OH})_2$ с большим диапазоном дисперсности. Установлено, что наиболее качественный продукт представляет собой НП $\text{Co}(\text{OH})_2$ с 0,1 % ДСН, так как его дисперсность увеличивается более чем в 2 раза по сравнению с образцами, осажденными в присутствии 0,1 % ЦПХ и без добавления ПАВ. Показано, что независимо от условий получения частицы $\text{Co}(\text{OH})_2$ имеют вид чешуек неправильной формы и нанометровый размер со средней толщиной 30 нм.

Для синтеза НП Co был выбран НП $\text{Co}(\text{OH})_2$ с 0,1 % ДСН. Установлено, что для образца НП Co, полученного водородным восстановлением НП $\text{Co}(\text{OH})_2$ при 280 °С, максимум на гистограмме распределения частиц по размерам лежит в интервале 41–50 нм. Продукт восстановления характеризуется узким распределением частиц по размерам и представляет собой спекшиеся друг с другом НЧ сферической формы.

Библиографические ссылки

1. Bhushan B, editor. *Springer handbook of nanotechnology*. 4th edition. Berlin: Springer-Verlag; 2017. 1500 p. DOI: 10.1007/978-3-662-54357-3.
2. Дынич РА, Замковец АД, Понявина АН. Оптические свойства гибридных плазмонных нанокмозитов. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика*. 2018;2:25–34.
3. Микитчук ЕП, Козадаев КВ. Моделирование электромагнитных свойств серебряных наноструктур на подложке в атмосфере воздуха. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика*. 2017;1:100–107.
4. Nguyen VM, Karunakaran G, Nguyen TH, Kolesnikov EA, Alymov MI, Levina VV, et al. Enhancement of structural and mechanical properties of Fe + 0.5 % C steel powder alloy via incorporation of Ni and Co nanoparticles. *Letters on Materials*. 2020; 10(2):174–178. DOI: 10.22226/2410-3535-2020-2-174-178.
5. Wang Y, Nie Y, Ding W, Chen SG, Xiong K, Qi XQ, et al. Unification of catalytic oxygen reduction and hydrogen evolution reactions: highly dispersive Co nanoparticles encapsulated inside Co and nitrogen co-doped carbon. *Chemical Communications*. 2015; 51(43):8942–8945. DOI: 10.1039/C5CC02400E.
6. Farkaš B, Santos-Carballal D, Cadi-Essadek A, de Leeuw NH. A DFT + U study of the oxidation of cobalt nanoparticles: implications for biomedical applications. *Materialia*. 2019;7:100381. DOI: 10.1016/j.mta.2019.100381.
7. Jamkhane PG, Ghule NW, Bamer AH, Kalaskar MG. Metal nanoparticles synthesis: an overview on methods of preparation, advantages and disadvantages, and applications. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*. 2019;53:101174. DOI: 10.1016/j.jddst.2019.101174.
8. Yanilkin VV, Nasretdinova GR, Osin YN, Salmikov VV. Anthracene mediated electrochemical synthesis of metallic cobalt nanoparticles in solution. *Electrochimica Acta*. 2015;168:82–88. DOI: 10.1016/j.electacta.2015.03.214.
9. Ansari SM, Bhor RD, Pai KR, Sen D, Mazumder S, Ghosh K, et al. Cobalt nanoparticles for biomedical applications: facile synthesis, physicochemical characterization, cytotoxicity behavior and biocompatibility. *Applied Surface Science*. 2017;414:171–187. DOI: 10.1016/j.apsusc.2017.03.002.
10. Seong G, Takami S, Arita T, Minami K, Hojo D, Yavari AR, et al. Supercritical hydrothermal synthesis of metallic cobalt nanoparticles and its thermodynamic analysis. *The Journal of Supercritical Fluids*. 2011;60:113–120. DOI: 10.1016/j.supflu.2011.05.003.
11. Shao H, Huang Y, Lee H, Sun YJ, Kim CO. Effect of PVP on the morphology of cobalt nanoparticles prepared by thermal decomposition of cobalt acetate. *Current Applied Physics*. 2006;6(supplement 1):e195–e197. DOI: 10.1016/j.cap.2006.01.038.
12. Рыжонков ДИ, Лёвина ВВ, Дзидзигури ЭЛ. *Наноматериалы*. 3-е издание. Москва: БИНОМ. Лаборатория знаний; 2012. 368 с.
13. Нгуен ТХ, Нгуен ВМ. Влияние поверхностно-активных веществ на дисперсность нанопорошков железа, кобальта и никеля. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2020;1:22–28. DOI: 10.17073/1997-308X-2020-22-28.
14. Нгуен ТХ, Конохов ЮВ, Нгуен ВМ, Левина ВВ, Карпенков ДЮ. Магнитные свойства нанопорошков Fe, Co, Ni, полученных химико-металлургическим методом. В: Лилеев АС, составитель. *Тезисы XXII Международной конференции по постоянным магнитам; 23–27 сентября 2019 г.; Суздаль, Россия*. Москва: Графит; 2019. с. 104–105.
15. Лапсина ПВ, Додонов ВГ, Пугачев ВМ, Кагакин ЕИ. Получение ультрадисперсного кобальта восстановлением кристаллического карбоната кобальта. *Вестник Кемеровского государственного университета*. 2012;1(4):267–271.
16. Нгуен ВМ, Конохов ЮВ, Рыжонков ДИ. Исследование влияния электромагнитного поля и энергомеханической обработки на процесс получения наноразмерных порошков металлического кобальта восстановлением водородом. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2018;61(2):96–101. DOI: 10.17073/0368-0797-2018-2-96-101.

17. Конохов ЮВ, Левина ВВ, Рыжонков ДИ, Пузик ИИ. Свойства наноразмерных порошков железа, полученных химико-металлургическим методом с применением поверхностно-активных веществ. *Российские нанотехнологии*. 2008;3(5–6):158–163.
18. Шукин ЕД, Перцов АВ, Амелина ЕА. *Коллоидная химия*. 3-е издание. Москва: Высшая школа; 2004. 445 с.
19. Абрамзон АА, Боброва ЛЕ, Зайченко ЛП, Измайлова ВН, Новоженец АА, Рохленко АА и др. *Поверхностные явления и поверхностно-активные вещества*. Абрамзон АА, Шукин ЕД, редакторы. Ленинград: Химия; 1984. 392 с.
20. Фролов ЮГ. *Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы*. 3-е издание. Москва: Альянс; 2004. 463 с.

References

1. Bhushan B, editor. *Springer handbook of nanotechnology*. 4th edition. Berlin: Springer-Verlag; 2017. 1500 p. DOI: 10.1007/978-3-662-54357-3.
2. Dynich RA, Zamkovets AD, Ponyavina AN. Optical properties of hybrid plasmonic nanocomposites. *Journal of the Belarusian State University. Physics*. 2018;2:25–34. Russian.
3. Mikitchuk EP, Kozadaev KV. Simulation of the electromagnetic properties of silver nanostructures on the solid substrate in the air atmosphere. *Journal of the Belarusian State University. Physics*. 2017;1:100–107. Russian.
4. Nguyen VM, Karunakaran G, Nguyen TH, Kolesnikov EA, Alymov MI, Levina VV, et al. Enhancement of structural and mechanical properties of Fe + 0.5 % C steel powder alloy via incorporation of Ni and Co nanoparticles. *Letters on Materials*. 2020; 10(2):174–178. DOI: 10.22226/2410-3535-2020-2-174-178.
5. Wang Y, Nie Y, Ding W, Chen SG, Xiong K, Qi XQ, et al. Unification of catalytic oxygen reduction and hydrogen evolution reactions: highly dispersive Co nanoparticles encapsulated inside Co and nitrogen co-doped carbon. *Chemical Communications*. 2015; 51(43):8942–8945. DOI: 10.1039/C5CC02400E.
6. Farkaš B, Santos-Carballal D, Cadi-Essadek A, de Leeuw NH. A DFT + U study of the oxidation of cobalt nanoparticles: implications for biomedical applications. *Materialia*. 2019;7:100381. DOI: 10.1016/j.mtla.2019.100381.
7. Jamkhande PG, Ghule NW, Bamer AH, Kalaskar MG. Metal nanoparticles synthesis: an overview on methods of preparation, advantages and disadvantages, and applications. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*. 2019;53:101174. DOI: 10.1016/j.jddst.2019.101174.
8. Yanilkin VV, Nasretdinova GR, Osin YN, Salnikov VV. Anthracene mediated electrochemical synthesis of metallic cobalt nanoparticles in solution. *Electrochimica Acta*. 2015;168:82–88. DOI: 10.1016/j.electacta.2015.03.214.
9. Ansari SM, Bhor RD, Pai KR, Sen D, Mazumder S, Ghosh K, et al. Cobalt nanoparticles for biomedical applications: facile synthesis, physicochemical characterization, cytotoxicity behavior and biocompatibility. *Applied Surface Science*. 2017;414:171–187. DOI: 10.1016/j.apsusc.2017.03.002.
10. Seong G, Takami S, Arita T, Minami K, Hojo D, Yavari AR, et al. Supercritical hydrothermal synthesis of metallic cobalt nanoparticles and its thermodynamic analysis. *The Journal of Supercritical Fluids*. 2011;60:113–120. DOI: 10.1016/j.supflu.2011.05.003.
11. Shao H, Huang Y, Lee H, Sun YJ, Kim CO. Effect of PVP on the morphology of cobalt nanoparticles prepared by thermal decomposition of cobalt acetate. *Current Applied Physics*. 2006;6(supplement 1):e195–e197. DOI: 10.1016/j.cap.2006.01.038.
12. Ryzhonkov DI, Levina VV, Dzidziguri EL. *Nanomaterialy* [Nanomaterials]. 3rd edition. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy; 2012. 368 p. Russian.
13. Nguyen TH, Nguyen VM. The effect of surfactants on the particle size of iron, cobalt and nickel nanopowders. *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya*. 2020;1:22–28. Russian. DOI: 10.17073/1997-308X-2020-22-28.
14. Nguyen TH, Konyukhov YV, Nguyen VM, Levina VV, Karpenkov DY. Magnetic properties of Fe, Co, Ni nanopowders produced by chemical-metallurgy method. In: Lileev AS, compiler. *Tezisy XXII Mezhdunarodnoi konferentsii po postoyannym magnitam; 23–27 sentyabrya 2019 g.; Suzdal', Rossiya* [Abstracts of the 22th International conference about permanent magnets; 2019 September 23–27; Suzdal, Russia]. Moscow: Grafit; 2019. p. 104–105. Russian.
15. Lapsina PV, Dodonov VG, Pugachev VM, Kagakin EI. Receiving ultradisperse cobalt by reduction of crystal cobalt carbonate. *Vestnik Kemerovskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2012;1(4):267–271. Russian.
16. Nguyen VM, Konyukhov YuV, Ryzhonkov DI. Investigation of the influence of electromagnetic field and energy-mechanical processing on the production of metallic cobalt nanopowder by hydrogen reduction. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2018;61(2):96–101. Russian. DOI: 10.17073/0368-0797-2018-2-96-101.
17. Konyukhov YuV, Levina VV, Ryzhonkov DI, Puzik II. [Properties of nanosized iron powders produced by chemical-metallurgy method using surfactants]. *Rossiiskie nanotekhnologii*. 2008;3(5–6):158–163. Russian.
18. Shchukin ED, Pertsov AV, Amelina EA. *Kolloidnaya khimiya* [Colloidal chemistry]. 3rd edition. Moscow: Vysshaya shkola; 2004. 445 p. Russian.
19. Abramzon AA, Bobrova LE, Zaichenko LP, Izmailova VN, Novozhenets AA, Rokhlenko AA, et al. *Poverkhnostnye yavleniya i poverkhnostno-aktivnye veshchestva* [Surface phenomena and surfactants]. Abramzon AA, Shchukin ED, editors. Ленинград: Khimiya; 1984. 392 p. Russian.
20. Frolov YuG. *Kurs kolloidnoi khimii. Poverkhnostnye yavleniya i dispersnye sistemy* [Colloidal chemistry course. Surface phenomena and dispersed systems]. 3rd edition. Moscow: Al'yans; 2004. 463 p. Russian.

Статья поступила в редколлегию 02.09.2020.
Received by editorial board 02.09.2020.