

УДК 621.762.2 : 621.921.1 : 620.22-022.532
DOI dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2020-22-28

Влияние поверхностно-активных веществ на дисперсность нанопорошков железа, кобальта и никеля

© 2020 г. Т.Х. Нгуен, В.М. Нгуен

Национальный исследовательский технологический университет (НИТУ) «МИСиС», г. Москва
Технологический институт, г. Ханой, Вьетнам

Статья поступила в редакцию 12.11.19 г., доработана 17.12.19 г., подписана в печать 19.12.19 г.

Проведено исследование влияния поверхностно-активных веществ (ПАВ) на дисперсность нанопорошков (НП) железа, кобальта и никеля, полученных химико-металлургическим методом – водородным восстановлением их гидроксидных соединений FeOOH , $\text{Co}(\text{OH})_2$ и $\text{Ni}(\text{OH})_2$ при температурах 400, 285 и 280 °С соответственно. Эти гидроксиды заранее были синтезированы химическим осаждением из соответствующих растворов нитрата раствором щелочи NaOH (10 мас.%) с использованием додецилсульфата натрия (ДСН) (0,1 %) и динатриевой соли этилендиаминтетрауксусной кислоты (ЭДТА) (0,3 %). Для изучения указанных НП применяли методы рентгеновской дифрактометрии, сканирующей электронной микроскопии, измерения удельной поверхности по низкотемпературной адсорбции азота. Согласно рентгенофазовому анализу все полученные образцы НП Fe, Co и Ni содержат чистые металлические фазы. Результаты электронного микроскопического анализа и измерения удельной поверхности порошковых образцов свидетельствуют, что добавление различных ПАВ в исходную среду синтеза гидроксидных соединений оказывает значительное влияние на дисперсность полученных НП. Выявлено, что добавка 0,1 % ДСН приводит к уменьшению среднего размера полученных частиц, а присутствие 0,3 % ЭДТА способствует образованию более крупных частиц металлов. Показано, что использование 0,3 % ЭДТА при осаждении исходных гидроксидных прекурсоров позволяет получить металлические НП с наиболее узкими распределениями кристаллитов по размерам.

Ключевые слова: нанопорошок, наночастица, железо, кобальт, никель, поверхностно-активное вещество, додецилсульфат натрия, динатриевая соль этилендиаминтетрауксусной кислоты, область когерентного рассеяния, удельная поверхность.

Нгуен Т.Х. – аспирант кафедры функциональных наносистем и высокотемпературных материалов НИТУ «МИСиС» (119991, г. Москва, Ленинский пр-т, 4). E-mail: hturu7@yandex.ru.

Нгуен В.М. – канд. техн. наук, исследователь Технологического института (143315, Вьетнам, г. Ханой). E-mail: chinhnhan88@gmail.com.

Для цитирования: Нгуен Т.Х., Нгуен В.М. Влияние поверхностно-активных веществ на дисперсность нанопорошков железа, кобальта и никеля. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2020. No. 1. С. 22–28. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2020-22-28.

Nguyen T.H., Nguyen V.M.

The effect of surfactants on the particle size of iron, cobalt and nickel nanopowders

This paper studies the effect of surfactants on the particle size of metal nanopowders (NPs): iron, cobalt and nickel synthesized using chemical-metallurgy method – hydrogen reduction of hydroxide compounds FeOOH , $\text{Co}(\text{OH})_2$ and $\text{Ni}(\text{OH})_2$ at 400, 285, and 280 °C, respectively. These hydroxides were pre-synthesized via chemical deposition from the corresponding nitrate solutions with NaOH alkali solution (10 wt.%) using sodium dodecyl sulfate (SDS) (0.1 %) and ethylenediaminetetraacetic acid disodium salt (EDTA) (0.3 %). The obtained NPs were studied using such methods as X-ray diffractometry (XRD), scanning electron microscopy (SEM), and measurements of the specific surface area by low-temperature nitrogen adsorption. According to XRD shows that all the obtained samples of NPs Fe, Co and Ni contain pure metallic phases. The results of electron microscopic analysis and measurement of the specific surface area of powder samples show that the addition of various surfactants to the initial synthesis medium of hydroxide compounds has a significant effect on the size and morphology of the obtained NPs. It was found that the addition of 0.1 % SDS leads to a decrease in the average size of the obtained particles, and the presence of 0.3 % EDTA contributes to the formation of larger metal particles. It was shown that the use of 0.3 % EDTA in deposition of initial hydroxide precursors makes it possible to obtain metal NPs with the narrowest crystallite size distributions.

Keywords: nanopowder, nanoparticle, iron, cobalt, nickel, surfactant, sodium dodecyl sulfate, ethylenediaminetetraacetic acid disodium salt, coherent scattering region, specific surface area.

Nguyen T.H. – postgraduate student of the Department of functional nanosystems and high-temperature materials, National University of Science and Technology (NUST) «MISIS» (119991, Russia, Moscow, Leninskii pr., 4). E-mail: hturu7@yandex.ru.

Nguyen V.M. – PhD. Sci. (Eng.), researcher, Institute of Technology (143315, Vietnam, Hanoi). E-mail: chinhnhan88@gmail.com.

Citation: Nguyen T.H., Nguyen V.M. The effect of surfactants on the particle size of iron, cobalt and nickel nanopowders. *Izvestiya Vuzov. Poroshkovaya Metallurgiya i Funktsional'nye Pokrytiya (Universities' Proceedings. Powder Metallurgy and Functional Coatings)*. 2020. No. 1. P. 22–28 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2020-22-28.

Введение

Одним из наиболее перспективных и прорывных направлений развития науки являются исследование и использование нанотехнологий и наноматериалов [1–6]. В настоящее время металлические нанопорошки (НП), в частности НП Fe, Co и Ni, достаточно широко применяются в различных областях техники и промышленности. Например, НП Fe, Co и Ni используются для создания магнитных материалов с особыми магнитными свойствами, электропроводящих покрытий, применяются в электронике, медицине, производстве катализаторов и т.д. [7–10]. Получение НП Fe, Co и Ni проводится различными механическими и физико-химическими методами, большинство из которых характеризуются высокими энергозатратами, пониженной производительностью. Химико-металлургический метод, заключающийся в химическом осаждении кислородсодержащих соединений металлов с последующими термическим разложением и восстановлением, обладает рядом преимуществ — таких, как низкие затраты, экологическая чистота, возможность контролировать свойства продуктов в ходе их получения [11–13]. Кроме того, метод позволяет утилизировать отходы, в том числе и техногенные, для подготовки исходного сырья [14]. Существуют разные способы для регулирования свойств (в основном морфологии и дисперсности частиц) синтезируемых НП металлов, например, путем подбора различных временно-температурных режимов процессов их синтеза, контроля концентрации исходных растворов, кислотности и температуры среды в стадии осаждения и др. [11, 15–20]. Однако использование этих приемов не всегда дает требуемый результат. В последнее время применение ПАВ является эффективным средством для регулирования дисперсности создаваемых НП.

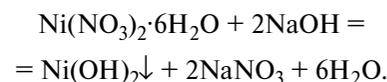
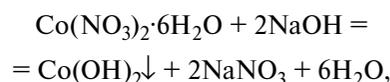
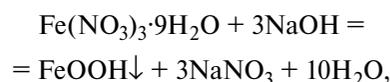
Цель данной работы — исследование влияния ПАВ на дисперсность нанопорошков Fe, Co и Ni, полученных химико-металлургическим методом, а также выбор оптимальных параметров технологии их получения для дальнейших исследований.

Материалы и методики исследований

Прекурсоры — гидроксиды FeOOH, Co(OH)₂ и Ni(OH)₂ — были получены осаждением из 10 %-ных водных растворов соответственно Fe(NO₃)₃·9H₂O

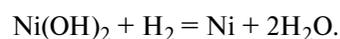
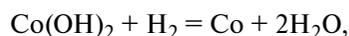
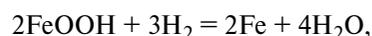
(ТУ 6-09-02-553-96), Co(NO₃)₂·6H₂O (ЧДА, ГОСТ 4528-78) и Ni(NO₃)₂·6H₂O (ЧДА, ГОСТ 4055-78) с использованием 10 %-ного раствора щелочи NaOH в качестве осадителя. На основе анализа литературы в качестве ПАВ были выбраны додецилсульфат натрия C₁₂H₂₅SO₄Na (ДСН, 0,1 %) и динатриевая соль этилендиаминтетрауксусной кислоты C₁₀H₁₄O₈N₂Na₂ (ЭДТА, 0,3 %) [21]. Для сравнения были получены 3 образца гидроксидов железа, кобальта и никеля без использования ПАВ.

Процесс осаждения проведен при комнатной температуре и непрерывном перемешивании, pH = 11 для получения НП железа и pH = 9 для НП кобальта и никеля [22]. Получение гидроксидов металлов проходит по следующим реакциям:



Контроль pH осуществлялся pH-метром марки «Эксперт 001» (ООО «Эконикс-Эксперт», г. Москва), погрешность измерений составляла ±0,03.

С помощью центрифуги полученные осадки гидроксидов промывали до полной отмытки ионов растворенной соли, которую контролировали по pH раствора над осадком. Затем осадок сушили при температуре 80 °С в течение 48 ч. После этого высушенные гидроксиды Fe, Co и Ni измельчали в специальной мельнице. Полученные порошки были восстановлены в токе водорода в трубчатой печи SNOL 0,2/1250 (АВ «UMEGA», Литва) при температурах 400, 285 и 280 °С для FeOOH, Co(OH)₂ и Ni(OH)₂ соответственно [21, 22] в течение 3 ч по реакциям



Величину удельной поверхности ($S_{\text{уд}}$) продуктов процесса восстановления измеряли методом БЭТ по низкотемпературной адсорбции азота

на анализаторе NOVA 1200e (Quantachrome Instruments, США). Средние размеры частиц металлов вычисляли по данным измерений величины $S_{уд}$:

$$D_{ср} = 6/(\rho S_{уд}),$$

где ρ — пикнометрическая плотность, кг/м³; $S_{уд}$ — удельная поверхность, м²/кг; $D_{ср}$ — средний размер частиц, м.

Фазовый состав порошковых образцов определяли методом РФА на рентгеновском дифрактометре «Дифрей-401» (ЗАО «Научные приборы», г. Санкт-Петербург) при комнатной температуре на CuK_{α} -излучении. Расчет размеров областей когерентного рассеяния (ОКР) осуществляли по уширению дифракционных пиков методами аппроксимации и Фурье-анализа с выбором логарифмически-нормального закона распределения (методом Селиванова—Смылова) [23].

Размер и морфологию полученных образцов исследовали методом электронной микроскопии на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) «Tescan Vega 3» (TESCAN, Чехия).

Результаты исследований и их обсуждение

Результаты РФА полученных образцов нанопорошков Fe, Co и Ni показаны на рис. 1. Они свидетельствуют, что все образцы содержат чистую металлическую фазу. По данным РФА были построены диаграммы распределения по размерам ОКР кристаллитов НП металлов, полученных в различных условиях (рис. 2).

На основе анализа полученных распределений (см. рис. 2) можно сделать вывод, что наименьшими размерами ОКР характеризуются образцы, приготовленные с использованием 0,1 % ДСН (29,5 нм для Co и 40,9 нм для Ni). Кристаллиты НП Co и Ni, полученные при добавлении 0,3 % ЭДТА, обладают наибольшим средним размером ОКР (36,4 нм для Co и 72,6 нм для Ni), при этом они имеют более узкое распределение.

В таблице приведены значения среднего размера восстановленных частиц НП Fe, Co и Ni, рассчитанного по результатам измерения удельной поверхности и исходя из данных электронно-микроскопического анализа, а также

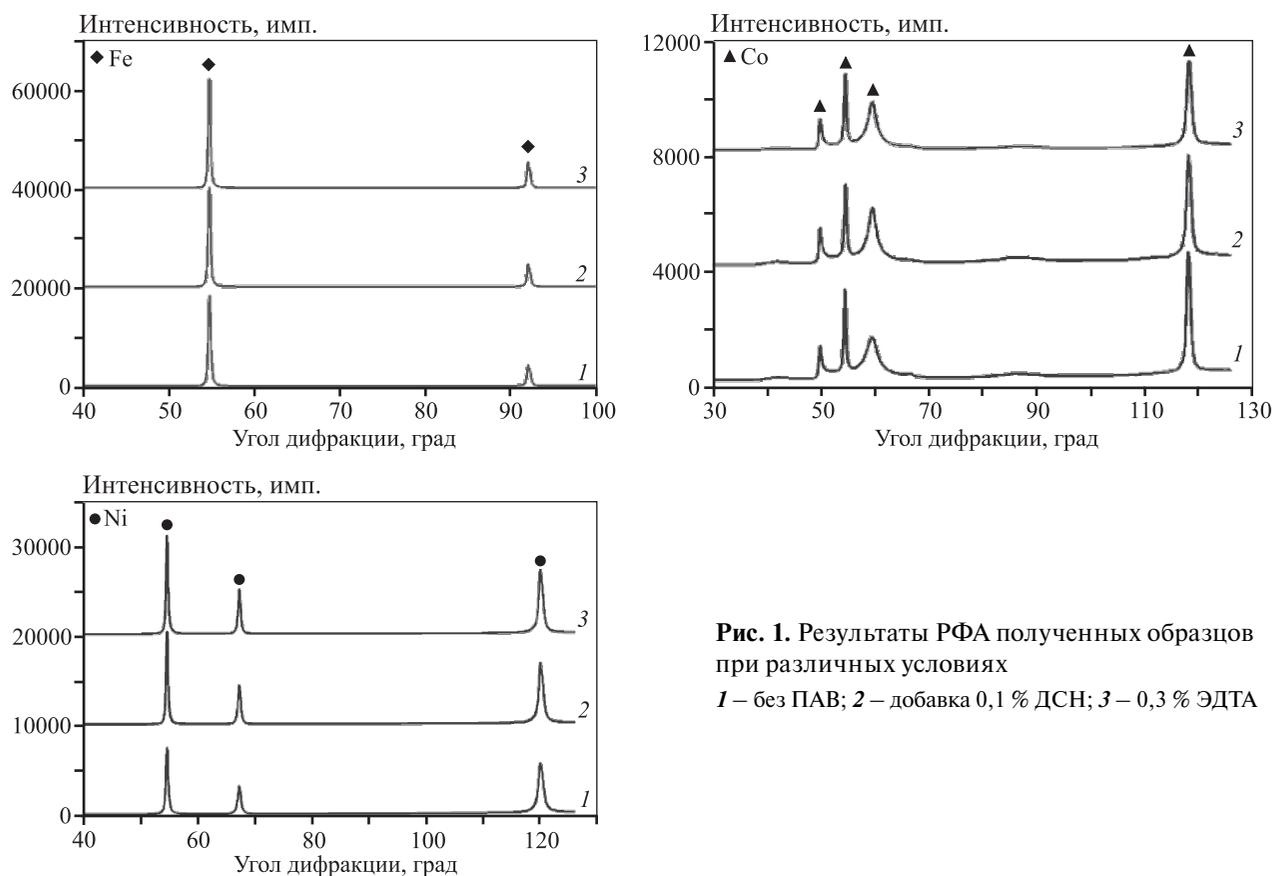


Рис. 1. Результаты РФА полученных образцов при различных условиях
1 — без ПАВ; 2 — добавка 0,1 % ДСН; 3 — 0,3 % ЭДТА

Величины удельной поверхности, среднего размера частиц и размера ОКР нанопорошков Fe, Co и Ni, рассчитанных по различным методам

Условия осаждения гидроксидов	$t_{\text{восст}}, ^\circ\text{C}$	Металлы	$S_{\text{уд}}, \text{м}^2/\text{г}$	$D_{\text{ср}}, \text{нм}$		$D_{\text{ОКР}}, \text{нм}$ (по РФА)
				по $S_{\text{уд}}$	по СЭМ	
Без ПАВ	400	Fe	7,3	105	110	—
ДСН (0,1 %)			7,7	99	95	—
ЭДТА (0,3 %)			5,8	131	187	—
Без ПАВ	285	Co	6,0	112	92	35,2
ДСН (0,1 %)			7,5	90	86	29,5
ЭДТА (0,3 %)			4,7	143	122	36,4
Без ПАВ	280	Ni	7,0	96	79	65,1
ДСН (0,1 %)			8,4	80	66	40,9
ЭДТА (0,3 %)			2,3	293	265	72,6

среднего размера ОКР, определенного с помощью РФА.

Выявлено, что для всех образцов НП металлов добавление 0,1 % ДСН приводит к уменьшению среднего размера полученных частиц, а присутствие 0,3 % ЭДТА способствует образованию более крупных частиц металлов.

Сравнивая результаты, видно, что наиболее эффективно на показатель $S_{\text{уд}}$ нанопорошков металлов влияет ДСН — при его введении в количестве 0,1 % величина $S_{\text{уд}}$ больше по сравнению с образцом без ПАВ, а, соответственно, средний размер наночастиц (НЧ) ниже.

Известно, что додецилсульфат натрия ДСН ($\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{SO}_4\text{Na}$) представляет собой анионное ПАВ, которое в водном растворе легко диссоциирует на катион Na^+ и анион $\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{SO}_4^-$. В ходе образования НЧ гидроксидов металлов анион $\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{SO}_4^-$ может адсорбироваться на их поверхности. Покрытие поверхности образующихся гидроксидных зародышей препятствует их слипанию друг с другом и дальнейшему процессу агрегации, что приводит к повышению дисперсности частиц гидроксидов металлов и, соответственно, уменьшению среднего размера полученных из них НЧ металлов Fe, Co и Ni [24].

Показано, что при использовании ЭДТА в количестве 0,3 % наблюдается снижение величины $S_{\text{уд}}$ образцов, т.е. в этом случае средний размер полученных НЧ металлов растет.

Известно, что комплексон ЭДТА, в отличие от ДСН, не имеет углеводородной цепочки и полярной головы. В молекулах ЭДТА с атомами азота связаны 4 алкил-карбоксильных группы CH_2COO^- , с помощью которых ЭДТА может захватывать катионы в водных растворах солей металлов (Fe^{3+} , Co^{2+} и Ni^{2+}) с образованием координационных связей и, далее, комплексов [25]. Добавка в растворы солей 0,3 % ЭДТА обеспечивает высокую концентрацию комплексов Fe—ЭДТА, Co—ЭДТА и Ni—ЭДТА. Поэтому неизбежными становятся процессы столкновения зародышевых частиц гидроксидов металлов в растворах и интенсивная кристаллизация с последующим ростом. Быстрый рост гидроксидных зародышей приводит к получению меньшей дисперсности НЧ в конце процессов осаждения [26].

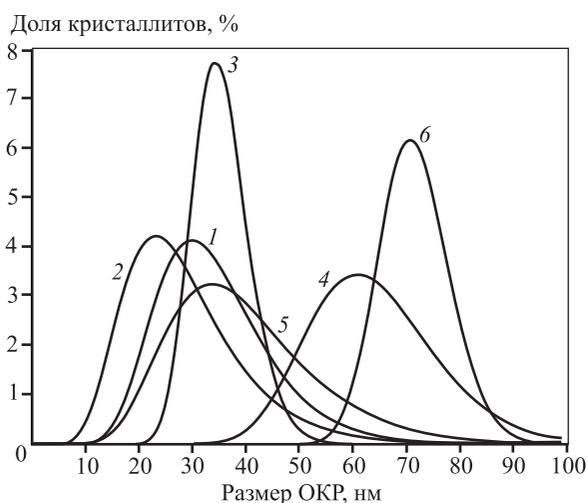


Рис. 2. Распределение кристаллитов по размерам ОКР при различных условиях
 1 – Co без ПАВ; 2 – Co с 0,1 % ДСН; 3 – Co с 0,3 % ЭДТА;
 4 – Ni без ПАВ; 5 – Ni с 0,1 % ДСН; 6 – Ni с 0,3 % ЭДТА

Результат СЭМ-микрофотографий (рис. 3) также хорошо согласуется с данными измерения среднего размера НЧ методом БЭТ. Показано, что добавление ПАВ в исходную среду синтеза гидроксидных соединений заметно влияет на дисперсность полученных НП.

Для образцов Fe (рис. 3, *a-x*, *a-y*, *a-z*), независимо от условий получения, частицы имеют округлую и сферическую формы. У частиц Fe, полученных без использования ПАВ (рис. 3, *a-x*), средний размер $D_{cp} \sim 110$ нм. Для частиц Fe, полученных с добавлением 0,1 % ДСН (рис. 3, *a-y*), $D_{cp} \sim 95$ нм. Размер частиц порошка, полученного с применением 0,3 % ЭДТА (рис. 3, *a-z*), самый большой и составляет $D_{cp} \sim 187$ нм.

Для образцов Co частицы во всех случаях формируются в виде чешуек. Средний размер частиц составляет ~ 92 , 86 и 122 нм соответственно без использования ПАВ (рис. 3, *b-x*), с 0,1 % ДСН (рис. 3, *b-y*) и с 0,3 % ЭДТА (рис. 3, *b-z*).

Для образцов Ni в случаях без ПАВ (рис. 3, *c-x*) и с 0,1 % ДСН (рис. 3, *c-y*) частицы находятся в сильно спеченном состоянии, каждая из них соединена с несколькими соседними частицами перешейками, их средний размер составляет ~ 79 и 66 нм соответственно. В случае добавления при синтезе 0,3 % ЭДТА (рис. 3, *c-z*) увеличивается средний размер частиц: $D_{cp} \sim 265$ нм.

Установлено, что для всех нанопорошков Fe, Co и Ni, полученных при добавлении 0,1 % ДСН, сред-

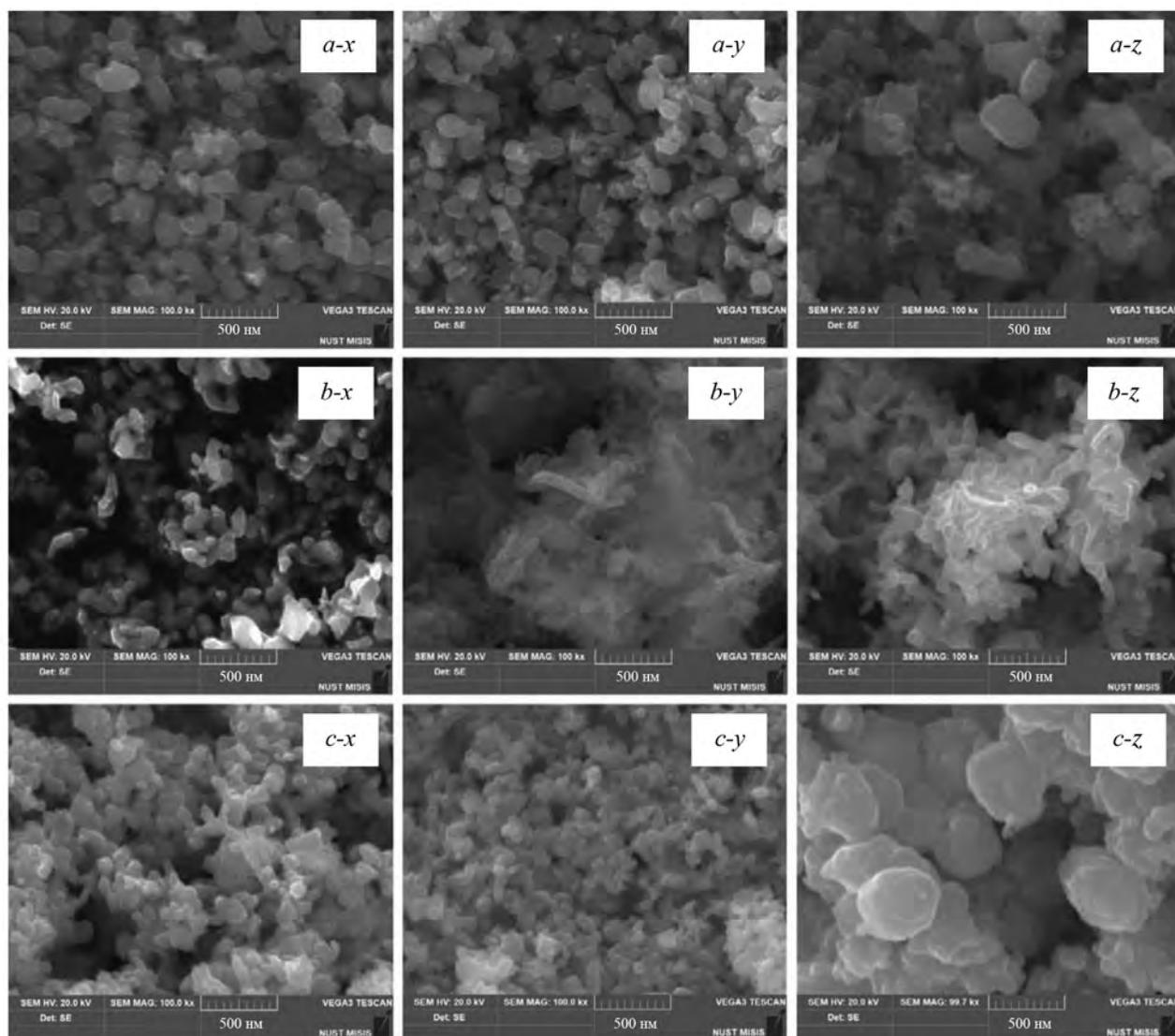


Рис. 3. СЭМ-микрофотографии нанопорошков Fe (*a*), Co (*b*) и Ni (*c*), полученных при различных условиях *x* – без ПАВ; *y* – с 0,1 % ДСН; *z* – 0,3 % ЭДТА

ний размер их частиц уменьшается, а при использовании 0,3 % ЭДТА наблюдается обратное влияние — рост среднего размера частиц по сравнению с образцами без ПАВ. Эти результаты согласуются с данными по измерению $S_{уд}$ полученных образцов.

Заключение

Показано, что добавление различных ПАВ в исходную реакционную среду при осаждении гидроксидных прекурсоров позволяет регулировать дисперсность частиц нанопорошков Fe, Co и Ni, полученных химико-металлургическим методом.

Установлено, что введение 0,1 % ДСН в исходные растворы осаждения приводит к уменьшению среднего размера частиц НП Fe, Co и Ni, а добавки 0,3 % ЭДТА — к значительному его увеличению.

Использование 0,3 % ЭДТА при осаждении гидроксидов металлов позволяет получить металлические НП с наиболее узким распределением кристаллитов по размерам.

Литература/References

1. Springer handbook of nanotechnology. Ed. Bhushan Bharat. 4th ed. Berlin: Verlag Heidelberg, 2017.
2. Ярославцев А.Б., Иванов В.К., Федоров П.П., Баранчиков А.Е., Лермонтов С.А., Малкова А.Н., Малыгин А.А., Ямпольский Ю.П., Белов Н.А., Алентьев А.Ю., Леонидов И.А., Добровольский Ю.А., Скундин А.М., Козюхин С.А., Шерченков А.А., Гринберг В.А., Кондратов С.В., Юрков Г.Ю., Фионов А.С., Хаджиев С.Н., Максимов А.Л., Кадиев Х.М., Штанский Д.В., Левашов Е.А., Сухорукова И.В., Гусаров В.В., Альмяшева О.В., Марикуца А.В., Румянцева М.Н., Гасков А.М. Отв. ред. А.Б. Ярославцев. Наноматериалы. Свойства и перспективные приложения. М.: Научный мир, 2014.
Yaroslavtsev A.B., Ivanov V.K., Fedorov P.P., Baranchikov A.E., Lermontov S.A., Malkova A.N., Malygin A.A., Yampol'skii Yu.P., Belov N.A., Alent'ev A.Yu., Leonidov I.A., Dobrovolskii Yu.A., Skundin A.M., Kozuyukhin S.A., Sherchenkov A.A., Grinberg V.A., Kondratov S.V., Yurkov G.Yu., Fionov A.S., Khadzhiev S.N., Maksimov A.L., Kadiev Kh.M., Shtanskii D.V., Levashov E.A., Sukhorukova I.V., Gusarov V.V., Al'myasheva O.V., Marikutsa A.V., Rumyantseva M.N., Gas'kov A.M. Ed. A.B. Yaroslavtsev. Nanomaterials. Properties and promising applications. Moscow: Nauchnyi mir, 2014 (In Russ.).
3. Samal S.S., Manohara S.R. Nanoscience and nanotechnology in India: A broad perspective. *Mater. Today Proc.* 2019. Vol. 10. P. 151—158.
4. Olowoyin R. Nanotechnology: The future of fire safety. *Safety Sci.* 2018. Vol. 110. P. 214—221.
5. Justin D., Geraldine R. Does nanotechnology research generate an innovation premium over other types of research? Evidence from Ireland. *Technol. Soc.* 2019. Vol. 59. P. 101183—101190.
6. Vibhu K.V., Sakhivel R.R.M., Surabhi S., Moon A. Nanotechnology in spine surgery: A current update and critical review of the literature. *World Neurosurgery.* 2019. Vol. 123. P. 142—155.
7. Chao'en Li, Lisa Wong, Lianguang Tang, Nicola Scarlett, Ken Chiang, Jim Patel, Nicholas Burke, Valérie Sage. Kinetic modelling of temperature-programmed reduction of cobalt oxide by hydrogen. *Appl. Catal., A.* 2017. Vol. 537. P. 1—11.
8. Левина В.В. Получение одно- и двухкомпонентных наноматериалов на основе железа, никеля, меди, кобальта методом химического диспергирования. Дис. ... докт. техн. наук. М.: МИСиС, 2005.
Levina V.V. Preparation of one- and two-component nanomaterials based on iron, nickel, copper, cobalt by chemical dispersion: Dissertation of Dr. Sci. (Tech.). Moscow: MISIS, 2005 (In Russ.).
9. Zhu W., Dong X., Huang H., Qi M. Iron nanoparticles-based magnetorheological fluids: A balance between MR effect and sedimentation stability. *J. Magn. Magn. Mater.* 2019. Vol. 491. P. 165556—165561.
10. Jyoti Chaudhary, Giriraj Tailor, Yadav B.L., Oshon Michael. Synthesis and biological function of nickel and copper nanoparticles. *Heliyon.* 2019. Vol. 5. Iss. 6. P. 1878—1882.
11. Рыжонков Д.И., Левина В.В., Дзидзигури Э.Л. Наноматериалы: Учеб. пос. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012.
Ryzhonkov D.I., Levina V.V., Dzidziguri E.L. Nanomaterials. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2012 (In Russ.).
12. Forsman J. Production of Co, Ni, and Cu nanoparticles by hydrogen reduction: Thesis for the degree of Dr. Sci. (Tech.). Espoo (Finland): Aalto University School of Science and Technology, 2013.
13. Noémie Ballot, Frédéric Schoenstein, Silvana Mercone, T. Chauveau, Ovidiu Brinza, Noureddine Jouini. Reduction under hydrogen of ferrite MFe_2O_4 (M: Fe, Co, Ni) nanoparticles obtained by hydrolysis in polyol medium: A novel route to elaborate $CoFe_2$, Fe and Ni_3Fe nanoparticles. *J. Alloys Compd.* 2012. Vol. 536. P. 381—385.
14. Конюхов Ю.В., Рыжонков Д.И., Левина В.В., Дзидзигури Э.Л. Получение нанопорошков железа из железорудного сырья. *Изв. вузов. Чер. металлургия.* 2005. No. 3. С. 11—15.
Konyukhov Yu.V., Ryzhonkov D.I., Levina V.V., Dzidziguri E.L. Obtaining nanopowders of iron from iron ore raw

- materials. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 2005. No. 3. P. 11–15 (In Russ.).
15. *Dahman Y.* Nanotechnology and functional materials for engineers. Elsevier Health Sciences Division, 2017.
 16. *Banik S., Mahajan A.* Size control synthesis of pure Ni nanoparticles and anodic-oxidation of Butan-1-ol in alkali. *Mater. Chem. Phys.* 2019. Vol. 235. P. 121747–121756.
 17. *Jun Liang, Jing Wang, Saijie Li, Lu Xu, Rui Wang, Ruipeng Chen, Yunfeng Sun.* The size-controllable preparation of chitosan/silver nanoparticle composite microsphere and its antimicrobial performance. *Carbohydr. Polym.* 2019. Vol. 220. P. 22–29.
 18. *Andrew Pendergast, Matthew Glasscott, Christophe Renault, Jeffrey E. Dick.* One-step electrodeposition of ligand-free Pd–Pt alloy nanoparticles from water droplets: Controlling size, coverage, and elemental stoichiometry. *Electrochim. Commun.* 2019. Vol. 98. P. 1–5.
 19. *Delbecq F., Delfosse P.* Study of a gelled Deep Eutectic solvent metal salt solution as template for the production of size-controlled small noble metal nanoparticles. *Colloids Surf., A*. 2019. Vol. 567. P. 55–62.
 20. *Linlin Xu, Danye Liu, Dong Chen, Hui Liu, Jun Yang.* Size and shape controlled synthesis of rhodium nanoparticles. *Heliyon*. 2019. Vol. 5. Iss. 1. P. 1165–1208.
 21. *Конюхов Ю.В.* Разработка научно-технологических основ получения нанопорошков из техногенного сырья и модифицирования материалов с применением энергомеханической обработки: Дис. ... докт. техн. наук. М.: МИСиС, 2018.
Конюхов Ю.В. Development of scientific and technological foundations for obtaining nanopowders from industrial raw materials and materials modification using energy-mechanical processing: Dissertation of Dr. Sci. (Tech.). Moscow: MISIS, 2018 (In Russ.).
 22. *Нгуен В.М.* Разработка эффективных способов получения нанопорошков триады железа водородным восстановлением из оксидных соединений в вихревом поле и тонких слоях: Дис. ... канд. техн. наук. М.: МИСиС, 2018.
Nguyen V.M. Development of effective methods for producing nanopowders of the iron triad by hydrogen reduction from oxide compounds in a vortex field and thin layers: Dissertation of PhD. Sci. (Tech.). Moscow: MISIS, 2018 (In Russ.).
 23. *Дзидзигури Э.Л., Сидорова Е.Н.* Ультрадисперсные среды. Метод рентгеновской дифрактометрии для исследования материалов: Учеб. пос. М.: МИСиС, 2007.
Dzidziguri E.L., Sidorova E.N. Ultrafine media. X-ray diffractometry for materials research. Moscow: MISIS, 2007 (In Russ.).
 24. *Фролов Ю.Г.* Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы. Учеб. для вузов. М.: Химия, 1989.
Frolov Yu.G. The course of colloid chemistry. Surface phenomena and disperse systems. Moscow: Khimiya, 1989 (In Russ.).
 25. *Абрамзон А.А., Боброва Л.Е., Зайченко Л.П., Измайлова В.Н., Новоженец А.А., Рохленко А.А., Туловская З.Д., Шиц Л.А., Ямпольская Г.П.* Поверхностные явления и поверхностно-активные вещества: Справочник. Л.: Химия, 1984.
Abramzon A.A., Bobrova L.E., Zaichenko L.P., Izmailova V.N., Novozhenets A.A., Rokhlenko A.A., Tulovskaya Z.D., Shits L.A., Yampolskaya G.P. Handbook of surfactants and interfacial phenomena. Leningrad: Khimiya, 1984 (In Russ.).
 26. *Антонов А.Н.* Влияние поверхностно-активных веществ на синтез наночастиц гидроксида железа: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: МГУ, 2013.
Antonov A.N. The effect of surfactants on the synthesis of iron hydroxide nanoparticles: Dissertation of Cand. Sci. (Phys.-Math.). Moscow: MGU, 2013 (In Russ.).