

НЕОРГАНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ  
И НАНОМАТЕРИАЛЫ

УДК 546.657

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ОТЖИГА  
НА КРИСТАЛЛИЗАЦИЮ НАНОЧАСТИЦ  $\text{Nd}_2\text{O}_3$ ,  
СИНТЕЗИРОВАННЫХ МЕТОДОМ ОСАЖДЕНИЯ

© 2022 г. О. Э. Абдурахмонов<sup>а</sup> \*, М. Э. Алисултанов<sup>а</sup>, Д. А. Вертаева<sup>а</sup>, А. Г. Мурадова<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Миусская пл., 9, Москва, 125047 Россия

\*e-mail: odilzhon.abdurakhmonov@mail.ru

Поступила в редакцию 14.02.2022 г.

После доработки 15.03.2022 г.

Принята к публикации 16.03.2022 г.

Химическим методом осаждения синтезированы наностержни  $\text{Nd}(\text{OH})_3$ . Термическим отжигом  $\text{Nd}(\text{OH})_3$  получен  $\text{Nd}_2\text{O}_3$ . Для определения термических эффектов, при которых проходят фазовые переходы, проведены термический и рентгенофазовый анализы. По определенным термическим эффектам проведен отжиг образца при температурах 330, 635, 794°C. С помощью сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии определены размеры полученных наностержней соединений неодима. Методом инфракрасной спектроскопии изучен процесс дегидратации ОН-групп при температурном отжиге. Во время отжига аморфного порошка при температуре 330°C получены наностержни  $\text{Nd}(\text{OH})_3$  со средней длиной 29 нм и диаметром 4 нм. Выявлено, что при температуре 794°C образовывались наностержни  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  с гексагональной кристаллической структурой. Средний размер наностержней в длину увеличился до 118 нм, в диаметре – до 28 нм.

*Ключевые слова:* наностержни, гидроксид неодима, оксид неодима

DOI: 10.31857/S0044457X22070029

## ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день наблюдается тенденция развития рынка электродвигателей и электроники в целом. Для миниатюризации электродвигателей и электроники требуется использование постоянных магнитов с высокими магнитными характеристиками и маленьким размером, этим обусловлен рост рынка постоянных магнитов [1]. Во многих электронных устройствах используются компоненты хранения информации, динамики и т.д., они требуют использования постоянных магнитов с высокими магнитными характеристиками [2, 3]. Важными характеристиками являются коэрцитивная сила и намагниченность, на них влияют такие факторы, как размер, форма и ориентация частиц [4].

На сегодняшний день постоянные магниты на основе сплава Nd–Fe–В имеют наибольшие значения коэрцитивной силы и магнитной энергии, что позволяет эффективно использовать их в устройствах, подверженных воздействию высоких внешних размагничивающих магнитных полей [5].

Физические методы – основные способы получения постоянных магнитов Nd–Fe–В, в их основе лежит процесс получения сплава Nd–Fe–В

с последующим измельчением до порошков. Далее проводят ориентацию полученных порошков в магнитном поле и спекание [6–9]. Однако физические методы имеют множество недостатков таких, как высокая энергозатратность, сложность контроля размера получаемых частиц, использование в качестве исходного сырья дорогостоящих металлов высокой чистоты, длительное время производства [10]. Все вышеперечисленные факторы влияют на магнитные характеристики и себестоимость получаемой продукции [11]. Следовательно, необходима разработка альтернативного метода получения наноструктурированного сплава Nd–Fe–В.

Химические методы получения наноструктурированного сплава Nd–Fe–В являются многообещающей альтернативой физическим методам из-за их простоты и масштабируемости [12–14]. Они позволяют контролировать размер получаемых наночастиц. Кроме того, химические методы имеют такие преимущества, как контролируемый гранулометрический состав, низкие энергозатраты, что влияет на магнитные характеристики и стоимость готовой продукции [15–17].

Ранее мы сообщали о химическом синтезе наноструктурированного сплава Nd–Fe–В [18]. Для получения которого важна однородность и боль-

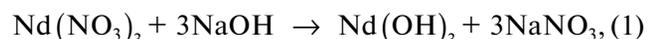
шая удельной площадь поверхности исходных наночастиц оксида неодима, оксида железа и оксобората железа, используемых в качестве основных компонентов для получения наноструктурированного сплава Nd–Fe–B. Эти факторы очень важны для высокой реакционной способности и низкой температуры образования наноструктурированного сплава Nd–Fe–B.

На сегодняшний день представлено небольшое количество работ по получению наночастиц оксида неодима. Для синтеза наночастиц гидроксида и оксида неодима применяют различные методы: гидротермальный [19–21], золь-гель [22, 23], темплатный [24–26], микроэмульсионный [27], осаждения [28–30], электрохимический [31], плазменный [32] и др. Химический метод осаждения – это один из простых, дешевых, он требует небольшого количества специального оборудования и условий [33]. Имеются сообщения о синтезе наночастиц Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> этим методом. Например, в работе [28] получили наночастицы Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> термическим разложением осадка, полученного взаимодействием нитрата неодима с осадителем NH<sub>4</sub>HCO<sub>3</sub>. В данной работе не обсуждался процесс разложения полученных наночастиц до Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и их фазовый состав.

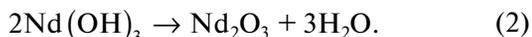
Цель работы – исследование влияния температуры отжига на кристаллизацию наночастиц Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Задачи исследования: синтезировать наностержни (НС) Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, определить фазовые переходы Nd(OH)<sub>3</sub> в NdOOH и Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

НС Nd(OH)<sub>3</sub> получены методом осаждения. В качестве осадителя использовали гидроксид натрия. Синтез НС состоит из двух последовательных стадий. На первой стадии получили промежуточный продукт – наночастицы гидроксида неодима:



на второй проводили отжиг полученного Nd(OH)<sub>3</sub>:



Используемые реактивы: гексагидрат нитрата неодима Nd(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> · 6H<sub>2</sub>O, гидроксид натрия NaOH с классификацией (х. ч.) и бидистиллированная вода. Готовили 0.02 М водный раствор Nd(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> и водный раствор NaOH с концентрацией 0.12 М. Термостатирование полученных растворов Nd(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> и NaOH проводили до температуры 90°C. Затем с помощью перистальтического насоса в раствор Nd(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> по каплям добавляли водный раствор NaOH. Синтез проводили при интенсивном перемешивании (1200 об./мин) с помощью магнитной мешалки и при поддержании

постоянной температуры в растворе 90°C. После смешения исходных растворов полученный раствор выдерживали в течение 15 мин при заданной температуре. Полученный осадок Nd(OH)<sub>3</sub> отделяли центрифугированием (3000 об./мин, 5 мин) и промывали 3 раза бидистиллированной водой. Затем осадок высушивали при температуре 100°C в течение 90 мин.

Для определения размера и формы НС использовали просвечивающий электронный микроскоп (ПЭМ) JEM-100CX (Jeol, Япония). Исследование НС методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) выполняли с помощью JEOL JEM-6510LV. Фазовый состав образцов определяли по дифракционной картине рентгеновского излучения на поликристаллических порошках. Дифрактограммы снимали на приборе D2 Phaser (Bruker-AXS, Германия), излучение CuK<sub>α</sub>, фильтр – Ni, с графитовым монохроматором (λ = 1.54178 Å). Режим трубки (Cu) 10 мА, 30 кВ. Диапазон значений угла 2θ от 10° до 90°, шаг 0.02°, щель 0.6 мм, выдержка в точке – 1 с, дискриминатор по энергиям – 0.17–0.23 кэВ. Расшифровку спектра и расчет фазового состава осуществляли с помощью библиотеки JCPDS-ICDD с использованием специализированного программного обеспечения. Термический анализатор (STA 449 F5 Jupiter, Netzsch, Германия) использовали для записи профилей термогравиметрической/сканирующей калориметрии (ТГ/ДСК). Для измерений брали свежеприготовленный гидроксид неодима с начальной массой 8.61 мг. Анализ проводили в инертной атмосфере азота, образцы прогревали до 900°C со скоростью увеличения температуры 10 град./мин. ИК-спектры образцов получали с помощью спектрофотометра ИК-Фурье Nicolet 380 (Thermo Scientific, США) в области измерения 400–4000 см<sup>-1</sup>. Отжиг образцов проводили в муфельной печи Nabertherm (Nabertherm, Германия).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для изучения изменений в кристаллической структуре с повышением температуры полученные порошки гидроксида неодима исследовали методом ДСК/ТГ (рис. 1). На кривой ДСК анализа можно наблюдать несколько экзотермических эффектов при температурах 330, 559, 635 и 794°C. На производной от кривой ТГ зафиксировано два пика при температуре 330 и 635°C, которые совпадали с двумя термическими эффектами ДСК анализа. По данным ТГ анализа, первая стадия потери веса происходила постепенно, между 29–330°C. Потеря массы составила 8.92%. При последующем изменении температуры в диапазоне 330–635°C наблюдалась потеря массы 12.08%, что связано с частичной дегидратацией гидроксильных групп в Nd(OH)<sub>3</sub>. В диапазоне температур

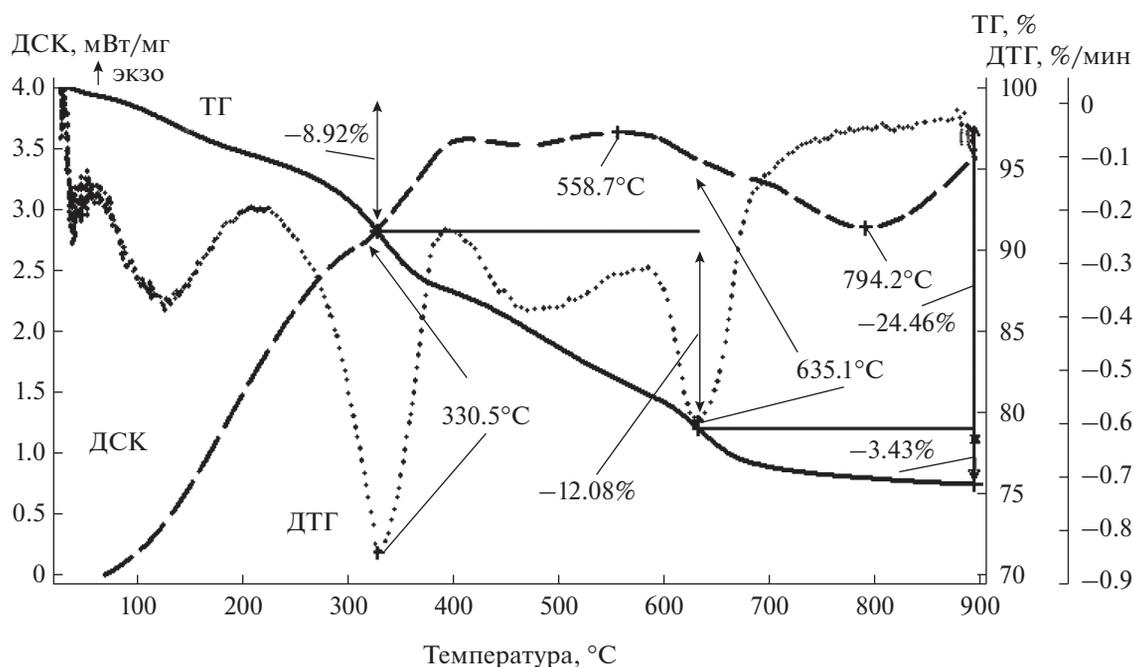


Рис. 1. Кривые ДСК/ТГ анализа для синтезированных  $\text{Nd}(\text{OH})_3$ .

635–900°C потеря массы составила 3.43%, это связано с полной дегидратацией. Для подробного изучения изменений, происходящих в образце при выше указанных термических эффектах ДСК/ТГ, проведен отжиг образцов при температурах 330, 635 и 794°C и РФА. На рис. 2 представлена дифрактограмма образца после сушки и образцов, отожженных при температурах 330, 635 и 794°C.

По представленным на рис. 2 дифрактограммам определен фазовый состав полученных образцов в зависимости от температуры отжига. На дифрактограмме исходного образца расположение пиков соответствует гексагональной структуре  $\text{Nd}(\text{OH})_3$  с пр. гр.  $P6_3/m$  и параметрами решетки  $a = b = 6.442$ ,  $c = 3.756$  Å по базе JSPDS № 06-0601 (рис. 2д) [34]. По ширине и высоте дифракционных пиков с помощью формулы Шеррера определен размер кристаллитов, он составлял 10 нм. Степень кристалличности образца определяли по данным РФА расчетным способом по формуле:

$$\chi_c = \frac{A_c}{A_c + A_a},$$

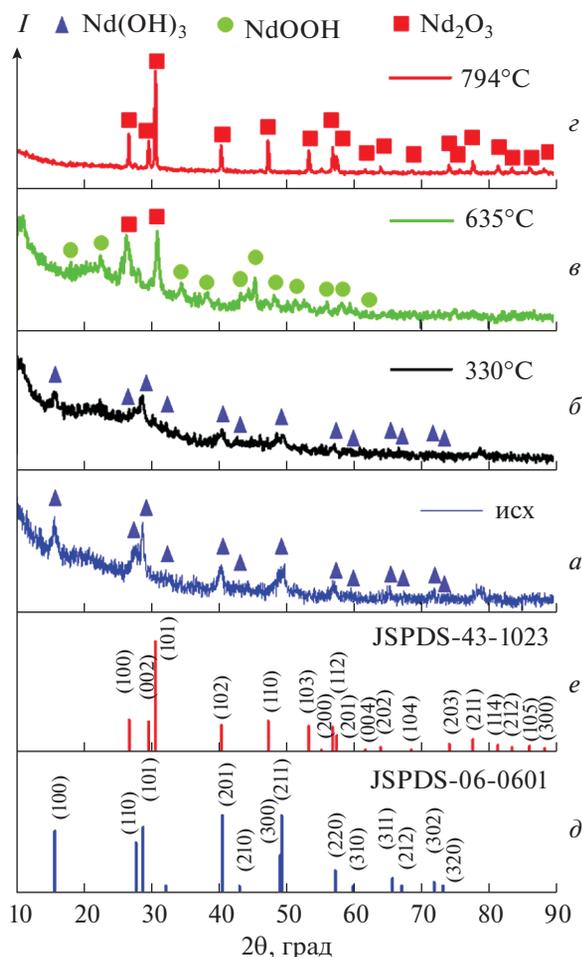
где  $\chi_c$  – кристалличность образца,  $A_c$  – площадь кристаллических пиков,  $A_a$  – площадь аморфных пиков.

После отжига образца при температуре 330°C можно заметить, что пики стали менее интенсивными по сравнению с исходным. Это можно объ-

яснить тем, что более крупные частицы  $\text{Nd}(\text{OH})_3$  могли начать рассыпаться при дегидратации, что еще сильнее ухудшило дифракцию. Это подтверждает степень кристалличности данного образца, она составила 28.61%. После отжига образцов неодима при температуре 635°C пики, относящиеся к  $\text{Nd}(\text{OH})_3$ , не наблюдались. Но отмечены новые пики, относящиеся к  $\text{NdOOH}$  и  $\text{Nd}_2\text{O}_3$ . Образование  $\text{NdOOH}$  связано со вторым этапом дегидратации:  $2\text{Nd}(\text{OH})_3 \rightarrow 2\text{NdOOH} + 2\text{H}_2\text{O}$  [35]. После отжига образца при 794°C на дифрактограмме пики, относящиеся к  $\text{NdOOH}$ , не наблюдались. Все полученные пики совпадают с  $\text{Nd}_2\text{O}_3$ . Все полученные пики по данным JSPDS № 43-1023 [36] относятся к гексагональной структуре  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  с пр. гр.  $P6/mmm$  с параметрами решетки  $a = b = 6.165$ ,  $c = 3.217$  Å. На основании расшифровки полученных дифрактограмм сделан вывод, что  $\text{Nd}(\text{OH})_3$  при температуре 635°C образуется смесь  $\text{NdOOH}$  и  $\text{Nd}_2\text{O}_3$ , а при повышении температуры до 794°C –  $\text{Nd}_2\text{O}_3$ .

Морфологию синтезированных частиц гидроксида неодима исследовали с помощью ПЭМ и СЭМ. Можно заметить, что полученные порошки после сушки состоят из агрегатов аморфных частиц  $\text{Nd}(\text{OH})_3$  (рис. 3).

После отжига образца при 330°C (рис. 4а) частицы имели форму НС, длиной 29 нм и диаметром 4 нм. Данные образцы имели характерный для соединения  $\text{Nd}(\text{OH})_3$  светло-сиреневый цвет.

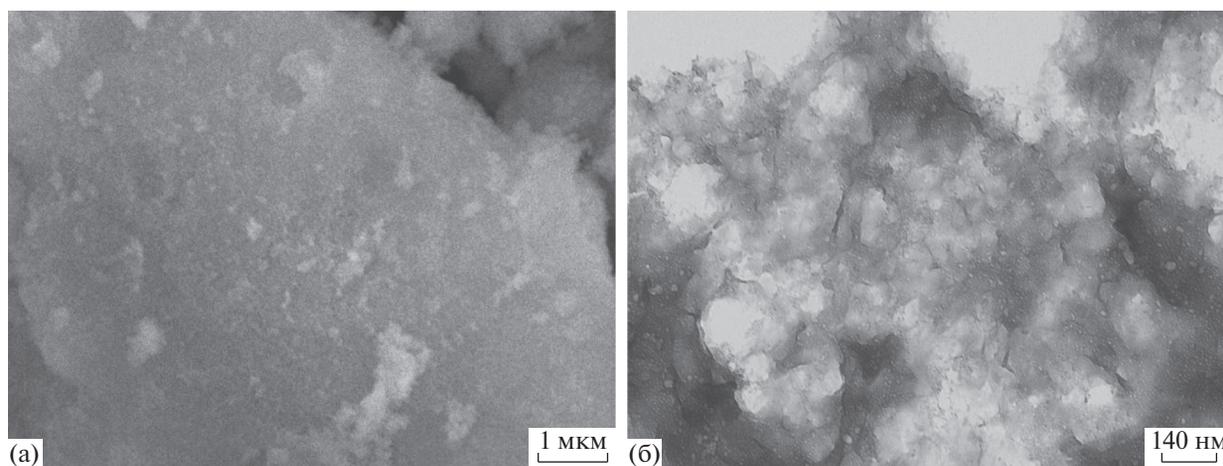


**Рис. 2.** Дифрактограммы: *a* – частиц  $\text{Nd}(\text{OH})_3$ , высушенных при  $100^\circ\text{C}$ , прокаленных при температуре: *b* –  $330^\circ\text{C}$ , *c* –  $635^\circ\text{C}$ , *e* – стандартная дифрактограмма  $\text{Nd}(\text{OH})_3$  JSPDS № 06-0601, *d* – стандартная дифрактограмма  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  JSPDS № 43-1023.

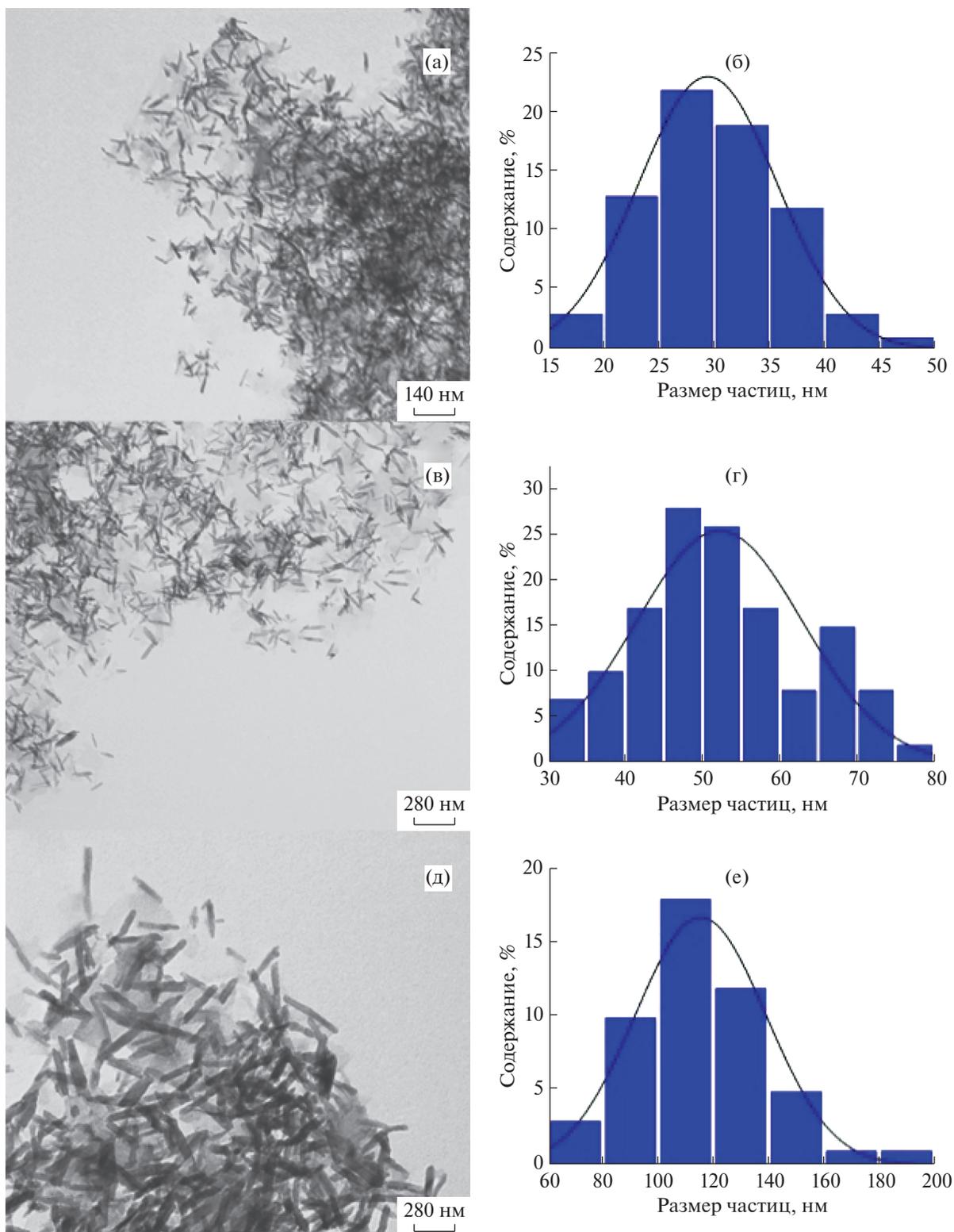
У образцов после отжига при  $635^\circ\text{C}$  (рис. 4в) увеличились размеры, длина до 53 нм, а диаметр – до 9 нм. При отжиге образца при  $794^\circ\text{C}$  (рис. 4д) средний размер частиц также увеличился: длина до 118 нм, а диаметр до 28 нм. Визуально выявлено, что при увеличении температуры отжига происходило “осветление” образца. Отожженный образец имел голубовато-серый цвет, характерный для  $\text{Nd}_2\text{O}_3$ .

Для дальнейшего изучения структуры проанализировали ИК-спектры образцов (рис. 5). В спектре исходного образца обнаружено несколько пиков, в том числе узкий пик при  $3608\text{ см}^{-1}$  и более широкий пик  $3450\text{ см}^{-1}$ , который можно отнести к валентному колебанию ОН-группы в  $\text{Nd}(\text{OH})_3$  [37, 38]. Пики при  $684$  и  $847\text{ см}^{-1}$  относятся к колебаниям связи ОН-группы в  $\text{Nd}(\text{OH})_3$  [39]. Два пика при  $1388$  и  $1495\text{ см}^{-1}$  относятся к связям соединений ОН-группы в  $\text{Nd}(\text{OH})_3$  соответственно [35].

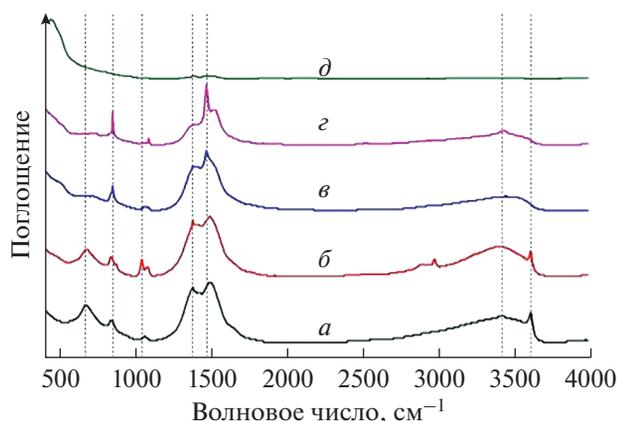
Для образцов, отожженных при температурах  $330$  и  $450^\circ\text{C}$  (рис. 5б, 5в), интенсивность колебания связей ОН-группы уменьшилась. При температуре  $450^\circ\text{C}$  (рис. 5в) в спектре образца наблюдалось появление интенсивных пиков  $857$  и  $1474\text{ см}^{-1}$ , которые относятся к колебаниям связи ОН-группы в  $\text{NdOOH}$  [33]. После отжига при температуре  $635^\circ\text{C}$  (рис. 5г) интенсивность пиков  $857$  и  $1474\text{ см}^{-1}$  увеличивается. В образцах после отжига при  $794^\circ\text{C}$  (рис. 5е) пики, относящиеся к колебаниям связи ОН-группы, не наблюдались, но появились пики области поглощения  $412$  и  $450\text{ см}^{-1}$ , они относятся к колебаниям связи  $\text{Nd}-\text{O}$  [40] из-за образования нового соединения  $\text{Nd}_2\text{O}_3$ .



**Рис. 3.** Изображения высушенных после синтеза исходных аморфных частиц неодима  $\text{Nd}(\text{OH})_3$ : *a* – СЭМ, *б* – ПЭМ.



**Рис. 4.** Изображение с электронного микроскопа и распределение частиц по размерам: а – ПЭМ изображение  $\text{Nd}(\text{OH})_3$ , б – распределение наностержней  $\text{Nd}(\text{OH})_3$  по размерам для образца, прокаленного при  $330^\circ\text{C}$ ; в – ПЭМ изображение  $\text{NdOOH}$ , г – распределение наностержней  $\text{NdOOH}$  по размерам для образца, прокаленного при  $635^\circ\text{C}$ ; д – ПЭМ изображение  $\text{Nd}_2\text{O}_3$ , е – распределение наностержней  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  по размерам для образца, прокаленного при  $794^\circ\text{C}$ .



**Рис. 5.** ИК-спектры синтезированных частиц  $\text{Nd}(\text{OH})_3$  после осаждения (а), прокаленных при 330 (б), 450 (в), 635 (г), 794°C (д).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом химического осаждения с последующим отжигом получены НС  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  с гексагональной кристаллической структурой. Средний размер составлял 118 нм в длину и 28 нм в диаметре. Выявлено, что при повышении температуры отжига от 330 до 794°C наблюдается структурно-фазовый переход. Показано, что при 330°C происходит частичная дегидратация  $\text{Nd}(\text{OH})_3$  с образованием смеси аморфной и кристаллической структур. Средний размер полученных НС  $\text{Nd}(\text{OH})_3$  составлял 29 нм в длину и 4 нм в диаметре. При увеличении температуры до 635°C по данным РФА наблюдалось образование НС смеси  $\text{NdOOH}$  и  $\text{Nd}_2\text{O}_3$ . Средний размер НС составлял 53 нм в длину и 9 нм в диаметре. При температуре 794°C наблюдается полное образование  $\text{Nd}_2\text{O}_3$ . Полученные НС  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  применяли в качестве основного компонента для химического синтеза наноструктурированного сплава  $\text{Nd-Fe-B}$ .

### БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследования методом сканирующей электронной микроскопии выполнены на оборудовании Центра коллективного пользования РХТУ им. Д.И. Менделеева.

Исследования методом просвечивающей электронной микроскопии выполнены на оборудовании Центра коллективного пользования ФИЦ биотехнологии РАН.

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Конфликт интересов отсутствует.

### ИНФОРМАЦИЯ О ВКЛАДЕ АВТОРОВ

О.Э. Абдурахмонов – идея и планирование экспериментов, термическая обработка экспериментальных образцов, анализ экспериментальных данных, написание статьи. М.Э. Алисултанов – получение наночастиц гидроксида неодима, написание статьи. Д.А. Вертаева – получение наночастиц гидроксида неодима. А.Г. Мурадова – организация инструментальных исследований, анализ экспериментальных данных, написание статьи. Все авторы участвовали в обсуждении результатов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Coey J.M.D. // Eng. 2020. V. 6. № 2. P. 119. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.11.034>
2. An X., Jin K., Abbas N. et al. // J. Magn. Magn. Mater. 2017. V. 442. P. 279. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.06.071>
3. Harimoto D., Matsuura Y., Hosokawa S. // J. Jpn. Soc. Powder Powder Metallurgy. 2006. V. 53. № 3. P. 282. <https://doi.org/10.2497/jjspm.53.282>
4. Skomski R., Coey J.M.D. // Permanent Magnetism. 1999. <https://doi.org/10.1201/9780203743829>
5. München D.D., Veit H.M. // Waste Manag. 2017. V. 61. P. 372. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.01.032>
6. Livingston J.M., Pozo-López G., Condo A.M. et al. // Mater. 2018. V. 2. P. 122. <https://doi.org/10.1016/j.mtl.2018.07.016>
7. Hussain M., Liao X., Akram R. et al. // J. Alloys Compd. 2020. V. 845. P. 156292. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.156292>
8. Zha W., Liu J., Song T. et al. // J. Rare Earths. 2011. V. 29. № 1. P. 94. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(10\)60408-5](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(10)60408-5)
9. Savchenko A.G., Menushenkov V.P., Plastinin A.Yu. et al. // Russ. Metall. 2018. V. 2018. № 4. P. 354. <https://doi.org/10.1134/S0036029518040134>
10. Rahimi H., Ghasemi A., Mozaffarinia R. et al. // J. Magn. Magn. Mater. 2017. V. 444. P. 111. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.08.011>
11. Wakayama H., Yonekura H. // Mater. Chem. Phys. 2019. V. 227. P. 265. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.01.073>
12. Tan X., Parmar H., Zhong Y. et al. // IEEE Magn. Lett. 2017. V. 8. P. 5508805. <https://doi.org/10.1109/LMAG.2017.2746039>
13. Tan X., Parmar H., Zhong Y. et al. // J. Magn. Magn. Mater. 2019. V. 471. P. 278. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.09.017>
14. Rahimi H., Ghasemi A., Mozaffarinia R. et al. // J. Supercond. Nov. Magn. 2016. V. 29. № 8. P. 2041. <https://doi.org/10.1007/s10948-016-3508-0>
15. Deheri P.K., Swaminathan V., Bhame S.D. et al. // Chem. Mater. 2010. V. 22. № 24. P. 6509. <https://doi.org/10.1021/cm103148n>

16. Zhang Q., Jiang Z., Yan B. // *Inorg. Chem. Front.* 2014. V. 1. № 5. P. 384. <https://doi.org/10.1039/C4QI00049H>
17. Yonekura H., Wakayama H. // *Mater. Sci. Eng. B.* 2019. V. 244. P. 38. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2019.04.021>
18. Abdurakhmonov O.E., Yurtov E.V., Savchenko E.S. et al. // *J. Phys.: Condens. Matter.* 2020. V. 1688. № 1. P. 012001. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1688/1/012001>
19. Arunpandian M., Selvakumar K., Raja A. et al. // *Colloids Surf. A.* 2019. V. 567. P. 213. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.01.058>
20. Phuruangrat A., Thongtem S., Thongtem T. // *Ceram. Int.* 2012. V. 5. № 38. P. 4075. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2012.01.065>
21. Simonenko T.L., Bocharova V.A., Gorobtsov Ph. Yu. et al. // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2020. V. 65. № 9. P. 1292. <https://doi.org/10.1134/s0036023620090193>
22. Sreethawong T., Chavadej S., Ngamsinlapasathian S. et al. // *Eur. J. Solid State Inorg. Chem.* 2008. V. 10. № 1. P. 20. <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2007.08.010>
23. Yang W., Qi Y., Ma Y. et al. // *Mater. Chem. Phys.* 2004. V. 84. № 1. P. 52. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2003.09.042>
24. Huang B., Huang C., Chen J. et al. // *J. Alloys Compd.* 2017. V. 712. P. 164. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.04.009>
25. Mohamed R.M., Ismail A.A., Kadi M.W. et al. // *Catal. Today.* 2021. V. 380. P. 259. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2020.11.002>
26. Sharapaev A.I., Kuznetsova S.A., Norenko A.N. et al. // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2021. V. 66. № 5. P. 740. <https://doi.org/10.1134/S003602362105017X>
27. Zhu W., Ma J., Xu L. et al. // *Mater. Chem. Phys.* 2010. V. 122. № 2–3. P. 362. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2010.03.004>
28. Malekfar R., Arabgari S., Motamedi K. et al. // *Am. Instit. Physics Conf. Proceed.* 2007. V. 929. № 1. P. 162. <https://doi.org/10.1063/1.2776708>
29. Intaphong P., Phuruangrat A., Yeebu H. et al. // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2021. V. 66. № 14. P. 2123. <https://doi.org/10.1134/S0036023621140047>
30. Shilova O.A., Nikolaev A.M., Kovalenko A.S. et al. // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2020. V. 65. № 3. P. 426. <https://doi.org/10.1134/S0036023620030134>
31. Rahman M.M., Wahid A., Alam M.M. et al. // *Mater. Today.* 2018. V. 16. P. 307. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2018.07.009>
32. Dhamale G.D., Mathe V.L., Bhoraskar S.V. et al. // *Nanotechnology.* 2016. V. 27. № 8. P. 085603. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/27/8/085603>
33. Guire M.R.D., Bauermann L.P., Parikh H. et al. // *Chemical Solution Deposition of Functional Oxide Thin Films.* 2013. P. 319. [https://doi.org/10.1007/978-3-211-99311-8\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-211-99311-8_14)
34. Shi W., Yu J., Wang H. et al. // *J. Nanosci. Nanotech.* 2006. V. 6. № 8. P. 2515. <https://doi.org/10.1166/jnn.2006.540>
35. Nagao M., Hamano H., Hirata K. et al. // *J. Langmuir.* 2003. V. 19. № 22. P. 9201. <https://doi.org/10.1021/la020954y>
36. García A., Llusar M., Sorlí S. et al. // *Br. Ceram. Trans.* 2013. V. 101. № 6. P. 242. <https://doi.org/10.1179/096797802225008078>
37. Kępiński L., Zawadzki M., Miśta W. // *Solid State Sci.* 2004. V. 6. № 12. P. 1327. <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2004.07.003>
38. Zinatloo-Ajabshir S., Mortazavi-Derazkola S., Salavati-Niasari M. // *J. Mol. Liq.* 2017. V. 234. P. 430. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.03.115>
39. Abu-Zied B.M., Khan A. // *J. Mater. Res.* 2020. V. 9. № 5. P. 10478. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.07.006>
40. El-Deen L.M.S., Salhi M.S.A., Elkholly M.M. // *J. Alloys Compd.* 2008. V. 1–2. № 465. P. 333. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2007.10.104>