

March 2024

## SYNTHESIS OF Fe<sub>3</sub>BO<sub>6</sub> NANOPARTICLES BY CHEMICAL DEPOSITION TO OBTAIN Nd-Fe-B MAGNETICALLY HARD ALLOY

Odilzhon ABDURAKHMONOV

*Tashkent Chemical-Technological Institute, Tashkent, Uzbekistan, odilzhon.abdurakhmonov@mail.ru*

Marat ALISULTANOV

*University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia, alisultanov.marat@mail.ru*

Sherzod ABDURAKHMONOV

*Almalyk branch of the National Research Technological University "MISiS", Almalyk, Uzbekistan, sherzod028@gmail.com*

Aytan MURADOVA

*University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia, aytanmuradova@gmail.com*

Follow this and additional works at: <https://cce.researchcommons.org/journal>

---

### Recommended Citation

ABDURAKHMONOV, Odilzhon; ALISULTANOV, Marat; ABDURAKHMONOV, Sherzod; and MURADOVA, Aytan (2024) "SYNTHESIS OF Fe<sub>3</sub>BO<sub>6</sub> NANOPARTICLES BY CHEMICAL DEPOSITION TO OBTAIN Nd-Fe-B MAGNETICALLY HARD ALLOY," *CHEMISTRY AND CHEMICAL ENGINEERING*: Vol. 2023: No. 1, Article 3. DOI: 10.34920/cce202313

Available at: <https://cce.researchcommons.org/journal/vol2023/iss1/3>

This Article is brought to you for free and open access by Chemistry and Chemical Engineering. It has been accepted for inclusion in CHEMISTRY AND CHEMICAL ENGINEERING by an authorized editor of Chemistry and Chemical Engineering. For more information, please contact [zuchra\\_kadirova@yahoo.com](mailto:zuchra_kadirova@yahoo.com).

## SYNTHESIS OF $Fe_3BO_6$ NANOPARTICLES BY CHEMICAL DEPOSITION TO OBTAIN Nd-Fe-B MAGNETICALLY HARD ALLOY

Odilzhon ABDURAKHMONOV<sup>1</sup> (odilzhon.abdurakhmonov@mail.ru), Marat ALISULTANOV<sup>2</sup> (alisultanov.marat@mail.ru), Sherzod ABDURAKHMONOV<sup>3</sup> (sherzod028@gmail.com), Aytan MURADOVA<sup>2</sup> (aytanmuradova@gmail.com)  
<sup>1</sup>Tashkent Chemical-Technological Institute, Tashkent, Uzbekistan  
<sup>2</sup>University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia  
<sup>3</sup>Almalyk branch of the National Research Technological University "MISIS", Almalyk, Uzbekistan

The purpose of this work is the synthesis of  $Fe_3BO_6$  nanoparticles for use as the main component in the chemical method for obtaining nanostructured Nd-Fe-B alloys. Amorphous  $Fe_3BO_6$  nanoparticles prepared by chemical precipitation,  $FeCl_3$ , and  $NaBH_4$  precipitant were used as precursors. Thermal treatment yielded  $Fe_3BO_6$  crystalline nanoparticles. To determine the thermal effects and phase transitions were carried out: thermogravimetric analysis, differential scanning calorimetry (TG-DSC) and X-ray phase analysis (XRF). The morphology of the obtained nanoparticles was studied using scanning and transmission electron microscopy (SEM and TEM). It has been established that at a temperature of 530 °C, the complete formation of  $Fe_3BO_6 \cdot 3\alpha-Fe_2O_3$  occurs. The shape of the resulting  $Fe_3BO_6 \cdot 3\alpha-Fe_2O_3$  particles is incorrect, the average diameter of the nanoparticles was  $50 \pm 10$  nm.

**Keywords:** nanostructured alloy Nd-Fe-B, nanoparticles, iron borate,  $Fe_3BO_6$ , chemical precipitation

## СИНТЕЗ НАНОЧАСТИЦ $Fe_3BO_6$ МЕТОДОМ ХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ МАГНИТВЕРДОГО СПЛАВА Nd-Fe-B

Одилжон АБДУРАХМОНОВ<sup>1</sup> (odilzhon.abdurakhmonov@mail.ru), Марат АЛИСУЛТАНОВ<sup>2</sup> (alisultanov.marat@mail.ru), Шерзод АБДУРАХМОНОВ<sup>3</sup> (sherzod028@gmail.com), Айтан МУРАДОВА<sup>2</sup> (aytanmuradova@gmail.com)  
<sup>1</sup>Ташкентский химико-технологический институт, Ташкент, Узбекистан  
<sup>2</sup>Российский химико-технологический университет, Москва, Россия  
<sup>3</sup>Алмалыкский филиал Национального исследовательского технологического университета «МИСиС», Алмалык, Узбекистан

Целью данной работы является синтез наночастиц  $Fe_3BO_6$  для использования в качестве основного компонента в химическом методе получения наноструктурированных сплавов Nd-Fe-B. Методом химического осаждения были получены аморфные наночастицы  $Fe_3BO_6$ , в качестве прекурсоров использовали  $FeCl_3$  и осадитель  $NaBH_4$ . Термической обработкой были получены кристаллические наночастицы  $Fe_3BO_6$ . Для определения термических эффектов и фазовых переходов были проведены: термогравиметрический анализ, дифференциально сканирующая калориметрия (ТГ-ДСК) и рентгенофазовый анализ (РФА). Морфологию полученных наночастиц исследовали с помощью, сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии (СЭМ и ПЭМ). Установлено, что при температуре 530 °C происходит полное образование  $Fe_3BO_6 \cdot 3\alpha-Fe_2O_3$ . Форма полученных частиц  $Fe_3BO_6 \cdot 3\alpha-Fe_2O_3$  неправильные, средний диаметр наночастиц составил  $50 \pm 10$  нм.

**Ключевые слова:** наноструктурированный сплав Nd-Fe-B, наночастицы, борат железа,  $Fe_3BO_6$ , химическое осаждение

## MAGNET QATTIQ Nd-Fe-B QOTISHMALARINI OLISH UCHUN, KIMYOVIY CHO'KTIRISH USULI BILAN $Fe_3BO_6$ NANOZARRACHALARI SINTEZI

Odiljon ABDURAXMONOV<sup>1</sup> (odilzhon.abdurakhmonov@mail.ru), Marat ALISULTANOV<sup>2</sup> (alisultanov.marat@mail.ru), Sherzod ABDURAXMONOV<sup>3</sup> (sherzod028@gmail.com), Aytan MURADOVA<sup>2</sup> (aytanmuradova@gmail.com)  
<sup>1</sup>Toshkent kimyo-texnologiya instituti, Toshkent, O'zbekiston  
<sup>2</sup>Rossiya kimyo-texnologiya universiteti, Moskva, Rossiya  
<sup>3</sup>"MISIS" milliy tadqiqot texnologik universiteti Olmaliq filiali, Olmaliq, O'zbekiston

Ushbu ilmiy ishning maqsadi nanostrukturali Nd-Fe-B qotishmalarini kimyoviy usulda olish maqsadida asosiy komponent sifatida foydalanish uchun  $Fe_3BO_6$  nanozarrachalarini sintez qilishdir. Amor  $Fe_3BO_6$  nanozarrachalari kimyoviy cho'ktirish usuli bilan olingan, prekursorlar sifatida  $FeCl_3$  va  $NaBH_4$  eritmalari ishlatildi. Termik ishlov berish natijasida  $Fe_3BO_6$  kristalli nanozarrachalar hosil bo'ldi. Issiqlik effektlari va fazaviy o'tishlarni aniqlash uchun termogravimetrik tahlil, differentsial skanerlash kalorimetri (TG-DSC) va rentgen fazali tahlil (RFT) o'tkazildi. Olingan nanozarrachalarning morfologiyasi skanerlash va transmission elektron mikroskop (SEM va TEM) yordamida o'rganildi. Aniqlanishicha, 530 °C haroratida  $Fe_3BO_6 \cdot 3\alpha-Fe_2O_3$  ning to'liq hosil bo'lishi sodir bo'ladi. Hosil bo'lgan  $Fe_3BO_6 \cdot 3\alpha-Fe_2O_3$  zarrachalarining shakli noto'g'ri, nanozarrachalarning o'rta diametri  $50 \pm 10$  nm tashkil etdi.

**Kalit so'zlar:** nanostrukturali qotishma Nd-Fe-B, nanozarralar, temir borati,  $Fe_3BO_6$ , kimyoviy cho'ktirish

DOI: 10.34920/cee202313

### Введение

На сегодняшний день постоянные магниты Nd-Fe-B стали незаменимыми компонентами во многих высокотехнологичных продуктах, включая жесткие диски большой емкости, аппараты магнитно-резонансной томографии, ветряные генераторы и двигатели для электрических и гибридных транспортных средств [1]. Магнитные поля, создаваемые редкоземельными магнитами, сопоставимы с магнитными полями электромагнитов, при этом редкоземель-

ные магниты не требуют затрат энергии и отличаются компактностью [2].

Магнитные характеристики постоянного магнита Nd-Fe-B зависят от методов их получения [3]. Наноструктурирование сплава Nd-Fe-B позволяет получать магнитные материалы на их основе с высокими магнитными характеристиками [4].

Следует отметить, что для получения наноструктурированного сплава Nd-Fe-B требуется разработка новых методов получения.

Известно, что основными методами получения наноструктурированных сплавов Nd-Fe-B являются физические, такие как дуговая плавка [5], прядение из расплава [6], механическое измельчение [7]. Однако физические методы имеют ряд недостатков, таких как высокая энергозатратность, длительность процесса производства, сложность контроля гранулометрического состава [8]. В отличие от физических, химические методы позволяют получать материалы с контролируемым гранулометрическим составом [4].

На сегодняшний день в литературе представлены следующие химические методы получения: золь-гель [9], микроволновый синтез [10], темплатный синтез [11], гидротермальные методы [12] и др.

Ранее мы сообщали о химическом синтезе наночастиц сплава Nd-Fe-B [13, 14]. Для получения наноструктурированного сплава Nd-Fe-B в вышеуказанной работе, важна однородность и большая удельная площадь поверхности исходных наночастиц  $\text{Nd}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и  $\text{Fe}_3\text{BO}_6$ , 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. Кроме того важна чистота полупродуктов  $\text{Nd}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и  $\text{Fe}_3\text{BO}_6$  [15]. Методом химического осаждения можно получить наночастицы без применения органических соединений.

Опубликовано небольшое количество работ по синтезу наночастиц  $\text{Fe}_3\text{BO}_6$  различных форм. Были разработаны несколько методов получения  $\text{Fe}_3\text{BO}_6$ , такие как: темплатный синтез [16], микроволновый синтез [17], гидротермальный [18] и др. Химический метод осаждения технологически прост и отличается от других методов не большой продолжительностью.

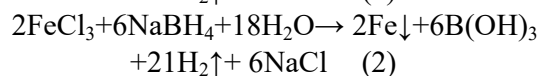
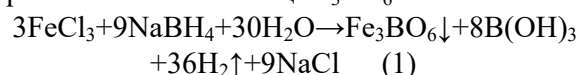
Целью данной работы является синтез наночастиц  $\text{Fe}_3\text{BO}_6$ , для использования в качестве основного компонента в химическом методе получения наноструктурированных сплавов Nd-Fe-B.

#### Методы исследования

Синтез наночастиц  $\text{Fe}_3\text{BO}_6$  осуществляли методом химического осаждения.

Уравнение реакции, протекающей при

образовании наночастиц  $\text{Fe}_3\text{BO}_6$  и Fe:



В качестве соединениз железа был использован  $\text{FeCl}_3$ , в качестве осадителя выступал  $\text{NaBH}_4$ . При интенсивном перемешивании на магнитной мешалке (600 об/мин) к 0,003 М раствору  $\text{FeCl}_3$  с помощью перистальтического насоса по каплям добавляли 0,02 М раствор  $\text{NaBH}_4$ . При синтезе раствор из светло-желтого цвета стал бесцветным, и происходило интенсивное выделение газа с осаждением черного вещества. Осадок отделяли от раствора с помощью неодимового постоянного магнита, полученный осадок три раза промывали бидистиллированной водой. Затем осадок высушивали при температуре 100 °С в течение 2 ч для удаления воды. Для получения наночастиц  $\text{Fe}_3\text{BO}_6$  полученный осадок прокаливали при 540 °С в атмосфере воздуха в течение 2 ч.

Для определения размера и формы наночастицы был использован просвечивающий электронный микроскоп (ПЭМ) JEM-100CX (JEOL, Япония). Размеры экспериментальных образцов определяли методом динамического светорассеяния (ДСР) на лазерном анализаторе характеристик частиц субмикронного диапазона ZetasizerNanoZS (Malvern, Великобритания). Также для определения размера, формы и химического состава экспериментальных образцов использовали сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) JEOL JSM-6510LV (JEOL, Япония) с приставкой энергодисперсионного спектрометра для электронно-зондового микроанализа (ЭЗМ) SSD X-Max Inca Energy (Oxford Instruments, Великобритания) в режиме дифракции обратно отраженных и вторичных электронов для точечного, поверхностного анализов и картирования поверхности образца. Съёмку дифрактограмм проводили на приборе D2 PHASER (Bruker-AXS, Германия), излучение Cu K, фильтр – Ni, с графитовым монохроматором ( $\lambda=1,54178 \text{ \AA}$ ). Режим трубки (Cu) 10 мА, 30 кВ. Диапазон значений угла  $2\theta$  – от 10 до 80°, шаг 0,02°, щель 0,6 мм, выдержка в точке – 1 сек, дискриминатор по энергиям – 0,17-0,23 кэВ. Расшифровку спектра и расчёт фазового состава осуществляли с помощью библиотеки JCPDS-ICDD с использованием специали-

зированной программного обеспечения. Термический анализатор (STA 449 F5 Jupiter, NETZSCH, Германия) использовали для записи профилей термогравиметрической / сканирующей калориметрии (ТГ/ДСК) для свежеприготовленного образца бората железа с начальной массой 12,50 мг. Анализ проводили в инертной атмосфере азота, образцы прогревали до 600 °С со скоростью увеличения температуры 10 °С/мин. Отжиг образцов проводили в муфельной печи NABERTHERM (Nabertherm, Германия).

### Результаты и их обсуждение

Морфологию и элементный состав, синтезированных наночастиц  $Fe_3BO_6$  изучали с помощью СЭМ и ЭЗМ. На рисунке 1 представлены СЭМ изображения и распределения по размерам  $Fe_3BO_6$ , полученных при концентрациях  $NaBH_4$  0,01 и 0,02 М. Можно заметить, что полученные при концентрации  $NaBH_4$  0,01 М, наночастиц бората железа образуют агрегаты (рис. 1а). По результатам ДСР, средний размер наночастиц составляет  $55 \pm 13$  нм (рис. 2б). Наночастицы бората железа, полученные при концентрации  $NaBH_4$  0,02 М (рис. 3в), также образуют агрегаты. По результатам ДСР, средний размер наночастиц составляет  $40 \pm 7$  нм (рис. 3г).

Для дальнейших исследований использовали НЧ  $Fe_3BO_6$ , полученные при концентрации 0,02 М  $NaBH_4$ .

Для исследования влияния температуры на кристаллизацию полученных наночастиц  $Fe_3BO_6$  проводили ДСК/ТГ анализ. На рисунке 2 представлены кривые ДСК/ТГ: жирной линией – ДСК и тонкой линией – ТГ. На кривой ТГ анализа (рис. 2) можно наблюдать три отчетливые стадии потери массы. Первая стадия потери массы происходила постепенно, между 21-90 °С. В этом диапазоне на кривой ДСК был обнаружен один эндотермический пик при 80 °С. Потеря массы составила 1,39%, и эта потеря массы связана с удалением присутствующей на поверхности образца воды

Второй стадии соответствует потеря массы 2,99%, происходящая в диапазоне температур 90-300 °С, что связано с дегидратацией ОН- групп. На кривой ДСК был обнаружен экзотермический пик при температуре 300 °С. На третьей стадии наблюдается незначительное увеличение массы 1,96%, происходящее в диапазоне температур 300-600 °С, что связано с полной кристаллизацией образца. На кривой ДСК так же был обнаружен экзотермический пик при температуре 530 °С.

Для подробного изучения изменений,

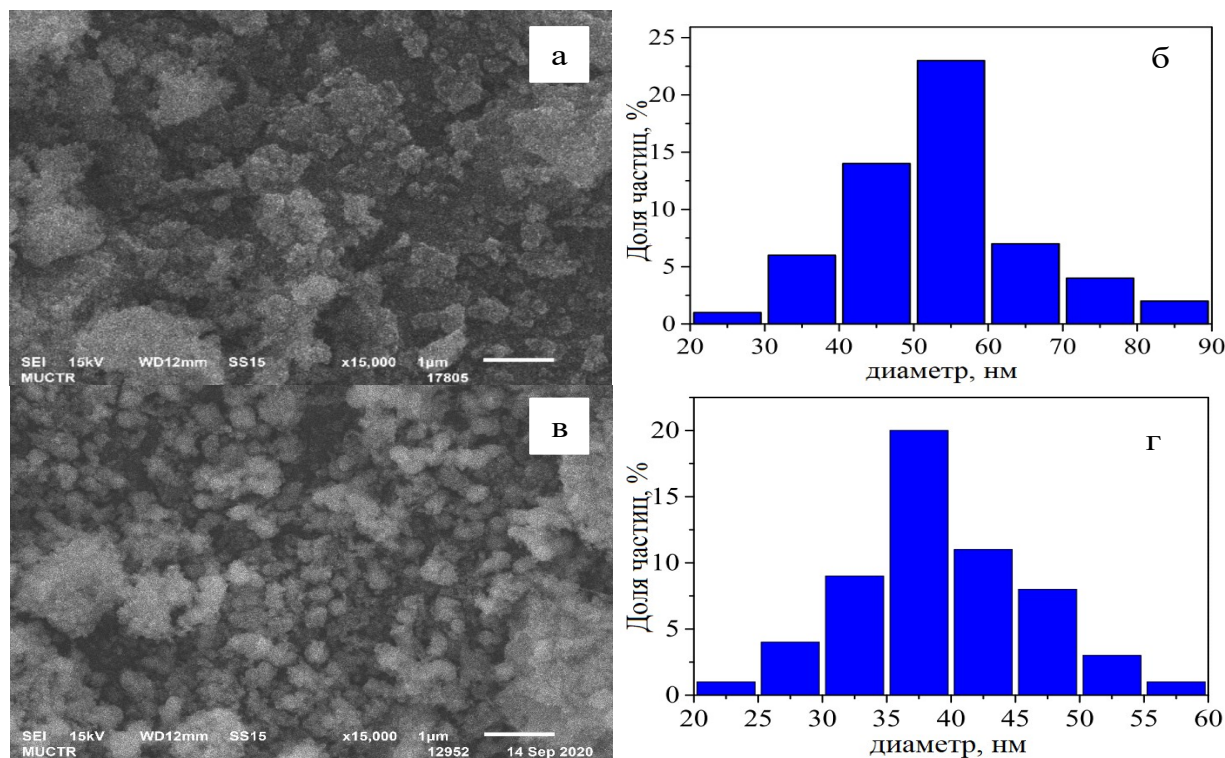


Рисунок 1. СЭМ изображения и распределения по размерам НЧ  $Fe_3BO_6$ , полученных при концентрациях  $NaBH_4$ : а, б - 0,01 М, в, г - 0,02 М.

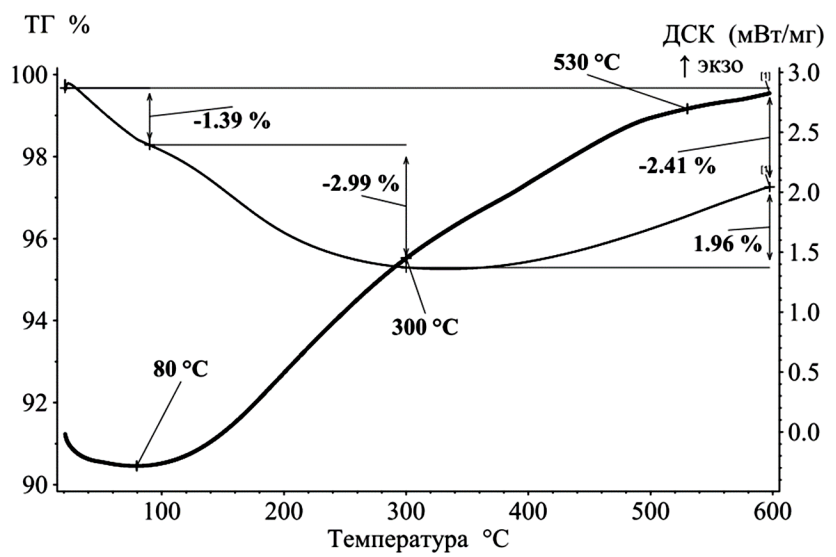


Рисунок 2. Кривые ДСК и ТГ анализа образца  $\text{Fe}_3\text{BO}_6$ .

происходящих в образце, при выше указанных термических эффектах ДСК/ТГ, провели термическую обработку образцов при температурах 300 и 530 °С. Полученные образцы после термической обработки исследовали с помощью РФА. На рисунке 3 представлены дифрактограммы образцов, полученных при температурах: а - 100 °С, б - 300 °С, в - 530 °С. На дифрактограмме образца, полученного при температуре 100 °С, (рисунок 3а) был обнаружен один отчетливый пик, при  $2\theta=33,21^\circ$  который относится к  $\text{Fe}_3\text{BO}_6$ , по данным ICDD № 01-073-1385. Доля аморфной фазы данного образца составила 95%.

На дифрактограмме образца, полученного при температуре 300 °С (рис. 3б), был выявлен еще один отчетливый пик при  $2\theta=35,66^\circ$  который относится к  $\text{Fe}_3\text{BO}_6$ , по данным ICDD

№ 01-073-1385. Доля аморфной фазы данного образца составляет 86%.

Дифрактограмма образца, полученного при температуре 530 °С представлена на рисунке 3в. По данным РФА, порошки состоят из 74,4%  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  и 25,6%  $\text{Fe}_3\text{BO}_6$ . По данным JCPDS №96-210-1168,  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  имеет тригональную кристаллическую структуру с пространственной группой  $R\bar{3}c$  (167) и параметрами решетки:  $a=b=5,0$  и  $c=13,8$  Å. По данным ICDD №01-073-1385,  $\text{Fe}_3\text{BO}_6$  имеет орторомбическую кристаллическую структуру с пространственной группой  $Pnma$  (62) и параметрами решетки:  $a=4,5$ ,  $b=8,5$  и  $c=10,0$  Å.

На рисунке 4 представлено ПЭМ изображение и распределение по размерам НЧ  $\text{Fe}_3\text{BO}_6 \cdot \alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ , полученных при температуре 530 °С. Установлено, что частицы имеют неправильную форму, средний размер наночастиц  $\text{Fe}_3\text{BO}_6 \cdot \alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  составляет  $50 \pm 10$  нм (рис. 4б).

Полученные наночастицы  $\text{Fe}_3\text{BO}_6 \cdot 3\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  при температуре 530 °С применяются в качестве основного компонента для химического синтеза наноструктурированного сплава Nd-Fe-B, и позволяют получать постоянные магниты с высокими магнитными характеристиками.

### Заключение

Методом химического осаждения с последующим термической обработкой были получены наночастицы  $\text{Fe}_3\text{BO}_6 \cdot 3\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ . В результате химического осаждения были получены наночастицы  $\text{Fe}_3\text{BO}_6$  со средним размером  $40 \pm 7$  нм и долей морфные фазы 95%. Было

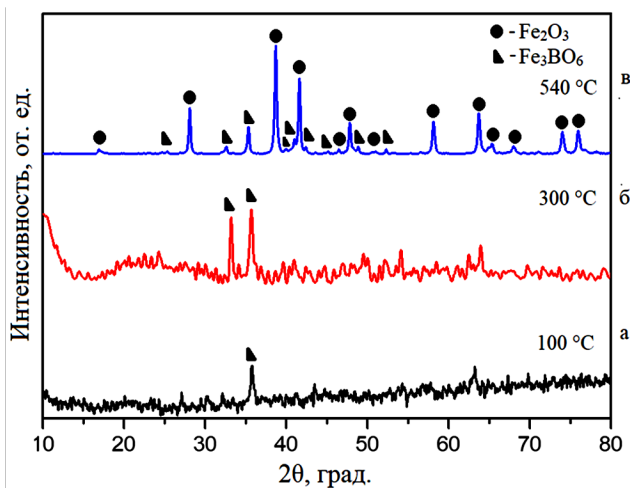


Рисунок 3. Дифрактограммы порошков  $\text{Fe}_3\text{BO}_6 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ , полученных при температуре: а - 100 °С; б - 300 °С; в - 530 °С.

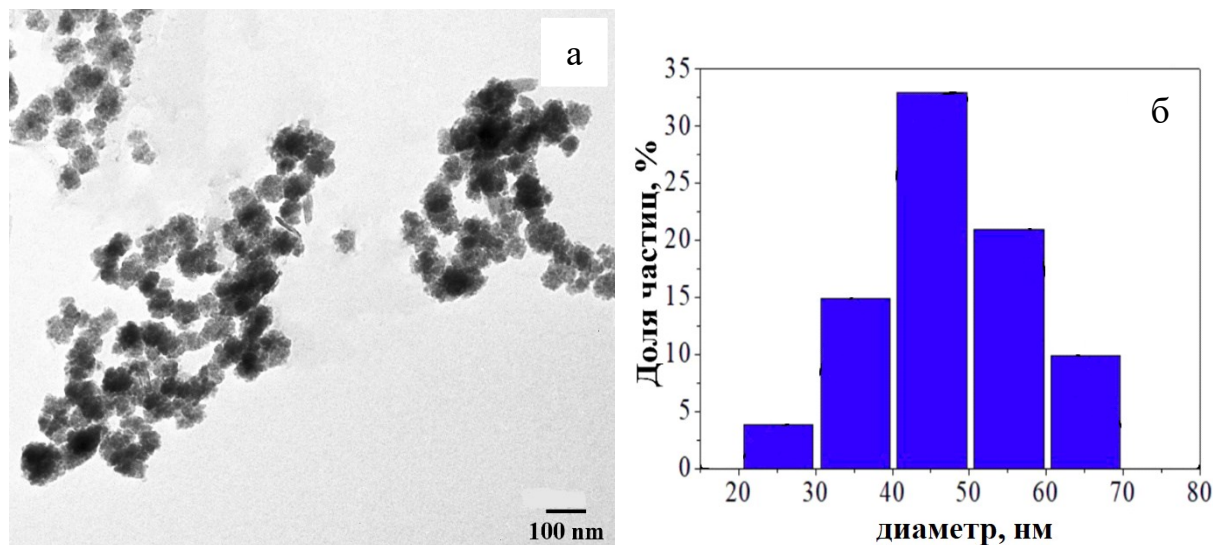


Рисунок 4. Наночастицы  $\text{Fe}_3\text{VO}_6 \cdot 3\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ , полученные при температуре  $530^\circ\text{C}$ :  
а – ПЭМ изображение; б – распределение по размерам.

установлено, что после термической обработки при температуре  $300^\circ\text{C}$  происходит полная дегидратация  $\text{OH-}$  с образованием менее аморфных ( $86\%$ ) наночастиц  $\text{Fe}_3\text{VO}_6$ . Увеличение температуры до  $530^\circ\text{C}$  приводит к образованию кристаллизованных наночастиц

$\text{Fe}_3\text{VO}_6 \cdot 3\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ . Средний размер полученных наночастиц  $\text{Fe}_3\text{VO}_6 \cdot 3\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  составил  $50 \pm 10$  нм.

Полученные наночастицы  $\text{Fe}_3\text{VO}_6 \cdot 3\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  применяли в качестве основного компонента для химического синтеза наноструктурированного сплава Nd-Fe-B.

#### REFERENCES

1. Coey J.M.D. Perspective and Prospects for Rare Earth Permanent Magnets. *Engineering*, 2020, 6/2, 119-131. DOI: 10.1016/j.eng.2018.11.034
2. Straka P., Zezulka V. Linear structures of Nd-Fe-B magnets: Simulation, design and implementation in mineral processing – A review. *Minerals Engineering*, 2019, 143, 105900. DOI: 10.1016/j.mineng.2019.105900
3. Liu Z., He J., Ramanujan R.V. Significant progress of grain boundary diffusion process for cost-effective rare earth permanent magnets: A review. *Materials & Design*, 2021, 209, 110004. DOI: 10.1016/j.matdes.2021.110004
4. Rahimi H., Ghasemi A., Mozaffarinia R., Tavvoosi M. Coercivity enhancement mechanism in Dy-substituted Nd-Fe-B nanoparticles synthesized by sol-gel base method followed by a reduction-diffusion process. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2017, 429, 182-191. DOI: 10.1016/j.jmmm.2017.01.041
5. Guozhi X., Yuping W., Lin Xiaoyan L. et al. Ferromagnetic/antiferromagnetic exchange coupling in melt-spun NdFeB nanocomposites. *Journal of non-crystalline solids*, 2006, 352/21-22, 2137-2142. DOI:10.1016/j.jnoncrsol.2006.02.069
6. Wang X.-C., Yue M., Zhang D.-T. Numerical simulation of single roller melt spinning for NdFeB alloy based on finite element method. *Rare Met.*, 2020, 39/10, 1145-1150.
7. Mohammadi M., Ghasemi A., Tavvoosi M. Mechanochemical synthesis of nanocrystalline Fe and Fe-B magnetic alloys. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2016, 419, 189-197. DOI: 10.1016/j.jmmm.2016.06.037
8. Deheri P.K., Shukla S., Ramanujan R.V. The reaction mechanism of formation of chemically synthesized  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  hard magnetic nanoparticles. *Journal of Solid State Chemistry*, 2012, 186, 224-230. DOI: 10.1016/j.jssc.2011.11.022
9. Rahimi H., Ghasemi A., Mozaffarinia R., Tavvoosi M. Magnetic properties and magnetization reversal mechanism of Nd-Fe-B nanoparticles synthesized by a sol-gel method. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2017, 444, 111-118. DOI: 10.1016/j.jmmm.2017.08.011
10. Tan X., Parmar H., Zhong Y., Chaudhary V., Ramanujan R.V. Effect of Dy substitution on the microstructure and magnetic properties of high (BH)max Nd-Dy-Fe-Co-B nanoparticles prepared by microwave processing. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2019, 471, 278-285. DOI: 10.1016/j.jmmm.2018.09.017
11. Wakayama H., Yonekura H. Use of block copolymer templates for chemical synthesis of  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  nanocomposites with controlled magnetic properties. *Materials Chemistry and Physics*, 2019, 227, 265-268. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2019.01.073
12. Wang L., Zhang M. Study on synthesis and magnetic properties of  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  nanoparticles prepared by hydrothermal method. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2020, 507, 166841. DOI: 10.1016/j.jmmm.2020.166841
13. Abdurakhmonov O. E. et al. Chemical synthesis and research nanopowder of magnetic hard alloy  $\text{Nd}_{15}\text{Fe}_{78}\text{B}_7$ . *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing, 2020, 1688/1, 012001.
14. Abdurakhmonov O.E. i dr. Khimicheskii metod sinteza nanoporoshkov  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  [Chemical method for the synthesis of  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  nanopowders]. *Khimicheskaya promyshlennost' segodnya*, 2022, 1, 14-25.
15. Abdurakhmonov O. E. et al. The Effect of Annealing Temperature on Crystallization of  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  Nanoparticles Synthesized by the Deposition Method. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 2022, 67/7, 1118-1124.
16. Kumari K., Ram S., Kotnala R. K. Self-controlled growth of  $\text{Fe}_3\text{BO}_6$  crystallites in shape of nanorods from iron-borate glass of small templates. *Materials Chemistry and Physics*, 2011, 129/3, 1020-1026. DOI:10.1016/j.matchemphys.2011.05.051
17. Kumari K. Structural, vibrational and surface analysis of  $\text{Fe}_3\text{BO}_6$  nanoplates synthesized by combustion method. *Journal of Molecular Structure*, 2018, 1165, 293-298.
18. Shi X., Chang C., Xiang J., Xiao Y. Synthesis of nanospherical  $\text{Fe}_3\text{BO}_6$  anode material for lithium-ion battery by the rheological phase reaction method. *Journal of Solid State Chemistry*, 2008, 181/9, 2231-2236. DOI:10.1016/j.jssc.2008.05.025