УДК 622.73:519.6

Исследование влияния времени механоактивации в центробежной мельнице на характеристики порошков оксида никеля

Д. К. Жиров

Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Россия, 426067, Ижевск, ул. Т. Барамзиной, д. 34

Аннотация. Фазовый состав порошков Ni-O был определён по данным рентгенофазового анализа. Размеры кристаллитов оценивались по формуле Дебая-Шеррера. Проведены исследования влияния механического измельчения на характеристики нанопорошков оксида никеля. Рентгенофазовый анализ порошков оксида никеля, полученных при различных режимах измельчения, позволил определить средний размер кристаллитов, состояния (аморфное или кристаллическое), энергозатраты, загрязняемость частицами мелющих шаров. Анализ зависимости концентрационного соотношения фаз Cr и NiO при измельчении в промежутке времени 5÷20 мин показал, что после 10 мин происходит резкий рост загрязняемости конечного продукта частицами рабочих органов мельницы. Средний размер кристаллитов NiO после 5 мин измельчения снижается с 54 до 30 нм и дальнейшее увеличение времени измельчения не приводит к дальнейшему уменьшению размера, а приводит лишь к ненужному загрязнению конечного продукта и износу рабочих органов. При изменении времени измельчения от 0 до 20 мин значение относительной кристалличности изменяется в диапазоне от 25 до 17 %.

Ключевые слова: никель, оксид никеля, измельчение, частица, центробежно-ударная мельница, загрязняемость, параметр измельчаемости.

✉ Дмитрий Жиров, e-mail: zhirov_dmitriy@mail.ru

Study of the Effect of Time Mechanoactivation in a Centrifugal Mill on the Nickel Oxide Powders Characteristics

Dmitriy K. Zhirov

Udmurt Federal Research Center UB RAS (T. Baramzina Str., 34, Izhevsk, 426067, Russian Federation)

Summary. The phase composition of Ni-O powders was determined from the data of X-ray phase analysis (diffractometer D2 Phaser, Bruker, exciting radiation wavelength $\lambda = 0.1548$ nm). The crystallite sizes were estimated using the Debye-Scherrer formula. Investigations of the effect of mechanical grinding on the characteristics of nickel oxide nanopowders have been carried out. X-ray phase analysis of nickel oxide powders obtained under various grinding modes made it possible to determine the average crystallite size, state (amorphous or crystalline), energy consumption, and particle contamination of grinding balls. Such tests were carried out earlier with copper oxide powders, where traces of wear of the working parts of the mill were not found in the final product due to the lower hardness and better grindability of copper oxide powders. For grinding, balls with a diameter of 8 mm, made of steel grade SHX15, containing chromium were used. The concentration ratio of the Cr and NiO phases was determined. For the analysis, we used a finely dispersed nickel oxide powder with an average crystallite size of 54 nm. When milled for 20 min, the average crystallite size of nickel oxide decreased from 54 to 28 nm. Analysis of the dependence of the concentration ratio of the Cr and NiO phases during grinding in a time interval of 5÷20 min showed that after 10 min there is a sharp increase in the contamination of the final product by particles of the mill working bodies. The average size of NiO crystallites after 5 min of grinding decreases from 54 to 30 nm, and a further increase in grinding time does not lead to a further decrease, but only leads to unnecessary contamination of the final product and wear of the working bodies. When changing the grinding time from 0 to 20 min, the value of the relative crystallinity changes in the range from 25 to 17 %.

Keywords: nickel, nickel oxide, grinding, particle, centrifugal impact mill, contamination, grinding parameter.

✉ Dmitriy Zhirov, e-mail: zhirov_dmitriy@mail.ru

ВВЕДЕНИЕ

Никель – химический элемент с атомным номером 28, атомная масса 58.6934 г/моль [1]. Никель малоактивен, обладает пластичностью, ковкостью, поддается обработке давлением, имеет серебристо-белый цвет и при нормальных условиях покрывается оксидной пленкой, обладает высокой коррозионной стойкостью в воздухе, воде, в щелочи и ряде кислот, это связано с образованием прочной оксидной пленки. Температура плавления никеля составляет 1453 °С. Удельное электрическое сопротивление 0.0684 мкОм·м. Плотность никеля при нормальных условиях составляет 8.902 г/см³.

Мировое производство никеля во всех его видах по данным аналитиков Wood Mackenzie составило 2235 тыс. тонн. Крупнейшими странами-производителями никеля являются Китай, Индонезия, Япония, Россия, Канада, Австралия. Недостигаемым лидером является Китай, на долю которого приходится треть мирового производства (табл. 1 и 2).

Таблица 1. Производство никеля во всех видах в 2018 году по странам [2]

Table 1. Production of nickel in all types in 2018 by country [2]

Страна Country	Производство никеля, тыс. т Nickel production, thousand tons	Доля от мирового производства, % Share of world production, %
Китай / China	707	31.6
Индонезия / Indonesia	288	12.9
Япония / Japan	165	7.4
Россия / Russia	159	7.1
Канада / Canada	135	6.0
Австралия / Australia	114	5.1

Таблица 2. Потребление никеля во всех видах в 2018 году по странам [2]

Table 2. Consumption of nickel in all types in 2018 by country [2]

Страна Country	Потребление никеля, тыс. т Nickel consumption, thousand tons	Доля от мирового потребления, % Share of global consumption, %
Китай / China	1147	50.3
Япония / Japan	163	7.2
Индонезия / Indonesia	156	6.8
США / USA	138	6.0
Южная Корея / South Korea	98	4.3
Россия / Russia	33	1.4
Прочие страны / Other countries	544	23.9
Мир в целом / The world as a whole	2279	100

Области применения никеля достаточно широки: производство нержавеющей стали (более двух третей мирового потребления никеля), гальванопокрытия, литье, никельсодержащие сплавы, легированные стали, производство батарей (рис. 1). Быстро растёт потребление никеля в секторе батарей для электромобилей.

Рис. 1. Области потребления никеля в 2018 г. (100 % = 2279 тыс. т) [2]

Fig. 1. Nickel consumption areas in 2018 (100 % = 2279 thousand tons) [2]

Нанотехнологии – это высокотехнологичная многомиллиардная отрасль, которая за последние десятилетия проникла во многие аспекты современного общества. Значительную часть нанорынка составляют наноматериалы. Одним из основных факторов, вызывающих такой большой интерес, являются превосходящие и уникальные функциональные свойства по сравнению с их массовыми аналогами. Области применения нанопорошков металлов с каждым годом расширяются: газовые сенсоры [3 – 7], катализаторы для различных технологических процессов [6 – 8], электроника [9], генераторы и накопители энергии, металлические наноматериалы все чаще используются в технологиях, связанных с охраной окружающей среды и представляют большой интерес для биомедицинских технологий суперконденсаторов и высокоэффективных сенсоров [10 – 20].

Цель работы: определить влияние времени механоактивации оксида никеля на кристалличность, средний размер кристаллитов, фазовый состав полученных порошков, энергозатраты и загрязняемость конечного продукта частицами рабочих органов.

МЕТОДИКА

Фазовый состав порошков Ni-O был определен по данным рентгенофазового анализа (дифрактометр D2 Phaser, Bruker, длина волны возбуждающего излучения $\lambda = 0.1548$ нм). Размеры кристаллитов оценивались по формуле Дебая-Шеррера: $Z = k\lambda / \eta \cos\theta$, где η – ширина пика на дифрактограмме на половине его высоты, θ – дифракционный угол, $k = 0.9$. Дифрактограммы были обработаны с помощью универсальной программы DiffraC.eva.

Для проведения анализа использовались мелкодисперсный порошок оксида никеля со средним размером кристаллитов 54 нм. Механоактивация порошка оксида никеля проводилась в опытном образце планетарной шаровой мельницы после предварительного измельчения в многоступенчатой центробежно-ударной мельнице [21]. Для измельчения использовались шары диаметром 8 мм, изготовленные из стали марки ШХ15. Время измельчения составляло 5, 10, 20 минут. Масса загрузки порошков составляла 60 г. После проведения механоактивации был проведен анализ фазового состава порошков, полученных при различных режимах.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рентгенограмме (рис. 2) видим, что при увеличении времени измельчения размеры частиц уменьшаются (расширение пиков).

На рис. 3 представлена зависимость кристалличности Ni-O от времени измельчения по четырем точкам. В диапазоне 0÷20 мин процесс измельчения оксида никеля приводит к изменению относительной кристалличности от 25 до 17 % (рис. 3).

Подобного рода испытания проводились ранее с порошками оксида меди [22], где следов износа рабочих органов мельницы в конечном продукте обнаружено не было по причине меньшей твердости и лучшей измельчаемости порошков оксида меди. Для измельчения использовались шары диаметром 8 мм, изготовленные из стали марки ШХ15, содержащие в своем составе хром. Концентрационное соотношение фаз Cr и NiO представлено на рис. 4, табл. 3.

Для проведения анализа использовались мелкодисперсный порошок оксида никеля со средним размером кристаллитов 54 нм. При измельчении в течение 20 минут средний размер кристаллитов оксида никеля снизился с 54 нм до 28 нм (рис. 5). Средний размер кристаллитов NiO после 5 мин измельчения снизился с 54 нм до 30 нм и дальнейшее увеличение времени измельчения не приводит к значительному снижению, а приводит лишь к ненужному загрязнению конечного продукта и износу рабочих органов.

Рис. 2. Дифрактограммы порошкообразных образцов Ni-O до (кривая 1) и после их размалывания в шаровой мельнице в течение 5 (кривая 2), 10 (кривая 3), 20 (кривая 4) мин. Внизу приведены штрих-рентгенограммы кристаллических фаз NiO (PDF 00-048-1548), Cu₂O (PDF 01-071-3645) и Cu (PDF 00-004-0836) (Табличные данные базы PDF (Powder Diffraction File))

Fig. 2. Diffraction patterns of powdered Ni-O samples before (curve 1) and after grinding in a ball mill for 5 (curve 2), 10 (curve 3), 20 (curve 4) min. Below are the bar-X-ray diffraction patterns of crystalline phases NiO (PDF 00-048-1548), Cu₂O (PDF 01-071-3645) and Cu (PDF 00-004-0836) (Tabular data base PDF (Powder Diffraction File))

Рис. 3. Зависимость кристалличности Ni-O от времени измельчения

Fig. 3. Dependence of Ni-O crystallinity on grinding time

Рис. 4. Концентрационное соотношение фаз Cr и NiO

Fig. 4. Concentration ratio of phases Cr and NiO

Таблица 3. Средний размер кристаллитов NiO, Cr, кристалличность, соотношение фаз NiO/Cr в зависимости от времени обработки

Table 3. Average crystallite size of NiO, Cr, crystallinity, phase ratio NiO/Cr depending on the processing time

Образец Sample	Время помола, t, мин Grinding time, min	Энерго- затраты, Вт Power consumption, W	Кристал- личность, % Crystallinity, %	NiO		Cr		NiO/Cr	Cr/NiO
				d, нм	N (%)	d, нм	N (%)		
NiO(исх.)	0	0	25	54	100		0	0	0.000
NiO(v)	5	183.3	19	32	90.74	27	9.26	9.8	0.102
NiO(x)	10	366.7	22	30	87.04	27	12.96	6.7	0.149
NiO(xx)	20	733.3	17	28	75.71	27	24.29	3.1	0.321

Рис. 5. Средний размер кристаллитов NiO, Cr

Fig. 5. Average crystallite size NiO, Cr

ВЫВОДЫ

Фазовый состав порошков Ni-O был определён по данным рентгенофазового анализа (дифрактометр D2 Phaser, Bruker, длина волны возбуждающего излучения $\lambda = 0.1548$ нм). Размеры кристаллитов оценивались по формуле Дебая-Шеррера. Проведены исследования влияния механического измельчения на характеристики нанопорошков оксида никеля. Рентгенофазовый анализ порошков оксида никеля, полученных при различных режимах измельчения, позволил определить средний размер кристаллитов, состояния (аморфное или кристаллическое), энергозатраты, загрязняемость частицами мелющих шаров. Анализ зависимости концентрационного соотношения фаз Cr и NiO при измельчении в промежутке времени 5÷20 мин показал, что после 10 минут происходит резкий рост загрязняемости конечного продукта частицами рабочих органов. Средний размер кристаллитов NiO после 5 мин измельчения снижается с 54 нм до 30 нм и дальнейшее увеличение времени измельчения не приводит к дальнейшему снижению, а приводит лишь к ненужному загрязнению конечного продукта и износу рабочих органов. При изменении времени измельчения от 0 до 20 мин значение относительной кристалличности изменяется в диапазоне от 25 до 17 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wieser M. E., Holden N., Coplen T. B., Böhlke J. K., Berglund M., Brand W. A., De Bièvre P., Gröning M., Loss R. D., Meija J., Hirata T., Prohaska T., Schoenberg R., O'Connor G., Walczyk T., Yoneda S., Zhu X.-K. Atomic weights of the elements 2011 (IUPAC Technical Report) // Pure and Applied Chemistry, 2013, vol. 85, no. 5, pp. 1047-1078. <https://doi.org/10.1351/PAC-REP-13-03-02>
2. Commodity Market Report. Wood Mackenzie Ltd. Global Nickel Short-Term Outlook, July 2019, 23 p.
3. Inshakova E., Inshakova A. Nanomaterials and nanotechnology: prospects for technological re-equipment in the power engineering industry // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, vol. 709, 033020. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/709/3/033020>

4. Grassian V. H. When size really matters: size-dependent properties and surface chemistry of metal and metal oxide nanoparticles in gas and liquid phase environments // *The Journal of Physical Chemistry C*, 2008, vol. 112, iss. 47, pp. 18303-18313. <https://doi.org/10.1021/jp806073t>
5. Jayathilaka W., Qi K., Qin Y., Chinnappan A., Serrano-García W., Baskar C., Wang H., He J., Cui S., Thomas W. S., Ramakrishna S. Significance of nanomaterials in wearables: a review on wearable actuators and sensors // *Advanced Materials*, 2019, vol. 31, iss. 7, 1805921. <https://doi.org/10.1002/adma.201805921>
6. Pokhrel S., Mädler L. Flame-made particles for sensors, catalysis and energy storage applications // *Energy Fuels*, 2020, vol. 34, iss. 11, pp. 13209-13224. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c02220>
7. Anthony L. S., Perumal V., Mohamed N. M., Saheed M. S. M., Gopinath S. C. B. An Overview of Unique Metal Oxide Nanostructures for Biosensor Applications // In book: Bhat A., Khan I., Jawaid M., Suliman F., Al-Lawati H., Al-Kindy S. (eds) *Nanomaterials for Healthcare, Energy and Environment*. Advanced Structured Materials, vol. 118. Springer, Singapore, 2019, pp. 51-69. https://doi.org/10.1007/978-981-13-9833-9_3
8. Sharma N., Ojha H., Bharadwaj A., Pathak D. P., Sharma R. K. Preparation and catalytic applications of nanomaterials: A review // *RSC Advances*, 2015, vol. 5(66), pp. 53381-53403. <https://doi.org/10.1039/C5RA06778B>
9. Wu W. Inorganic nanomaterials for printed electronics: A review // *Nanoscale*, 2017, vol. 9, iss. 22, pp. 7342-7372. <https://doi.org/10.1039/C7NR01604B>
10. Dasari S. T. P., McShan D., Dasmahapatra A. K., Tchounwou P. B. A review on graphene-based nanomaterials in biomedical applications and risks in environment and health // *Nano-Micro Letters*, 2018, vol. 10, 53. <https://doi.org/10.1007/s40820-018-0206-4>
11. Siddique S., Chow J. C. L. Application of nanomaterials in biomedical imaging and cancer therapy // *Nanomaterials*, 2020, vol. 10, iss. 9, 1700. <https://doi.org/10.3390/nano10091700>
12. Sheikh-Mohseni M. A., Hassanzadeh V., Habibi B. Reduced graphene oxide supported bimetallic Ni-Co nanoparticles composite as an electrocatalyst for oxidation of methanol // *Solid State Sciences*, 2019, vol. 98, 106022. <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2019.106022>
13. Khort A., Romanovski V., Leybo D., Moskovskikh D. CO oxidation and organic dyes degradation over grapheme-Cu and grapheme-CuNi catalysts obtained by solution combustion synthesis // *Scientific Reports*, 2020, vol. 10, 16104. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72872-0>
14. Khort A., Podbolotov K., Serrano-García R., Gunko Y. One-step solution combustion synthesis of pure Ni nanopowders with enhanced coercivity: the fuel effect // *Journal of Solid State Chemistry*, 2017, vol. 253, pp. 270-276. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2017.05.043>
15. Patil K. C., Hegde M. S., Rattan T., Aruna S. T. *Chemistry of Nanocrystalline Oxide Materials. Combustion Synthesis, Properties and Applications*, 2008, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2008, 364 p. <https://doi.org/10.1142/6754>
16. Sdobnyakov N., Khort A., Myasnichenko V., Podbolotov K., Romanovskaia E., Kolosov A., Sokolov D., Romanovski V. Solution combustion synthesis and Monte Carlo simulation of the formation of CuNi integrated nanoparticles // *Computational Materials Science*, 2020, vol. 184, 109936. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2020.109936>
17. Biesinger M. C., Payne B. P., Grosvenor A. P., Lau L. W. M., Gerson A. R., Smart R. S. C. Resolving surface chemical states in XPS analysis of first row transition metals, oxides and hydroxides: Cr, Mn, Fe, Co and Ni // *Applied Surface Science*, 2011, vol. 257, iss. 7, pp. 2717-2730. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.10.051>
18. Dubey P., Kaurav N., Devan R. S., Okram G. S., Kuo Y. K. The effect of stoichiometry on the structural, thermal and electronic properties of thermally decomposed nickel oxide // *RSC Advances*, 2018, vol. 8, pp. 5882-5890. <https://doi.org/10.1039/C8RA00157J>
19. Preda I., Mossaneck R. J. O., Abbate M., Alvarez L., Méndez J., Gutiérrez A., Soriano L. Surface contributions to the XPS spectra of nanostructured NiO deposited on HOPG // *Surface Science*, 2012, vol. 606, iss. 17-18, pp. 1426-1430. <https://doi.org/10.1016/j.susc.2012.05.005>
20. Hedberg Y. S., Odneval W. I. Metal release from stainless steel in biological environments: A review // *Biointerphases*, 2015, vol. 11, iss. 1, 018901. <https://doi.org/10.1116/1.4934628>
21. Жиров Д. К. Многоступенчатая центробежно-ударная мельница // Патент RU U1 153992, 2015.
22. Жиров Д. К. Исследование влияния энергозатрат при механоактивации в центробежной мельнице на характеристики порошков оксида меди // *Химическая физика и мезоскопия*. 2020. Т. 22, № 3. С. 317-322. <https://doi.org/10.15350/17270529.2020.3.31>

REFERENCES

1. Wieser M. E., Holden N., Coplen T. B., Böhlke J. K., Berglund M., Brand W. A., De Bièvre P., Gröning M., Loss R. D., Meija J., Hirata T., Prohaska T., Schoenberg R., O'Connor G., Walczyk T., Yoneda S., Zhu X.-K. Atomic weights of the elements 2011 (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 2013, vol. 85, no. 5, pp. 1047-1078. <https://doi.org/10.1351/PAC-REP-13-03-02>
2. Commodity Market Report. Wood Mackenzie Ltd. *Global Nickel Short-Term Outlook*, July 2019, 23 p.
3. Inshakova E., Inshakova A. Nanomaterials and nanotechnology: prospects for technological re-equipment in the power engineering industry. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 709, 033020. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/709/3/033020>

4. Grassian V. H. When size really matters: size-dependent properties and surface chemistry of metal and metal oxide nanoparticles in gas and liquid phase environments. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2008, vol. 112, iss. 47, pp. 18303-18313. <https://doi.org/10.1021/jp806073t>
5. Jayathilaka W., Qi K., Qin Y., Chinnappan A., Serrano-García W., Baskar C., Wang H., He J., Cui S., Thomas W. S., Ramakrishna S. Significance of nanomaterials in wearables: a review on wearable actuators and sensors. *Advanced Materials*, 2019, vol. 31, iss. 7, 1805921. <https://doi.org/10.1002/adma.201805921>
6. Pokhrel S., Mädler L. Flame-made particles for sensors, catalysis and energy storage applications. *Energy Fuels*, 2020, vol. 34, iss. 11, pp. 13209-13224. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c02220>
7. Anthony L. S., Perumal V., Mohamed N. M., Saheed M. S. M., Gopinath S. C. B. An Overview of Unique Metal Oxide Nanostructures for Biosensor Applications. In book: Bhat A., Khan I., Jawaid M., Suliman F., Al-Lawati H., Al-Kindy S. (eds) *Nanomaterials for Healthcare, Energy and Environment. Advanced Structured Materials*, vol. 118. Springer, Singapore, 2019, pp. 51-69. https://doi.org/10.1007/978-981-13-9833-9_3
8. Sharma N., Ojha H., Bharadwaj A., Pathak D. P., Sharma R. K. Preparation and catalytic applications of nanomaterials: A review. *Advances*, 2015, vol. 5(66), pp. 53381-53403. <https://doi.org/10.1039/C5RA06778B>
9. Wu W. Inorganic nanomaterials for printed electronics: A review. *Nanoscale*, 2017, vol. 9, iss. 22, pp. 7342-7372. <https://doi.org/10.1039/C7NR01604B>
10. Dasari S. T. P., McShan D., Dasmahapatra A. K., Tchounwou P. B. A review on graphene-based nanomaterials in biomedical applications and risks in environment and health. *Nano-Micro Letters*, 2018, vol. 10, 53. <https://doi.org/10.1007/s40820-018-0206-4>
11. Siddique S., Chow J. C. L. Application of nanomaterials in biomedical imaging and cancer therapy. *Nanomaterials*, 2020, vol. 10, iss. 9, 1700. <https://doi.org/10.3390/nano10091700>
12. Sheikh-Mohseni M. A., Hassanzadeh V., Habibi B. Reduced graphene oxide supported bimetallic Ni-Co nanoparticles composite as an electrocatalyst for oxidation of methanol. *Solid State Sciences*, 2019, vol. 98, 106022. <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2019.106022>
13. Khort A., Romanovski V., Leybo D., Moskovskikh D. CO oxidation and organic dyes degradation over grapheme-Cu and grapheme-CuNi catalysts obtained by solution combustion synthesis. *Scientific Reports*, 2020, vol. 10, 16104. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72872-0>
14. Khort A., Podbolotov K., Serrano-García R., Gunko Y. One-step solution combustion synthesis of pure Ni nanopowders with enhanced coercivity: the fuel effect. *Journal of Solid State Chemistry*, 2017, vol. 253, pp. 270-276. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2017.05.043>
15. Patil K. C., Hegde M. S., Rattan T., Aruna S. T. *Chemistry of Nanocrystalline Oxide Materials. Combustion Synthesis, Properties and Applications*, 2008, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2008, 364 p. <https://doi.org/10.1142/6754>
16. Sdobnyakov N., Khort A., Myasnichenko V., Podbolotov K., Romanovskaia E., Kolosov A., Sokolov D., Romanovski V. Solution combustion synthesis and Monte Carlo simulation of the formation of CuNi integrated nanoparticles. *Computational Materials Science*, 2020, vol. 184, 109936. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2020.109936>
17. Biesinger M. C., Payne B. P., Grosvenor A. P., Lau L. W. M., Gerson A. R., Smart R. S. C. Resolving surface chemical states in XPS analysis of first row transition metals, oxides and hydroxides: Cr, Mn, Fe, Co and Ni. *Applied Surface Science*, 2011, vol. 257, iss. 7, pp. 2717-2730. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.10.051>
18. Dubey P., Kaurav N., Devan R. S., Okram G. S., Kuo Y. K. The effect of stoichiometry on the structural, thermal and electronic properties of thermally decomposed nickel oxide. *RSC Advances*, 2018, vol. 8, pp. 5882-5890. <https://doi.org/10.1039/C8RA00157J>
19. Preda I., Mossane R. J. O., Abbate M., Alvarez L., Méndez J., Gutiérrez A., Soriano L. Surface contributions to the XPS spectra of nanostructured NiO deposited on HOPG. *Surface Science*, 2012, vol. 606, iss. 17-18, pp. 1426-1430. <https://doi.org/10.1016/j.susc.2012.05.005>
20. Hedberg Y. S., Odneval W. I. Metal release from stainless steel in biological environments: A review. *Biointerphases*, 2015, vol. 11, iss. 1, 018901. <https://doi.org/10.1116/1.4934628>
21. Zhirov D. K. Mnogostupenchataya tsentrobezhno-udarnaya mel'nitsa [Multistage centrifugal impact mill]. *Patent RU UI 153992*, 2015.
22. Zhirov D. K. Issledovanie vliyaniya energozatrat pri mekhanoaktivacii v centrobezhnoj mel'nice na harakteristiki poroshkov oksida medi [Study of the Effect of Energy Costs During Mechanoactivation in a Centrifugal Mill on the Copper Oxide Powders Characteristics]. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya* [Chemical Physics and Mesoscopies], 2020, vol. 22, no. 3, pp. 317-322. (In Russian). <https://doi.org/10.15350/17270529.2020.3.31>

Поступила 29.07.2021; после доработки 22.09.2021; принята к опубликованию 27.09.2021
Received 29 July 2021; received in revised form 22 September 2021; accepted 27 September 2021

Жиров Дмитрий Константинович, кандидат **Dmitriy K. Zhirov**, Cand. Sci. (Tech.), Senior Researcher, технических наук, старший научный сотрудник, Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk, УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск, Российская Федерация, Russian Federation
e-mail: zhirov_dmitriy@mail.ru