

УДК 538.911

Оригинальная статья

**Кристаллическая структура и дисперсный состав наночастиц
многокомпонентного $(\text{NiFeCoCuZn})_x\text{O}_y$ оксида, полученных
совместным электрическим взрывом проволок**

К.В. Сулиз¹, В.В. Шмаков¹, А.В. Первиков¹, Н.Ю. Сдобняков²

¹ФГБУН Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

634055, Россия, Томск, пр. Академический, 2/4

konstantin.suliz@gmail.com

²ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

170002, Россия, Тверь, Садовый пер., 35

DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.203

Аннотация: Данная работа демонстрирует возможности получения порошков на наночастиц многокомпонентного $(\text{NiFeCoCuZn})_x\text{O}_y$ оксида методом совместного электрического взрыва проволок в атмосфере газов $\text{Ar} + 25\%$ мол. O_2 . Показано, что в результате нагрева проволок импульсом тока с плотностью $3,15 \times 10^7$ А/см² при давлении буферного газа 0,15 МПа формируются наночастицы многокомпонентного оксида со средним размером порядка 54 нм. Распределение частиц по размерам описывается нормально-логарифмическим законом. Частицы имеют сферическую форму. Синтезированный образец содержит две кристаллические структуры, соответствующий каменной соли (Fm3m, $a = 4,213$ Å) и шпинели (Fd3m, $a = 8,389$ Å). Результаты исследования показывают, что кристаллическая структура наночастиц $(\text{NiFeCoCuZn})_x\text{O}_y$ может быть оптимизирована как за счет изменения соотношения двух и трехвалентных металлов в продуктах взрыва проволок, так и за счет изменения термодинамических условий формирования наночастиц.

Ключевые слова: высокоэнтропийные оксиды, наночастицы, электрический взрыв проволок, просвечивающая электронная микроскопия, энергодисперсионный анализ, рентгенофазовый анализ.

Сулиз Константин Владимирович – младший научный сотрудник лаборатории нанобиоинженерии ФГБУН Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

Шмаков Василий Валерьевич - младший научный сотрудник лаборатории физической мезомеханики и неразрушающих методов контроля ФГБУН Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

Первиков Александр Васильевич – к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории физикохимии высокодисперсных материалов ФГБУН Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

Сдобняков Николай Юрьевич – д.ф.-м.н., доцент, профессор кафедры общей физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Original paper

**Crystal structure and dispersed composition of multicomponent $(\text{NiFeCoCuZn})_x\text{O}_y$ oxide
nanoparticles obtained by joint exploding wires**

K.V. Suliz¹, V.V. Shmakov¹, A.V. Pervikov¹, N.Yu. Sdobnyakov²

¹Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of RAS, Tomsk, Russia

²Tver State University, Tver, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.203

Abstract: In this work, preparation of powders of multicomponent $(\text{NiFeCoCuZn})_x\text{O}_y$ nanoparticles by the method of combined electrical explosion of wires in an atmosphere of $\text{Ar} + 25\%$ mol % O_2 gases is demonstrated. Heating of wires with a current pulse with a density of $3,15 \times 10^7$ A/cm² at a buffer gas pressure of 0,15 MPa leads to the formation of nanoparticles of multicomponent oxide with an average size of about 54 nm. The particle size distribution is described by the normal-logarithmic law. The particles have the spherical shape. The synthesized sample contains two crystalline structures corresponding to rock salt (Fm3m, $a = 4,213$ Å) and spinel (Fd3m, $a = 8,389$ Å). The results of the study show that the crystal structure of $(\text{NiFeCoCuZn})_x\text{O}_y$ nanoparticles can be optimized by both changing the ratio of divalent and trivalent metals in the wire explosion products and changing the

thermodynamic conditions for the formation of nanoparticles.

Keywords: high-entropy oxides, nanoparticles, exploding wires, transmission electron microscopy, energy dispersive analysis, X-ray phase analysis.

Konstantin V. Suliz – Junior Researcher, Laboratory of Nanobioengineering, Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of RAS, ORCID: 0000-0001-5556-2113

Vasily V. Shmakov – Junior Researcher, Laboratory of physical mesomechanics of materials and non-destructive testing, Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of RAS, ORCID: 0000-0002-2983-7926

Alexander V. Pervikov – Ph. D., Researcher, Laboratory of Physical Chemistry of Ultrafine Materials, Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of RAS, ORCID: 0000-0001-7593-0710

Nickolay Yu. Sdobnyakov – Dr. Sc., Docent, Professor, General Physics Department, Tver State University, ORCID: 0000-0003-1749-0336

Поступила в редакцию/received: 01.07.2025; после рецензирования/ revised: 20.08.2025; принята/accepted 25.08.2025.

1. Введение

В последние годы большое количество исследований посвящено разработке методов синтеза и изучению физико-химических свойств наночастиц многокомпонентных (высокоэнтропийных) оксидов [1]. Интерес к данным соединениям вызван широкими возможностями получения на их основе функциональных материалов с новыми или улучшенными функциональными свойствами, которые достигаются в результате управления структурой оксидной фазы на различных масштабных уровнях [2].

Одним из методов получения многокомпонентных наночастиц является совместный электрический взрыв проволок (СЭВП) различных металлов/сплавов [3]. Электрический взрыв проволок реализуется в результате протекания по металлическому проводнику импульса тока с плотностью $10^7 - 10^8$ А/см² [4]. В работе [5] на примере состава $(FeNiCoCrCu)_xO_y$ впервые показана возможность получения методом СЭВП порошков на основе наночастиц многокомпонентных оксидов. Установлено, что кристаллическая структура наночастиц представлена фазами каменной соли и шпинели. Уменьшение среднего размера наночастиц приводит к увеличению содержания фазы каменной соли. Данная зависимость, по мнению авторов, обусловлена уменьшением содержания кислорода в объеме наночастиц при увеличении скорости их охлаждения, что ограничивает возможность формирования фазы Me_3O_4 .

Целью данной работы являлось определение кристаллической структуры и дисперсного состава наночастиц многокомпонентного оксида $(NiFeCoCuZn)_xO_y$, формирующихся в результате СЭВП. Данное исследование представляет интерес как для развития представлений о механизмах формирования наночастиц многокомпонентных оксидов в условиях СЭВП, так и для разработки новых функциональных материалов. Входящие в указанный состав металлы в зависимости от содержания кислорода

способны формировать оксидные фазы, как со структурой каменной соли, так и шпинели. В зависимости от соотношения металлов решетке и кристаллической структуры, материалы на основе оксидов $(NiFeCoCuZn)_xO_y$, могут быть использованы в электрокатализе [6,7], фотокатализе [8], а также в энергетике при разработке аккумуляторов нового поколения [9].

2. Экспериментальная часть

Синтез порошка на основе наночастиц $(NiFeCoCuZn)_xO_y$ проводился на установке, созданной на базе колебательного RLC -контура. Принципиальная схема установки и принцип работы подробно описаны в работе [3]. Энергетические параметры синтеза, а именно отношение величины введенной в проволоки энергии E к суммарной энергии сублимации проволок ΣE_c , определялись с использованием временной зависимости тока $I(t)$, регистрируемой с использованием осциллографа Tektronix 2024b. Методика расчета величины E с использованием зависимости $I(t)$ приведена в работе [10]. Величина ΣE_c рассчитывалась с использованием справочных данных для металлов, взятых из работы [11]. Параметры синтеза порошка приведены в Таблице 1. При СЭВП с указанными в Таблице 1 диаметрами проволок и их количестве, соотношение металлов в продуктах взрыва составило $Ni_{32}Fe_{22}Co_6Cu_{26}Zn_{14}$ ат.%. Масса синтезированного образца составила 25 грамм.

Структурные характеристики наночастиц исследованы методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), энергодисперсионного анализа (ЭДС) и рентгенофазового анализа (РФА). Среднечисленный размер наночастиц определялся на основании гистограммы распределения по размерам. Для построения гистограммы определялся размер 1000 частиц. Параметры решеток соответствующих фаз определялись по результатам аппроксимации функции Нельсона-Райли.

Таблица 1. Параметры ЭВП для получения наночастиц $(NiFeCoCuZn)_xO_y$ (C – электрическая емкость накопителя энергии, U_0 – зарядное напряжение накопителя энергии, P – давление буферного газа ($Ar + 25\% \text{ мол. } O_2$)).

Состав	Марка металла/сплава проволоки	Геометрические параметры проволоки		C , мкФ	U_0 , кВ	P , МПа	ΣE_c , Дж
		длина, мм	диаметр, мм				
$NiFeCoCuZn$	НП-2	70	2×0,10	1,12	35,0	0,15	290,0
	Л63		2×0,15				
	29НК		0,20				

3. Результаты и обсуждения

На рис. 1 приведены временные зависимости тока и вводимой энергии, характерные для режима синтеза наночастиц $(NiFeCoCuZn)_xO_y$.

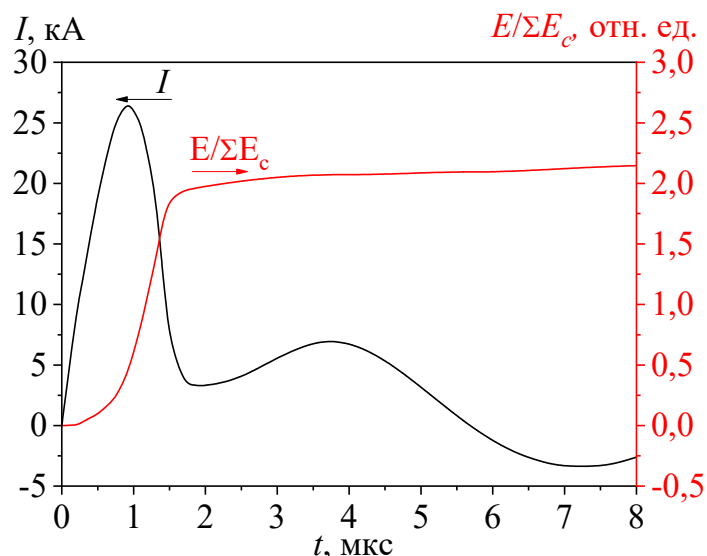


Рис. 1. Временные зависимости тока и вводимой энергии.

Анализ зависимостей показывает, что СЭВП протекает в режиме, близком к критическому. При данном режиме разряда количество энергии, выделяющейся на дуговой стадии ($t > 2$ мкс) является минимальным. Это позволяет пренебречь влиянием дуговой стадии разряда на средний размер и фазовый состав формирующихся наночастиц $(NiFeCoCuZn)_xO_y$. Амплитудное значение протекающего тока составляет 26 кА. При эквивалентном диаметре проволок, составляющем 0,324 мм, плотность тока составила $3,15 \times 10^7$ А/см². Данная величина указывает на то, что картина разрушения проволок соответствует быстрому взрыву. При быстром взрыве металл/сплав взрывообразно переходит из твердого состояния в двухфазное, представленное смесью слабоионизованной плазмы и частиц жидкого металла [4]. Величина параметра $E/\Sigma E_c$ составила порядка 2,0, что близко к оптимальному значению для получения наночастиц многокомпонентных оксидов методом СЭВП [5].

На рис. 2 приведены микрофотография наночастиц и функция распределения по размерам. Из представленных данных следует, что для наночастиц характерна сферическая форма, среднечисленный размер частиц составляет порядка 54 нм. Распределение наночастиц по размерам описывается нормально-логарифмическим законом. Нормально-логарифмическое распределение, а также сферическая форма наночастиц позволяют сделать вывод о завершенности процесса коалесценции кластеров разнородных металлов/сплавов на стадии адиабатического расширения продуктов СЭВП, приводящего к формированию наночастиц в

состоянии многокомпонентного расплава. Дальнейшее взаимодействие с буферным газом приводит к охлаждению и окислению многокомпонентных частиц.

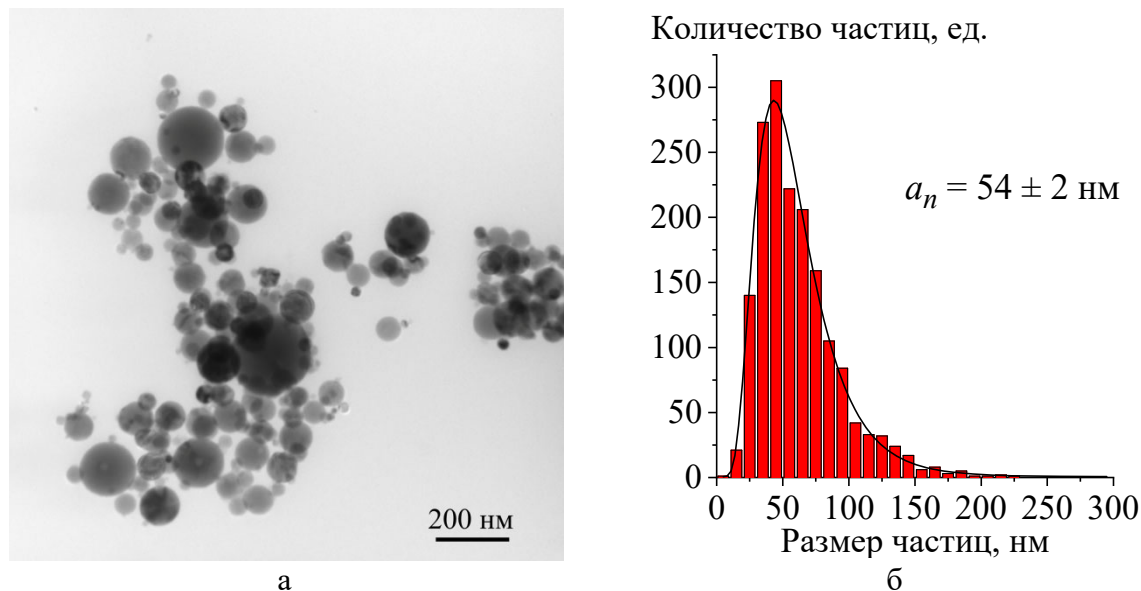


Рис. 2. Микрофотография (а) и распределение наночастиц по размерам (б).

На рис. 3 приведены данные энергодисперсионного (ЭДС) анализа наночастиц. Представленные данные указывают на однородное распределение металлов по объему наночастиц. Соотношение металлов в частицах удовлетворительно согласуется с соотношением металлов в продуктах взрыва проволок. Необходимо отметить, что содержание меди в частицах, определенное по данным ЭДС, значительно превышает содержание меди в продуктах взрыва проволок (~ 26 ат. %). Наблюдаемое расхождение, по нашему мнению, обусловлено особенностью проведения ЭДС анализа, в частности тем, что для фиксации сетки с частицами использовался медный держатель. Это могло внести искажения при обработке энергетических спектров, регистрируемых в процессе облучения частиц электронным пучком.

На рис. 4 приведены данные РФА. Синтезированный образец содержит две кубические фазы, соответствующие шпинели (Fd3m) и каменной соли (Fm3m). Содержание каменной соли составляет порядка 87% вес., содержание шпинели – 13% вес. Данные о кристаллической структуре частиц $(NiFeCoCuZn)_xO_y$, синтезированных СЭВП, согласуются с данными работ [6-9]. Металлы, входящие в состав частиц, могут образовывать оксидные фазы, как на основе шпинели, так и каменной соли. Соотношение фаз каменной соли и шпинели в образцах зависит как от соотношения двух и трехвалентных металлов в продуктах взрыва, так и от содержания кислорода [12, 13].

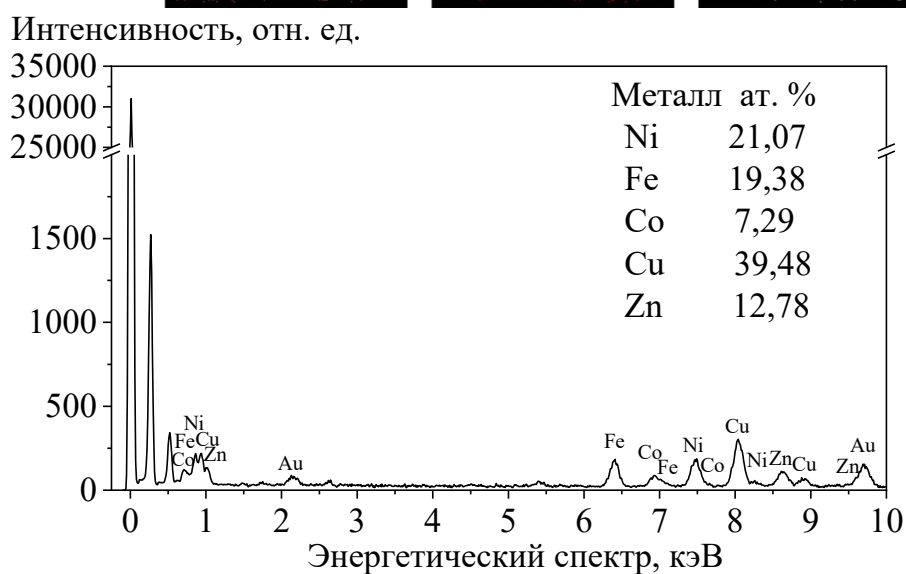
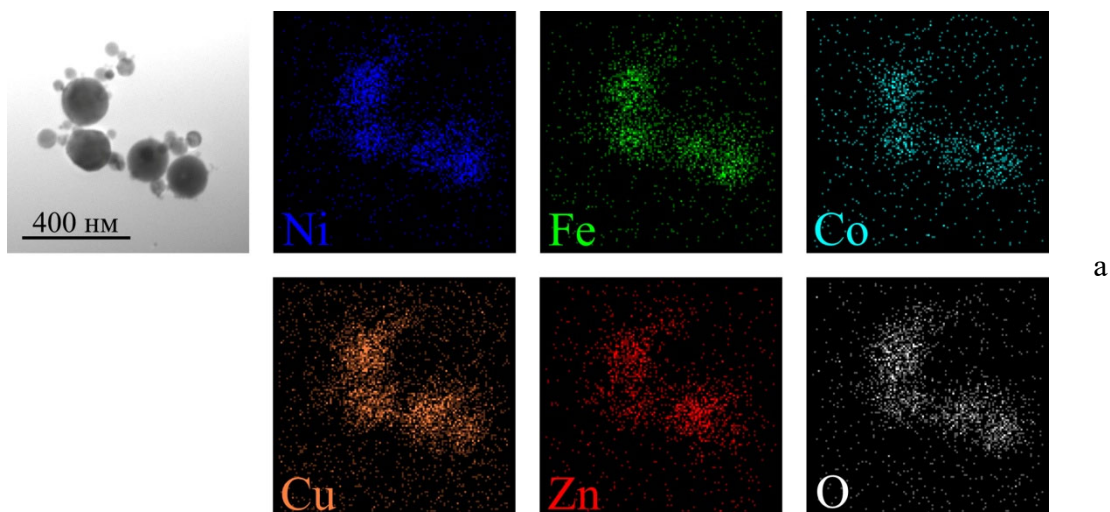


Рис. 3. Микрофотография (а) и данные энергодисперсионного анализа (б).

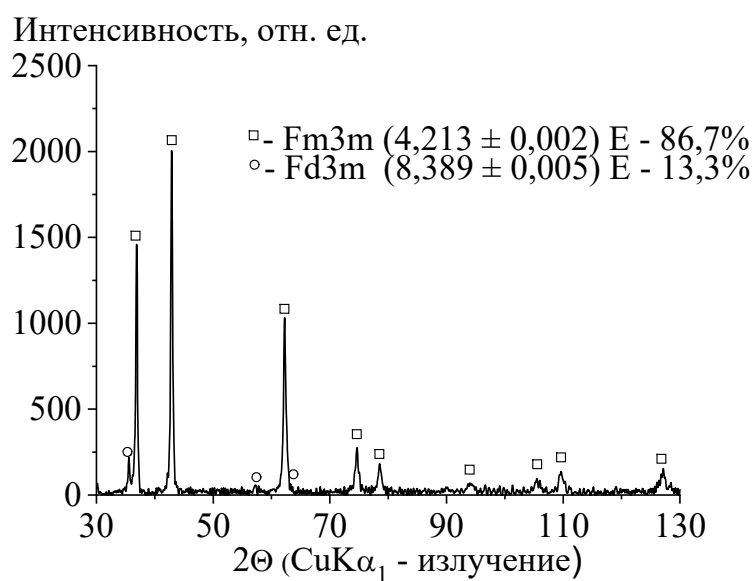


Рис. 4. Данные рентгенофазового анализа частиц $(NiFeCoCuZn)_xO_y$.

Эти данные показывают, что фазовый состав частиц $(NiFeCoCuZn)_xO_y$ полученных СЭВП, может быть оптимизирован как за счет изменения соотношения металлов в продуктах взрыва проволок, так и за счет изменения термодинамических параметров формирования наночастиц. Изменение термодинамических параметров может быть реализовано за счет изменения теплопроводности и давления буферного газа, а также за счет изменения содержания кислорода в буферном газе.

4. Заключение

Методом совместного взрыва проволок, содержащих такие металлы как Ni, Fe, Co, Cu, Zn , в кислородсодержащей атмосфере получены наночастицы многокомпонентного оксида $(NiFeCoCuZn)_xO_y$. Показано, что в результате нагрева проволок импульсом тока с плотностью $3,15 \times 10^7$ А/см² в атмосфере $Ar + 25\%$ мол. O_2 при давлении 0,15 МПа формируются наночастицы со средним размером порядка 54 нм. Распределение наночастиц по размерам описывается нормально-логарифмическим законом. Данные ЭДС анализа указывают на однородное распределение металлов в объеме наночастиц. Кристаллическая структура содержит две фазы, соответствующие шпинели и каменной соли. Полученные результаты показывают, что фазовый состав наночастиц $(NiFeCoCuZn)_xO_y$ может быть оптимизирован как за счет изменения элементного состава продуктов взрыва, так и за счет изменения термодинамических параметров формирования наночастиц в условиях СЭВП.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 24-29-00638, ссылка - <https://rscf.ru/project/24-29-00638/>).

Библиографический список:

1. **Xin, Y.** High-entropy materials: a new paradigm in the design of advanced batteries / Y. Xin, M. Zhu, H. Zhang et al. // Nano-Micro Letters. – 2026. – V.18. – I. 1. – Art. № 1. – 52 p. DOI: 10.1007/s40820-025-01842-w.
2. **Barber, J.P.** Disorder by design: unveiling local structure and functional insights in high entropy oxides / J.P. Barber, W.J. Deary, A.N. Titus et al. // Materials Horizons. – 2025. Advance Article. – 25 p. DOI: 10.1039/d5mh01033k.
3. **Pervikov, A.V.** Metal, metal composite, and composited nanoparticles obtained by electrical explosion of wires / A.V. Pervikov // Nanobiotechnology Reports. – 2021. – V. 16. – I. 4. – P. 401-420. DOI: 10.1134/S2635167621040091.
4. **Romanova, V.M.** Electric explosion of thin wires (a paradigm shift) / V.M. Romanova, I.N. Tilikin, A.E. Ter-Oganesyan et al. // Plasma Physics Reports. – 2024. – V. 50. – I. 9. – P. 1111-1121. DOI: 10.1134/S1063780X24600750.
5. **Suliz, K.V.** One-step novel synthesis of multicomponent oxide nanoparticles via joint exploding wires of dissimilar metals/alloys / K.V. Suliz, G.O. Agafonov, V.V. Shmakov et al. // Ceramics International. – 2025. – V. 51. – I. 18(A). – P. 25632-25643. DOI: 10.1016/j.ceramint.2025.03.245.
6. **Gu, Y.** Engineering the oxygen vacancies of rocksalt-type high-entropy oxides for enhanced electrocatalysis / Y. Gu, A. Bao, X. Wang et al. // Nanoscale. – 2022. – V. 14. – I. 2. – P. 515-524. DOI: 10.1039/D1NR07000B.
7. **M´arquez, V.** Evaluation of the hydrogenation reaction on the electrocatalytic nitrobenzene degradation over

- (FeCoNiCuZn)_xO_y high entropy oxides (HEOs) / V. M´arquez, M. Fereidooni, J. S. Santos et al. // *Chemosphere*. – 2023. – V. 341. – Art. № 140130. – 12 p. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.140130.
8. Liu, L. Elemental Zn modulation of interfacial structure and in situ construction of (FeCoNiCuZn)O high-entropy oxide/ZnO heterojunction for photocatalytic Rhodamine B dyes / L. Liu, Z. Yang, Z. Xu et al. // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2024. – V. 1008. – Art. № 176504. – 12 p. DOI: 10.1016/j.jallcom.2024.176504.
9. Mohanty, G.C. Fabrication of aqueous asymmetric supercapacitor device by using spinel type (FeCoNiCuZn)₃O₄ high entropy oxide and green carbon derived from plastic wastes / G. C. Mohanty, S. Das, A. Verma // *Ceramics International*. – 2024. – V. 50. – I. 23. – Part A. – P. 48938-48947. DOI: 10.1016/j.ceramint.2024.09.152.
10. Kvartskhava, I.F. Oscillographic determination of energy of electric explosion of wires / I.F. Kvartskhava, V.V. Bondarenko, A.A. Pliutto, A.A. Chernov // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. – 1957. – V. 4. – I. 5. – P. 623-629.
11. Haynes, W.M. CRC handbook of chemistry and physics / W.M. Haynes. – 95th ed. – Boca Raton: CRC Press, 2014. – 2704 p. DOI: 10.1201/b17118.
12. Pu, Y. (Mg,Mn,Fe,Co,Ni)O: A rocksalt high-entropy oxidecontaining divalent Mn and Fe / Y. Pu, D. Moseley, Z. He et al. // *Science Advance*. – 2023. – V. 9. – № 38. – Art. № eadi8809. – 12 p. DOI: 10.1126/sciadv.adi8809
13. Almishal, S.S.I. Thermodynamics-inspired high-entropy oxide synthesis / S.S.I. Almishal, M. Furst, Y. Tan et al. // *Nature Communications*. – 2025. – V. 16. – Art. № 8211. – 9 p. DOI: 10.1038/s41467-025-63567-z.

References:

- Xin Y., Zhu M., Zhang H. et al. High-entropy materials: A new paradigm in the design of advanced batteries, *Nano-Micro Letters*, 2026, vol. 18, issue 1, art. no 1, 52 p. DOI: 10.1007/s40820-025-01842-w.
- Barber J.P., Deary W.J., Titus A.N. et al. Disorder by design: unveiling local structure and functional insights in high entropy oxides, *Materials Horizons*, 2025, Advance Article, 25 p. DOI: 10.1039/d5mh01033k.
- Pervikov A.V. Metal, metal composite, and composited nanoparticles obtained by electrical explosion of wires, *Nanobiotechnology Reports*, 2021, vol. 16, issue 4, pp. 401-420. DOI: 10.1134/S2635167621040091.
- Romanova V.M., Tilikin I.N., Ter-Oganesyan A.E. et al. Electric explosion of thin wires (a paradigm shift), *Plasma Physics Reports*, 2024, vol. 50, issue 9, pp. 1111-1121. DOI: 10.1134/S1063780X24600750.
- Suliz K.V., Agafonov G.O., Shmakov V.V. et al. One-step novel synthesis of multicomponent oxide nanoparticles via joint exploding wires of dissimilar metals/alloys, *Ceramics International*, 2025, vol. 51, issue 18 (A), pp. 25632-25643. DOI: 10.1016/j.ceramint.2025.03.245
- Gu Y., Bao A., Wang X. et al. Engineering the oxygen vacancies of rocksalt-type high-entropy oxides for enhanced electrocatalysis, *Nanoscale*, 2022, vol. 14, issue 2, pp. 515-524. DOI: 10.1039/D1NR07000B.
- M´arquez V., Fereidooni M., Santos J.S. et al. Evaluation of the hydrogenation reaction on the electrocatalytic nitrobenzene degradation over (FeCoNiCuZn)_xO_y high entropy oxides (HEOs), *Chemosphere*, 2023, vol.341, art. no. 140130, 12 p. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.140130.
- Liu L., Yang Z., Xu Z. et al. Elemental Zn modulation of interfacial structure and in situ construction of (FeCoNiCuZn)O high-entropy oxide/ZnO heterojunction for photocatalytic Rhodamine B dyes, *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, vol. 1008, art. no 176504, 12 p. DOI: 10.1016/j.jallcom.2024.176504.
- Mohanty G.C., Das S., Verma A. Fabrication of aqueous asymmetric supercapacitor device by using spinel type (FeCoNiCuZn)₃O₄ high entropy oxide and green carbon derived from plastic wastes, *Ceramics International*, 2024, vol. 50, issue 23, part 2, pp. 48938-48947. DOI: 10.1016/j.ceramint.2024.09.152.
- Kvartskhava I.F., Bondarenko V.V., Pliutto A.A., Chernov A.A. Oscillographic determination of energy of electric explosion of wires, *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1957, vol.4, issue 5, pp. 623-629.
- Haynes W.M. CRC handbook of chemistry and physics, 95th ed. Boca Raton, CRC Press, 2014, 2704 p. DOI: 10.1201/b17118.
- Pu Y., Moseley D., He Z. et al. (Mg,Mn,Fe,Co,Ni)O: A rocksalt high-entropy oxidecontaining divalent Mn and Fe, *Science Advance*, 2023, vol. 9, no. 38, art. no. eadi8809, 12 p. DOI: 10.1126/sciadv.adi8809.
- Almishal S.S.I., Furst M., Tan Y. et al. Thermodynamics-inspired high-entropy oxide synthesis, *Nature Communications*, 2025, vol. 16, art. no. 8211, 9 p. DOI: 10.1038/s41467-025-63567-z.