

УДК 538.911

Оригинальная статья

**Кристаллическая структура и дисперсный состав наночастиц
многокомпонентных NiFeCoCrCuAlMo, NiFeCoCrCuAlMoW сплавов,
полученных совместным электрическим взрывом проволок**

К.В. Сулиз, А.В. Первигов

ФГБУН Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

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

konstantin.suliz@gmail.com

DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.211

Аннотация: Совместным электрическим взрывом проволок различных металлов/сплавов в атмосфере аргона синтезированы наночастицы многокомпонентных сплавов *NiFeCoCrCuAlMo*, *NiFeCoCrCuAlMoW*. Методами просвечивающей электронной микроскопии и рентгенофазового анализа определены структурные характеристики наночастиц. Показано, что средний размер частиц составляет порядка 50 нм (при отношении величины введенной в проволоки энергии E к суммарной энергии сублимации проволок ΣE_c порядка 1,6), а кристаллическая структура представлена ОЦК- и ГЦК-фазами твердых растворов замещения и ОЦК-фазой, советующей твердому раствору замещения на основе тугоплавкого металла. Сделано предположение о том, что более высокая однородность элементного и фазового состава наночастиц многокомпонентных *NiFeCoCrCuAlMo*, *NiFeCoCrCuAlMoW* сплавов может быть достигнута за счет изменения энергетических параметров совместного электрического взрыва проволок. Таким образом, результаты исследований указывают на необходимость оптимизации параметров синтеза с целью получения наночастиц с заданным элементным составом и кристаллической структурой.

Ключевые слова: высокоэнтропийные сплавы, 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

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

Original paper

**Crystal structure and dispersed composition of multicomponent NiFeCoCrCuAlMo and
NiFeCoCrCuAlMoW alloy nanoparticles obtained by joint exploding wires**

K.V. Suliz, A.V. Pervikov

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

DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.211

Abstract: Nanoparticles of multicomponent *NiFeCoCrCuAlMo* and *NiFeCoCrCuAlMoW* alloys were synthesized by combined electrical explosion of wires of various metals/alloys in an argon atmosphere. Transmission electron microscopy and X-ray diffraction analysis were used to determine the structural characteristics of the nanoparticles. The average particle size is about 50 nm (with the ratio of the energy E introduced into the wires to the total sublimation energy of the wires ΣE_c of the order of 1,6), and the crystal structure is represented by the bcc and fcc phases of substitution solid solutions and the bcc phase corresponding to a substitution solid solution based on a refractory metal. It has been suggested that greater homogeneity of the elemental and phase composition of nanoparticles in multicomponent *NiFeCoCrCuAlMo* and *NiFeCoCrCuAlMoW* alloys can be achieved by varying the energy parameters of the combined electrical explosion of wires. Thus, the research results indicate the need to optimize the synthesis parameters to obtain nanoparticles with a desired elemental composition and crystal structure.

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

© К.В. Сулиз, А.В. Первигов, 2025

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

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

Поступила в редакцию/received: 06.07.2025; после рецензирования/reviced: 01.09.2025; принята/accepted 02.09.2025.

1. Введение

В последние годы наблюдается повышенный интерес к синтезу и изучению физико-химических свойств наноразмерных частиц на основе многокомпонентных (высокоэнтропийных) сплавов [1-3]. Это обусловлено возможностью получения на их основе функциональных материалов для широкого спектра каталитических реакций [4,5], биомедицины [6], генерации и хранения водорода [7, 8].

Одним из методов получения многокомпонентных наночастиц является совместный электрический взрыв проволок (СЭВП) различных металлов/сплавов [9]. Электрический взрыв реализуется в результате протекания по проволоке импульса тока с плотностью $10^7 - 10^8$ А/см² [10]. Достоинствами данного метода являются одностадийность, отсутствие побочных продуктов синтеза, относительно низкие энергозатраты (25 – 50 кВт/ч·кг), относительно высокая производительность (до 200 г/ч) [11]. Импульсный характер нагрева проволок и интенсивное охлаждение продуктов взрыва позволяют использовать для получения многокомпонентных наночастиц металлы с существенно различающимися термодинамическими параметрами и ограниченной взаимной растворимостью [12]. Это позволяет получить материалы с новыми структурно-фазовыми состояниями, не изученными ранее.

Металлы, используемые для получения наночастиц методом ЭВП, разделяют на две группы в зависимости от отношения работы выхода электронов к энергии сублимации металла [11]. Получение методом ЭВП порошков на основе наночастиц тугоплавких металлов затруднено из-за низкой работы выхода электронов, что приводит к формированию шунтирующего разряда по поверхности проволоки, снижающего эффективность нагрева металла импульсом тока. В работе [13] на примере СЭВП меди и вольфрама показано, что в условиях совместного взрыва проволок первой (медь) и второй (вольфрам) группы удается исключить развитие шунтирующего разряда по поверхности вольфрамовой проволоки. Отсутствие шунтирующего разряда позволяет увеличить энергию, вводимую в вольфрамовую проволоку, что способствует более эффективному переходу вольфрама в паро-плазменное состояние. Эти данные показывают, что использование СЭВП, в том числе из тугоплавких металлов, дает возможность получения порошков на основе наночастиц многокомпонентных сплавов, содержащих тугоплавкие металлы.

Целью данной работы являлось определение дисперсного и фазового состава порошков на основе наночастиц многокомпонентных $NiFeCoCrCuAlMo$, $NiFeCoCrCuAlMoW$ сплавов, полученных СЭВП в атмосфере аргона.

2. Экспериментальная часть

Принципиальная схема установки для получения порошков многокомпонентных $NiFeCoCrCuAlMo$, $NiFeCoCrCuAlMoW$ сплавов методом СЭВП приведена в работе [9]. Энергетические параметры СЭВП, а именно отношение величины введенной в проволоки энергии E к суммарной энергии сублимации проволок ΣE_c , определялись с использованием временной зависимости тока $I(t)$. Зависимость $I(t)$ регистрировалась с использованием электронного осциллографа Tektronix 2024b. Методика расчета величины E приведена в работе [14]. Величина ΣE_c рассчитывалась на основании справочных данных, приведенных в работе [15]. Параметры синтеза образцов приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Параметры ЭВП для получения наночастиц $NiFeCoCrCuAlMo$, $NiFeCoCrCuAlMoW$ (C – электрическая емкость накопителя энергии, U_0 – зарядное напряжение накопителя энергии, P – давление буферного газа (Ar)).

Состав	Марка металла/сплава проволоки	Геометрические параметры проволоки		C , мкФ	U_0 , кВ	P , МПа	ΣE_c , Дж
		длина, мм	диаметр, мм				
$NiFeCoCrCuAlMo$	29НК	80	0,20	1,49	35,0	0,30	436
	X15H60		0,20				
	A5(Al)		0,16				
	M1(Cu)		0,10				
	MK(Mo)		0,10				
$NiFeCoCrCuAlMoW$	29НК	80	0,20	2,40	31,0	0,30	511
	X15H60		0,20				
	A5(Al)		0,16				
	M1(Cu)		0,10				
	MK(Mo)		0,10				
	BA(W)		0,10				

При СЭВП с указанными в Таблице 1 диаметрами, соотношение металлов в продуктах взрыва составило $Ni_{30}Fe_{28}Co_6Cr_6Cu_9Al_{15}Mo_6$ и $Ni_{34}Fe_{24}Co_5Cr_5Cu_7Al_{13}Mo_6W_6$ ат.%. Масса полученного образца составила 50 грамм.

Структурные характеристики и морфология наночастиц исследованы методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), энергодисперсионного анализа (ЭДС) с использованием просвечивающего

электронного микроскопа JEOL JEM-2100. Среднечисленный размер наночастиц определялся на основании гистограммы распределения по размерам. Для построения гистограммы определялся размер 1000 частиц. Кристаллическая структура наночастиц определялась по данным рентгенофазового анализа, проводимого на рентгеновском дифрактометре ДРОН-8. Параметры кристаллических решеток определялись по результатам аппроксимации функции Нельсона-Райли.

3. Результаты и обсуждения

На рис. 1 приведены временные зависимости тока и вводимой энергии, характерные для режима синтеза наночастиц $NiFeCoCrCuAlMo$, $NiFeCoCrCuAlMoW$. Анализ зависимостей $I(t)$ показывает, что при СЭВП формируется шунтирующая стадия разряда на границе между расширяющимися продуктами взрыва и буферным газом. Моменты времени, соответствующие зажиганию шунтирующего разряда, отмечены вертикальными пунктирными линиями на рис. 1 а.

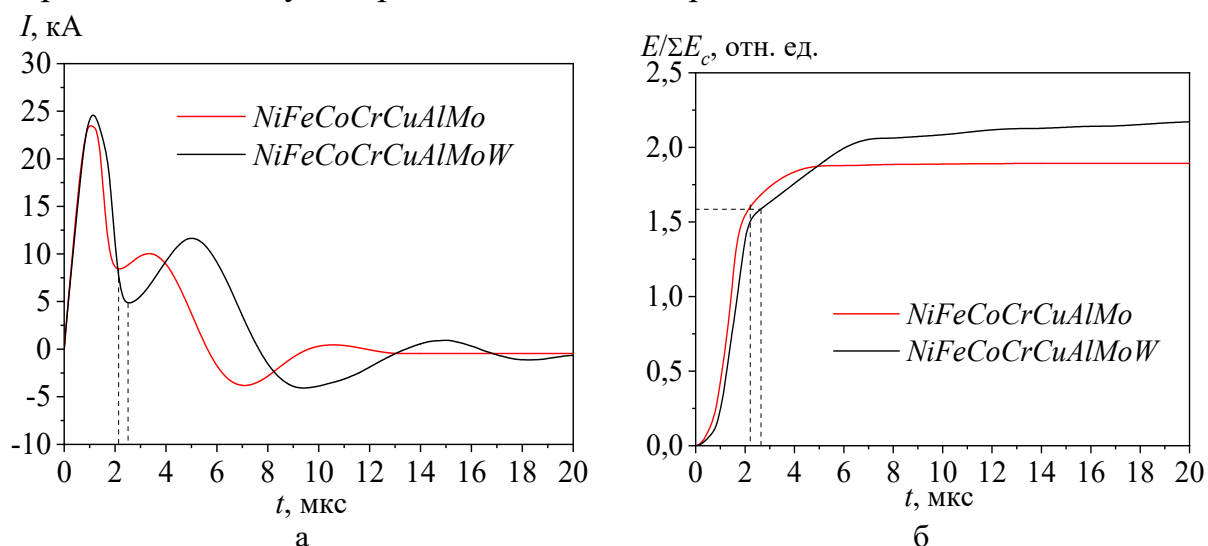


Рис. 1. Временные зависимости тока и вводимой энергии.

При данном типе локализации разряда выделение энергии происходит вне основного объема расширяющихся продуктов взрыва, поэтому выделяемая энергия не оказывает существенного влияния на фазовое состояние расширяющихся продуктов взрыва [16]. В этой связи, величина $E/\Sigma E_c$ рассчитывалась до момента зажигания шунтирующего разряда. Из данных, представленных на рис. 1 б, следует, что величина $E/\Sigma E_c$ для синтезированных образцов составляет порядка 1,6. Необходимо отметить, что данное значение будет отличаться для отдельных проволок скрутки, так как проволоки имеют разное удельное электрическое сопротивление и диаметр. При эквивалентных диаметрах скрученных проволок, равных 0,354 и 0,382 мм для составов с Mo и MoW соответственно, амплитудные

значения тока, составили 23,4 и 24,6 кА. Из представленных данных следует, что плотность тока в проведенных экспериментах составила порядка $2,30 \cdot 10^7$ А/см². Данное значение указывает на разрушение проволок в режиме быстрого взрыва [10]. Для данного режима характерно формирование продуктов взрыва в виде однородной смеси частиц (кластеров) жидкого металла и слабоионизованной плазмы [10].

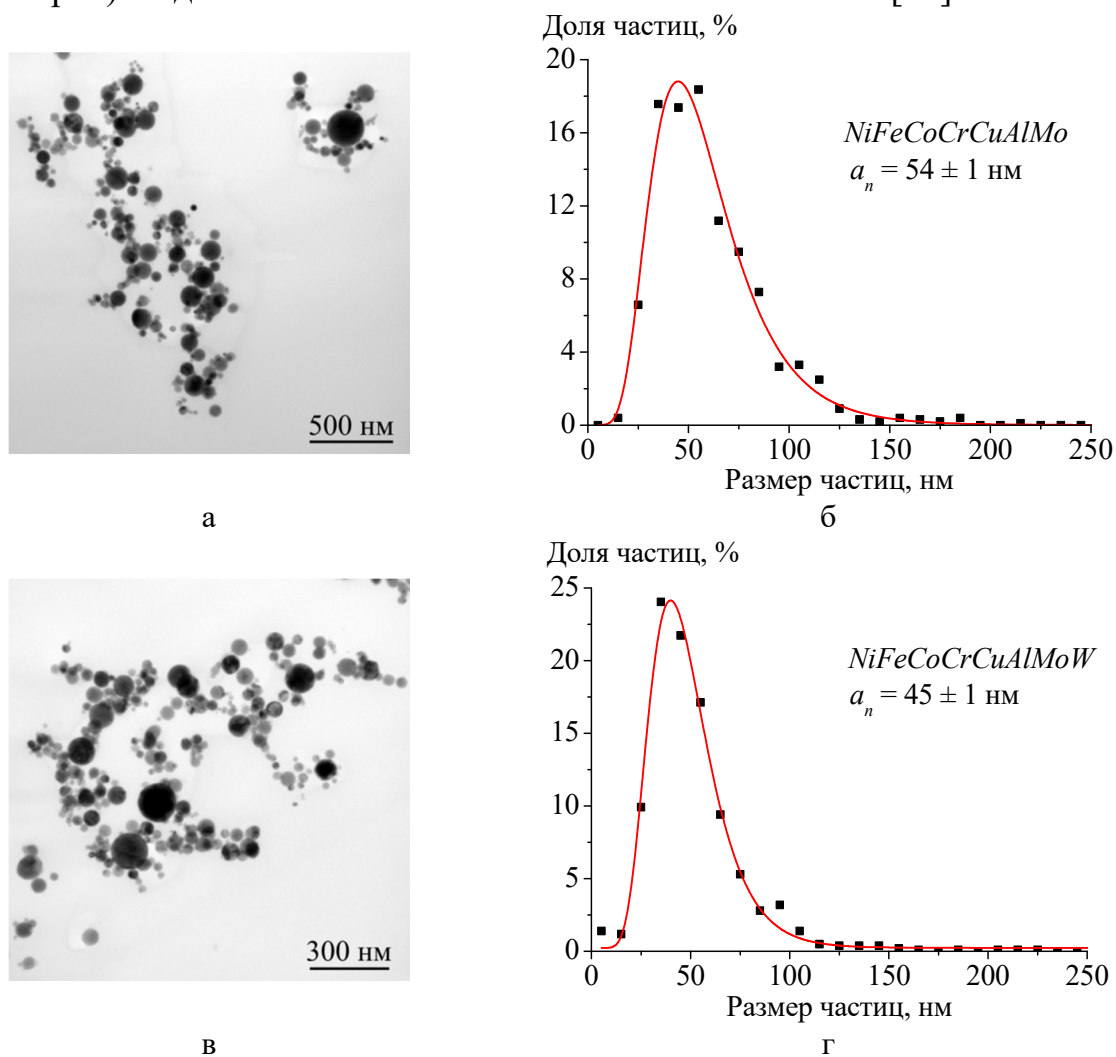


Рис. 2. Микрофотография ПЭМ (а, в) и распределение наночастиц по размерам (б, г) для наночастиц $NiFeCoCrCuAlMo$, $NiFeCoCrCuAlMoW$.

На рис. 2 приведены микрофотографии и функции распределения наночастиц по размерам. Для полученных образцов характерно нормально-логарифмическое распределение по размерам при среднем размере частиц порядка 50 нм. Размер частиц варьируется от 10 до 300 нм. Необходимо отметить, что в образцах могут присутствовать отдельные частицы микронных и субмикронных размеров на основе используемых металлов и сплавов, что связано с особенностью фазового перехода конденсированной фазы в условиях импульсного нагрева [10]. Размеры и массовое содержание частиц микронных размеров в продуктах ЭВП уменьшаются с

увеличением $E/\Sigma E_c$ [17].

Данные энергодисперсионного анализа, представленные на рис. 3, указывают на относительно однородное распределение металлов в объеме наночастиц, характерное для многокомпонентных сплавов со структурой твердых растворов замещения.

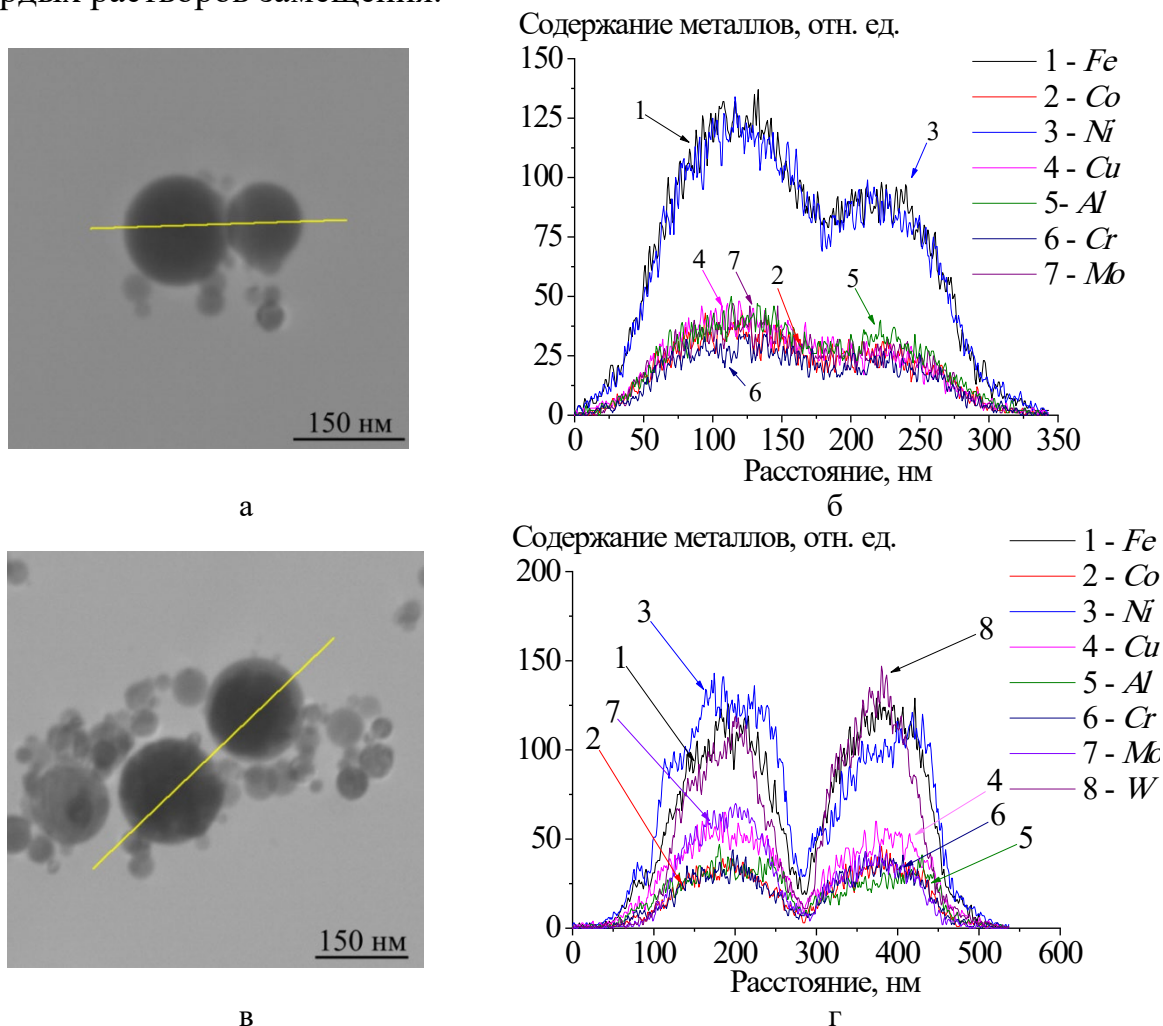


Рис. 3. Микрофотографии ПЭМ (а, в) и данные энергодисперсионного анализа (б, г) для наночастиц $NiFeCoCrCuAlMo$, $NiFeCoCrCuAlMoW$.

Соотношение металлов в частицах, определенное по данным ЭДС-анализа, удовлетворительно согласуется с соотношением металлов в продуктах взрыва, что указывает на относительно однородное распределение металлов по частицам. Необходимо отметить, что для состава с MoW наблюдается обогащение поверхности частиц атомами Ni , тогда, как атомы Fe и W стремятся обогатить центральную область частиц. Эти данные позволяют предположить, что в составе с MoW возможна сегрегация металлов с образованием таких структур, как «ядро-оболочка» и «янус-частица». Сегрегация может быть обусловлена не только перераспределением металлов между объемом и поверхностью наночастиц для минимизации поверхностной энергии [18], но и

существенно различающимися температурами плавления металлов. В таком случае, зародыш твердой фазы будет представлен, преимущественно, атомами более тугоплавкого металла, а поверхность частицы или ее отдельное зерно в случае формирования структуры «янус-частиц», обогащена атомами легкоплавких металлов.

На рис. 4 приведены результаты рентгенофазового анализа образцов. Для состава с Mo характерно наличие трех кристаллических структур, а именно ГЦК-фазы и двух ОЦК-фаз с существенно различающимися параметрами кристаллической ячейки (a). ОЦК-фаза с параметром ячейки $a = 3,11 \text{ \AA}$, наиболее вероятно, соответствует твердому раствору замещения на основе Mo ($Mo_{100-x}Me_x$, где $Me - Fe, Ni, Co, Al$), что следует из близости величины a к соответствующему параметру для чистого Mo , равного $3,147 \text{ \AA}$. ГЦК- и ОЦК-фазы с параметрами ячеек $2,889 \text{ \AA}$ и $3,618 \text{ \AA}$ характерны для многокомпонентных сплавов со структурой на основе твердых растворов замещения.

Для состава с MoW характерно наличие 4 фаз. Наряду с ГЦК- и ОЦК фазами, в данном образце присутствует фаза со структурой, характерной для ряда интерметаллических соединений $Fe_7W_6, Fe_7Mo_6, Co_7W_6, Co_7Mo_6$ (μ -фаза). Параметр ячейки одной из ОЦК-фаз так же близок ($a = 3,138 \text{ \AA}$) к параметрам ячеек Mo и W ($a = 3,165 \text{ \AA}$).

Присутствие в образцах ОЦК-фазы с параметром ячейки, близким к параметру ячейки Mo и W , указывает на присутствие в полученных образцах фаз со структурой твердых растворов замещения на основе Mo и W . По нашему мнению, присутствие данных фаз в многокомпонентном сплаве может быть следствием неоднородности фазового состояния продуктов. Присутствие в продуктах СЭВП микронных и субмикронных частиц Mo и W , которые имеют большую скорость охлаждения в сравнении с переходными металлами, ограничивает однородное распределение металлов среди формирующихся многокомпонентных частиц. Это приводит к тому, что часть частиц наноразмерной фракции будет обеднена Mo и W . При этом на основе микронных и субмикронных частиц Mo и W возможно формирование расплавов, обогащенных данными металлами. Кристаллизация таких частиц будет приводить к формированию твердых растворов на основе Mo , W и интерметаллических соединений, что наблюдалось на примере состава с MoW . Это показывает, что присутствие в продуктах взрыва микронных и субмикронных частиц тугоплавких металлов в жидкой фазе может оказывать существенное влияние на элементный состав и кристаллическую структуру формирующихся наночастиц. Как было отмечено выше, массовое содержание и размеры микронных и субмикронных частиц жидких металлов в продуктах СЭВП определяются, преимущественно, величиной

параметра $E/\Sigma E_c$. Это показывает, что более высокая однородность элементного и фазового состава наночастиц многокомпонентных $NiFeCoCrCuAlMo$, $NiFeCoCrCuAlMoW$ сплавов может быть достигнута за счет изменения энергетических параметров СЭВП.

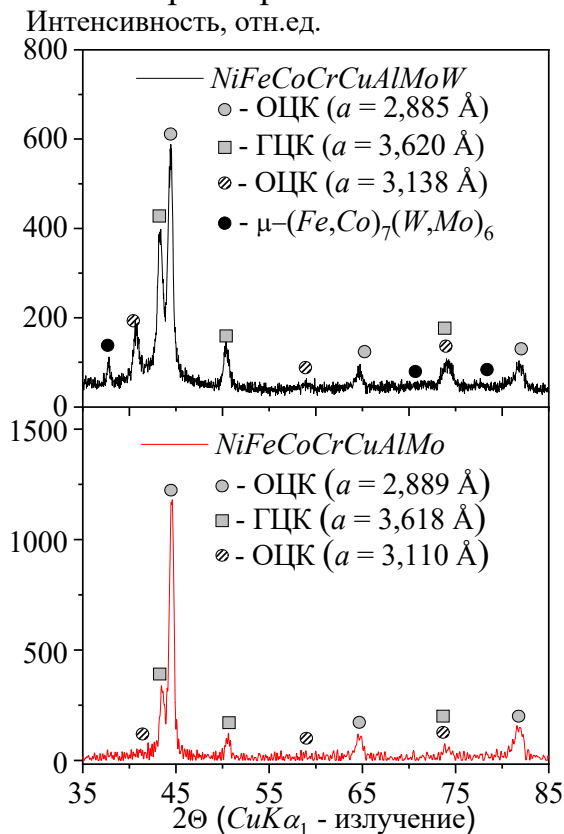


Рис. 4. Данные рентгенофазового анализа частиц $NiFeCoCrCuAlMo$, $NiFeCoCrCuAlMoW$.

4. Заключение

Методом СЭВП в атмосфере аргона синтезированы наночастицы многокомпонентных $NiFeCoCrCuAlMo$, $NiFeCoCrCuAlMoW$ сплавов. Показано, что при введении в проволоки энергии $E/\Sigma E_c \approx 1,6$ формируются порошки на основе наночастиц со средним размером порядка 50 нм. Распределение частиц по размерам описывается нормально-логарифмическим законом. Кристаллическая структура наночастиц представлена ГЦК- и ОЦК-фазами, соответствующими многокомпонентным сплавам на основе твердых растворов замещения. Результаты исследования свидетельствуют о наличии в продуктах СЭВП микронных и субмикронных частиц тугоплавких металлов, что ограничивает на данном этапе исследований возможности получения наночастиц многокомпонентных сплавов $NiFeCoCrCuAlMo$, $NiFeCoCrCuAlMoW$ с заданным элементным составом и кристаллической структурой.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема «Научные основы модификации пористых керамических, углеродных и полимерных материалов оксидными и металлоксидными наноструктурными частицами и функциональными группами для создания новых иерархически организованных материалов различного назначения» FWRW-2022-0002.

Библиографический список:

1. **Zoubi, W.A.** Multi-principal element nanoparticles: Synthesis strategies and machine learning prediction / W.A. Zoubi, Y. Sheng, I. Hussain et al. // *Coordination Chemistry Reviews*. – 2025. – V. 535. – Art. № 216656. – 22 p. DOI: 10.1016/j.ccr.2025.216656.
2. **Yang, L.** Synthesis strategies for high entropy nanoparticles / L. Yang, R. He, J. Chai et al. // *Advanced Materials*. – 2025. – V.37. – I. 1. – Art. № 2412337. – 53 p. DOI: 10.1002/adma.202412337.
3. **Zhang, B.** Synthesis strategies and multi-field applications of nanoscale high-entropy alloys / B. Zhang, Q. Mu, Y. Pei et al. // *Nano-Micro Letters*. – 2025. – V.17. – I. 1. – Art. № 283. – 38 p. DOI: /10.1007/s40820-025-01779-0.
4. **Chen, Y.** Multi-metallic nanoparticles: synthesis and their catalytic applications / Y. Chen, A. Zohaib, H. Sunand, S. Sun. // *Chemical Communications*. – 2025. – V. 61. – I. 65. – P. 12097-12114. DOI: 10.1039/d5cc01468a.
5. **Li, A.** Synthesis of high-entropy alloys for electrocatalysis / A. Li, N. Qureshi, V. Maheshwari // *Nanoscale*. – 2025. – V. 17. – I. 35. – P. 20020-20043. DOI: 10.1039/d5nr02183a.
6. **Adhikari, J.** A review on high entropy alloys as metallic biomaterials: fabrication, properties, applications, challenges, and future prospects / J. Adhikari, P. Saha, P. Mandal et al. // *Biomedical Materials & Devices*. – 2025. – 30 p. DOI: 10.1007/s44174-025-00314-4
7. **Hojjati-Najafabadi, A.** Tailoring high-entropy alloys for cutting-edge hydrogen evolution electrocatalysis / A. Hojjati-Najafabadi, R. Behmadi, Y. He, H. Kamyab // *Sustainable Materials and Technologies*. – 2025. – V. 46. – Art. № e01655. – 18 p. DOI: 10.1016/j.susmat.2025.e01655.
8. **Yadav Y.K.** Al–Cu–Fe–Ni–Ti high entropy alloy nanoparticles as new catalyst for hydrogen sorption in MgH₂ / Y. K. Yadav, M. A. Shaz, T. P. Yadav // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2025. – V. 137. – P. 1137-1147. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.08.095.
9. **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.
10. **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.
11. **Kotov, Yu.A.** The electrical explosion of wire: A method for the synthesis of weakly aggregated nanopowders / Yu.A. Kotov // *Nanotechnologies in Russia*. – 2009. – V. 4. – I. 7-8. – P. 415-424. DOI: 10.1134/S1995078009070039
12. **Han, R.** Compositionally graded multi-principal-element alloy coating with hybrid amorphous-nanocrystalline structure by directional electrical explosion / R. Han, C. Li, Q. Li et al. // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2023. – V. 933. – Art. № 167780. – 7 p. DOI: 10.1016/j.jallcom.2022.167780
13. **Li, T.** Enhanced tungsten wire energy deposition during copper–tungsten intertwined electrical explosion in atmospheric air / T. Li, H. Shi, T. Wang et al. // *Applied Physics Letters*. – 2024. – V. 125. – I. 20. – Art. № 204105. – 6 p. DOI: 10.1063/5.0236288.
14. **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.
15. **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.
16. **Tkachenko, S.I.** Distribution of matter in the current-carrying plasma and dense core of the discharge channel formed upon electrical wire explosion / S.I. Tkachenko, A.R. Mingaleev, V.M. Romanova et al. // *Plasma Physics Reports*. – 2009. – V. 35. – I. 9. – P. 734-753. DOI: 10.1134/S1063780X09090037
17. **Lv, F.** The early stage of the thermal pulse explosions of aluminum nanowires under different energy deposition levels / F. Lv, P. Liu, H. Qi et al. // *Computational Materials Science*. – 2019. – V. 170. – Art. № 109142. – 8 p. DOI: 10.1016/j.commatsci.2019.109142.
18. **Eom, N.** General trends in core–shell preferences for bimetallic nanoparticles / N. Eom, M.E. Messing,

J. Johansson, K. Deppert // ACS Nano. – 2021. – V. 5. – I. 5. – P. 8883-8895. DOI: 10.1021/acsnano.1c01500.

References:

1. Zoubi W.A., Sheng Y., Hussain I. et al. Multi-principal element nanoparticles: Synthesis strategies and machine learning prediction, *Coordination Chemistry Reviews*, 2025, vol. 535, art. no. 216656, 22 p. DOI: 10.1016/j.ccr.2025.216656.
2. Yang L., He R., Chai J. et al. Synthesis strategies for high entropy nanoparticles, *Advanced Materials*, 2025, vol. 37, issue 1, art. no. 2412337, 53 p. DOI: 10.1002/adma.202412337.
3. Zhang B., Mu Q., Pei Y. et al. Synthesis strategies and multi-field applications of nanoscale high-entropy alloys, *Nano-Micro Letters*, 2025, vol. 17, issue 1, art. no. 283, 38 p. DOI: 10.1007/s40820-025-01779-0.
4. Chen Y., Zohaib A., Sunand H. et al. Multi-metallic nanoparticles: synthesis and their catalytic applications, *Chemical Communications*, 2025, vol. 61, issue 65, pp. 12097-12114. DOI: 10.1039/d5cc01468a.
5. Li A., Qureshi N., Maheshwari V. Synthesis of high-entropy alloys for electrocatalysis, *Nanoscale*, 2025, vol. 17, issue 35, pp. 20020-20043. DOI: 10.1039/d5nr02183a.
6. Adhikari J., Saha P., Mandal P. et al. A review on high entropy alloys as metallic biomaterials: fabrication, properties, applications, challenges, and future prospects, *Biomedical Materials & Devices*, 2025, 30 p. DOI: 10.1007/s44174-025-00314-4.
7. Hojjati-Najafabadi A., Behmadi R., He Y., Kamyab H. Tailoring high-entropy alloys for cutting-edge hydrogen evolution electrocatalysis, *Sustainable Materials and Technologies*, 2025, vol. 46, art. no. e01655, 18 p. DOI: 10.1016/j.susmat.2025.e01655.
8. Yadav Y.K., Shaz M.A., Yadav T.P. Al–Cu–Fe–Ni–Ti high entropy alloy nanoparticles as new catalyst for hydrogen sorption in MgH₂, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2025, vol. 137, pp. 1137-1147. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.08.095.
9. 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.
10. 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.
11. Kotov Yu.A. The electrical explosion of wire: A method for the synthesis of weakly aggregated nanopowders, *Nanotechnologies in Russia*, 2009, vol. 4, issue 7-8, pp. 415-424. DOI: 10.1134/S1995078009070039.
12. Han R., Li C., Li Q. et al. Compositionally graded multi-principal-element alloy coating with hybrid amorphous-nanocrystalline structure by directional electrical explosion, *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, vol. 933, art. no. 167780, 7 p. DOI: 10.1016/j.jallcom.2022.167780.
13. Li T., Shi H., Wang T. et al. Enhanced tungsten wire energy deposition during copper–tungsten intertwined electrical explosion in atmospheric air, *Applied Physics Letters*, 2024, vol. 125, issue 20, art. no. 204105, 6 p. DOI: 10.1063/5.0236288.
14. 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.
15. Haynes W.M. CRC handbook of chemistry and physics, 95th ed., Boca Raton, CRC Press, 2014, 2704 p. DOI: 10.1201/b17118.
16. Tkachenko S.I., Mingaleev A.R., Romanova V.M. et al. Distribution of matter in the current-carrying plasma and dense core of the discharge channel formed upon electrical wire explosion, *Plasma Physics Reports*, 2009, vol. 35, issue 9, pp. 734-753. DOI: 10.1134/S1063780X09090037.
17. Lv F., Liu P., Qi H. et al. The early stage of the thermal pulse explosions of aluminum nanowires under different energy deposition levels, *Computational Materials Science*, 2019, vol. 170, art. no. 109142, 8 p. DOI: 10.1016/j.commatsci.2019.109142.
18. Eom N., Messing M.E., Johansson J., Deppert K. General trends in core–shell preferences for bimetallic nanoparticles. *ACS Nano*, 2021, vol. 5, issue 5, pp. 8883-8895. DOI: 10.1021/acsnano.1c01500.