УДК 54.055 *Оригинальная статья*

Влияние электрофизических и термодинамических параметров электровзрывного синтеза на кристаллическую структуру и дисперсный состав многокомпонентных наночастиц NiFeCoCrCuAlMoW

К.В. Сулиз, А.В. Пустовалов, М.И. Лернер, А.В. Первиков
ФГБУН «Институт физики прочности и материаловедения им. В.Е. Панина СО РАН»
634055, Россия, Томск, пр. Академический, 2/4
pervikov_a_v@ispms.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.966

Аннотация: На примере сплава *NiFeCoCrCuAlMoW* впервые изучено влияние величины энергии, введенной в проволоки, и теплопроводности буферного газа на средний размер и фазовый состав частиц, формирующихся в *He*, N_2 и *Ar*. Полученные образцы охарактеризованы с использованием рентгенофазового анализа и динамического рассеяния света. Установлено, что при $E_{int}/E_{sub} > 1$ скорость охлаждения наночастиц, определяемая теплопроводностью буферного газа, оказывает существенное влияние на величину среднего размера частиц. Показано, что частицы, полученные в *He* при меньших значениях E_{int}/E_{sub} имеют меньший размер в сравнении с частицами, полученными в N_2 при больших значениях E_{int}/E_{sub}. Полученные образцы характеризуются наличием ГЦК, ОЦК-фаз, соответствующих твердым растворам замещения, а также ОЦК-фазе твердого раствора замещения на основе тугоплавкого металла и интерметаллидам со структурой μ-фазы. Соотношение фазового состава образцов и параметров синтеза выявило неоднозначную зависимость. Полученные результаты не подтвердили прямую зависимость между величиной энергии, введенной в проволоки и содержанием в образцах ОЦК-фазе твердого раствора замещения на основе тугоплавкого металла. На основании полученных данных сделан вывод о протекании нескольких независимых процессов формирования фазового состава электровзрывных многокомпонентных наночастиц.

Ключевые слова: наночастицы, высокоэнтропийный сплав, электрический взрыв проволок, ток, сегрегация, интерметаллид, твердый раствор, шунтирующий разряд.

Сулиз Константин Владимирович – инженер- исследователь лаборатории нанобиоинженерии, ФГБУН «Институт физики прочности и материаловедения им. В.Е. Панина СО РАН»
Пустовалов Алексей Витальевич – к.т.н., научный сотрудник лаборатории физикохимии высокодисперсных материалов, ФГБУН «Институт физики прочности и материаловедения им. В.Е. Панина СО РАН»
Лернер Марат Израилевич – д.т.н., главный научный сотрудник лаборатории физикохимии высокодисперсных материалов, ФГБУН «Институт физики прочности и материаловедения им. В.Е. Панина СО РАН»
Первиков Александр Васильевич – к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории физикохимии высокодисперсных материалов, ФГБУН «Институт физики прочности и материаловедения им. В.Е. Панина СО РАН»

Original paper

Influence of electrophysical and thermodynamic parameters of electroexplosive synthesis on the crystal structure and dispersed composition of multicomponent NiFeCoCrCuAlMoW nanoparticles

K.V. Suliz, A.V. Pustovalov, M.I. Lerner, A.V. Pervikov
Panin Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of RAS, Tomsk, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.966

Abstract: Using *NiFeCoCrCuAlMoW* alloy as example, the effects of the energy input into the wires and the thermal conductivity of the buffer gas on the average size and phase composition of particles forming in *He*, N_2 and *Ar* were studied for the first time. The obtained samples were characterized using X-ray diffraction analysis and dynamic light scattering. It was found that at $E_{int}/E_{sub} > 1$, the cooling rate

© К.В. Сулиз, А.В. Пустовалов, М.И. Лернер, А.В. Первиков, 2026

of the nanoparticles, which is determined by the thermal conductivity of the buffer gas, exerts a significant influence on the average particle size. It was shown that the particles obtained in *He* at lower E_{int}/E_{sub} values exhibit a smaller size compared to the particles obtained in N_2 at higher E_{int}/E_{sub} values. The synthesized samples are characterized by the presence of fcc and bcc phases corresponding to substitutional solid solutions, as well as a bcc phase of a refractory metal-based substitutional solid solution and intermetallic with a μ-phase structure. The relationship between the phase composition of the samples, and the synthesis parameters revealed an ambiguous dependence. The obtained results did not confirm a direct dependence between the energy input into the wires and the content of the refractory metal-based bcc substitutional solid solution phase in the samples. On the basis of the findings, we have concluded that several independent processes occur during the formation of the phase composition of multicomponent nanoparticles obtained by the electrical explosion of wires.
Keywords: Nanoparticles, high-entropy alloy, electrical explosion of wires, current, segregation, intermetallic compound, solid solution, shunting discharge.

Konstantin V. Suliz – Junior Researcher, Laboratory of Nanobioengineering, Panin Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of RAS, ORCID: 0000-0001-5556-2113
Alexey V. Pustovalov – Researcher, Laboratory of Physical Chemistry of Ultrafine Materials, Panin Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of RAS, ORCID: 0000-0002-5183-2603
Marat I. Lerner – Dr. Sc., Principal Researcher, Laboratory of Physical Chemistry of Ultrafine Materials, Panin Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of RAS, ORCID: 0000-0001-8565-1344
Alexander V. Pervikov – Ph. D., Senior Researcher, Laboratory of Physical Chemistry of Ultrafine Materials, Panin Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of RAS, ORCID: 0000-0001-7593-0710

Поступила в редакцию/received: 01.09.2026; после рецензирования/revised: 30.09.2026; принята/accepted: 02.10.2026.

1. Введение

Совместный электрический взрыв проволок различных металлов/сплавов является эффективным способом получения порошков на основе наночастиц многокомпонентных сплавов и оксидов [1-8]. Это обусловлено высокой скоростью охлаждения наночастиц, позволяющей предотвратить сегрегацию металлов с существенно различающимися термодинамическими параметрами [1]. Возможность получения наночастиц с заданным соотношением металлов определяется энергетическими параметрами взрыва проволок заданных диаметров [7]. Введение в проволоки энергий, превышающих энергию сублимации металла, позволяет получить относительно однородное фазовое состояние продуктов взрыва проволок, что обеспечивает получение наночастиц с заданным соотношением металлов [9]. Величина энергии, введенной в проволоку за счет Джоулева нагрева, зависит от удельного электрического сопротивления и электрофизических параметров металлов [10]. В работах [2, 3] на примере составов $CoMoFeNiCu$, $NiFeCoCrCuAlMo$, $NiFeCoCrCuAlMoW$ показано, что полученные образцы содержат не только фазы, соответствующие твердым растворам замещения, характерным для многокомпонентных сплавов, но и фазы, соответствующие твердым растворам на основе тугоплавких металлов и интерметаллидам со структурой типа μ-фазы. Было отмечено, что возможной причиной присутствия фаз твердых растворов на основе тугоплавких металлов является неоднородность фазового состояния продуктов взрыва.

Неоднородность выражается в присутствии в расширяющихся продуктах взрыва проволок микронных и субмикронных частиц тугоплавких металлов. Присутствие таких частиц обусловлено более низким значением энергии, вводимой в проволоки тугоплавких металлов. Низкие значения энергии обусловлены формированием шунтирующего разряда вдоль поверхности проволок указанных металлов, что приводит к уменьшению энергии, передаваемой в объем металла проволоки [9,10].

Целью данной работы являлось определение влияние энергетических параметров взрыва проволок и термодинамических параметров буферного газа на фазовый состав формирующихся наночастиц на примере сплава $NiFeCoCrCuAlMoW$.

2. Экспериментальная часть

Для получения образцов наночастиц сплава $NiFeCoCrCuAlMoW$ использовались: нихромовая проволока (марка Х15Н60) диаметром 0,20 мм, проволока сплава 29НК диаметром 0,20 мм, алюминиевая проволока (марка А5) диаметром 0,16 мм, медная проволока (марка М1) диаметром 0,1 мм, молибденовая проволока (марка МЧ) диаметром 0,1 мм и вольфрамовая проволока (марка ВА) диаметром 0,1 мм, никелевая проволока (марка НП2) диаметром 0,1 мм. Выбор проволок с указанными диаметрами позволил обеспечить соотношение металлов в продуктах взрыва, составляющее $Ni_{34}Fe_{24}Co_5Cr_5Cu_7Al_{14}Mo_6W_5$ ат.% (ΔS_{mix} = 14,9 кДж/моль). Параметры получения образцов приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Параметры ЭВП для получения порошка на основе смеси микро- и наночастиц (l – длина проволоки, C – электрическая емкость накопителя энергии, U_0 – зарядное напряжение накопителя энергии, E_{st} – величина энергии, запасаемой емкостным накопителем, P – давление буферного газа).

Состав	Тип газа	E_{st}, Дж	C, мкФ	U, кВ	l, мм	P, МПа
$Ni_{34}Fe_{24}Co_5Cr_5Cu_7Al_{14}Mo_6W_5$	Ar	1153	2,4	31,0	60; 70; 80	0,3
	He					
	N_2					

Суммарная энергия сублимации скрученных проволок ΣE_{sub} рассчитывалась с использованием справочных данных [11]. Величина энергии, вводимой в проволоки E_{int}, рассчитывалась по данным временной зависимости тока по методике, приведенной в работе [12]. Расчет параметра E_{int} осуществлялся до момента времени, соответствующего зажиганию шунтирующего разряда.

Временные зависимости тока регистрировались с использованием электронного осциллографа Tektronix 2024b. Изменение вводимой в

проволоки энергии достигалось за счет увеличения длины проволок. Термодинамические параметры буферного газа варьировались за счет изменения теплопроводности газа, определяемой химической природой. Кристаллическая структура частиц определялась по данным рентгенофазового анализа (РФА), распределение частиц по размерам строилось с использованием данных, полученных на дисковой центрифуге CPS DC 24000. Определение объемного содержания фаз в образце проводилось на основании данных полнопрофильного анализа данных РФА по методу Ритвелда [13].

3. Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведены временные зависимости тока и вводимой в проволоки энергии, характерные для совместного электрического взрыва проволок в различных буферных газах. Анализ зависимостей показывает, что для всех режимов характерно формирование шунтирующего разряда вдоль поверхности расширяющихся продуктов взрыва. Зажигание шунтирующего разряда происходит в момент времени, соответствующий первому локальному минимуму на кривой тока. В атмосфере *He* при длине 60 и 70 мм наблюдается увеличение амплитуды тока, что обусловлено меньшей длиной взрываемой проволоки в сравнении длиной проволок, взрываемых в атмосфере других газов. Поскольку *He* обладает электрической прочностью, меньшей прочности аргона и азота [11], это приводит к более раннему пробою в промежутке «проволока – высоковольтный электрод». Более ранний пробой при постоянной скорости подачи проволок приводит к уменьшению длины взрываемой проволоки в сравнении с заданным значением (см. Таблицу 1). Уменьшение длины приводит к уменьшению омического сопротивления, что позволяет объяснить увеличение амплитудного значения тока. Увеличение электрической прочности буферного газа приводит к более позднему зажиганию шунтирующего разряда. Это позволяет увеличить величину

На рис. 2 приведена зависимость среднего размера частиц от величины E_{int} в различных буферных газах. Из представленных данных следует, что, несмотря на более низкие значения E_{int}, средний размер частиц в *He* меньше. Увеличение E_{int} за счет увеличения электрической прочности буферного газа приводит к увеличению среднего размера наночастиц, что противоречит установленным ранее зависимостям среднего размера частиц металлов от величины E_{int} [10].

По нашему мнению, наблюдаемое уменьшение среднего размера наночастиц при меньших значениях введенной энергии обусловлено более высокой теплопроводностью *He*, в сравнении Ar и N_2.

Увеличение теплопроводности приводит к более интенсивному

охлаждению наночастиц, что уменьшает длительность процесса укрупнения частиц за счет коагуляции.

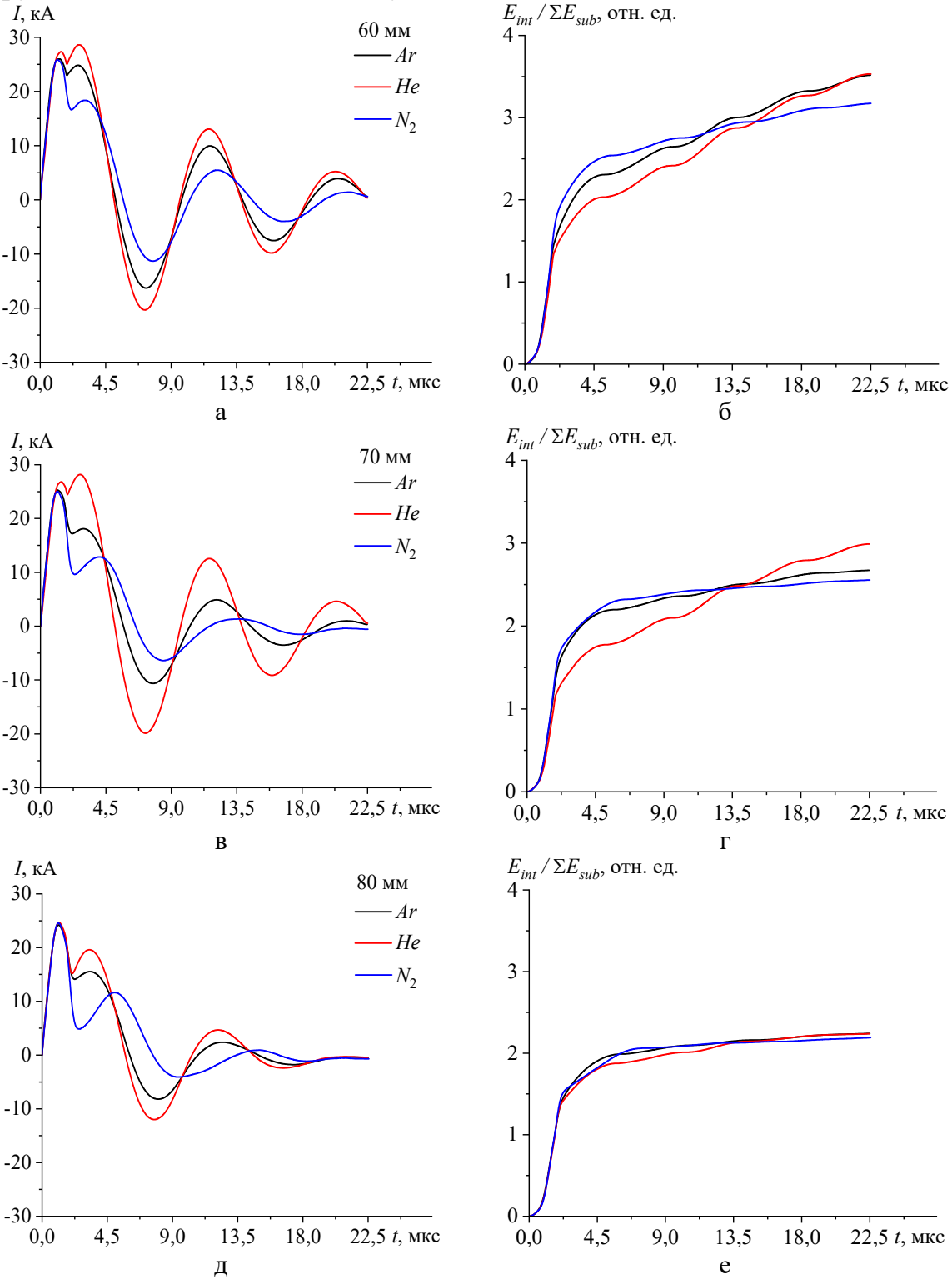

Рис. 1. Временные зависимости тока (панели а, в, д) и вводимой энергии (панели б, г, е) образцов состава *NiFeCoCrCuAlMoW* .

Так, в работе [14] на примере наночастиц алюминия показано, что использования *He* в качестве буферного приводит к уменьшению среднего

размера частиц при прочих равных параметрах синтеза.

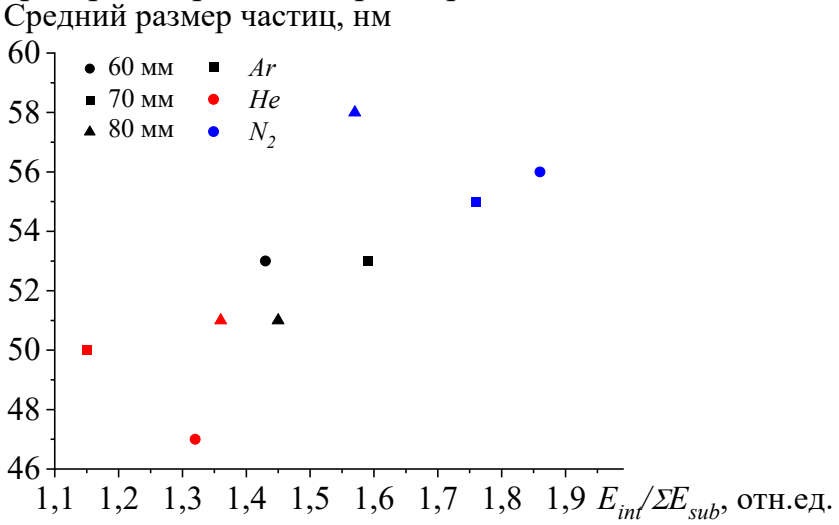

Рис. 2. Зависимость среднего размера частиц от введенной энергии к моменту зажигания дуги.

Результаты указанной работы и полученные нами данные позволяют сделать вывод, что скорость охлаждения наночастиц имеет существенное влияние на величину среднего размера частиц, сопоставимое с величиной E_{int} при условии, что $E_{int} / E_{sub} > 1$.

На рис. 3 приведены данные РФА образцов. Как показано, для всех образцов характерно наличие 4 фаз, соответствующих твердым растворам замещения на основе ГЦК- и ОЦК решеток, твердому раствору с ОЦК-решеткой тугоплавких металлов и μ-фазы. В Таблице 2 приведено объемное соотношение фаз в образцах. Образцы разбиты в соответствии с буферным газом и расположены в порядке возрастания E_{int} / E_{sub}.

Анализ табличных данных позволяет выделить следующие зависимости. Для образцов, полученных в атмосфере He, содержание μ-фазы оказывается минимальным. При этом, содержание указанной фазы увеличивается с ростом E_{int} / E_{sub} для образцов, полученных в Ar и уменьшается для образцов, полученных в N_2. Содержание ОЦК-фазы, соответствующей твердым растворам на основе тугоплавких металлов, имеет сложный характер. Для образцов, полученных в He характерно уменьшение содержания указанной фазы с увеличением E_{int} / E_{sub}. Аналогичная тенденция наблюдается для образцов, полученных в N_2. Не наблюдается явной зависимости для образцов, полученных в Ar. Для каждой серии экспериментов наблюдается максимальное содержание ОЦК-фаз в образцах, полученных в атмосфере N_2.

Наблюдаемые изменения соотношения фаз указывают на более сложный механизм формирования в образцах $NiFeCoCrCuAlMoW$ ОЦК-фазы,

характерной для твердых растворов замещения на основе тугоплавких металлов. Выше было отмечено, что присутствие указанной фазы в образцах обусловлено присутствием в продуктах взрыва микронных и субмикронных частиц тугоплавких металлов при недостаточной величине E_{int} / E_{sub}. В соответствии с данным предположением, увеличение E_{int} / E_{sub} должно сопровождаться уменьшением содержания в образцах ОЦК-фазы на основе тугоплавких металлов.

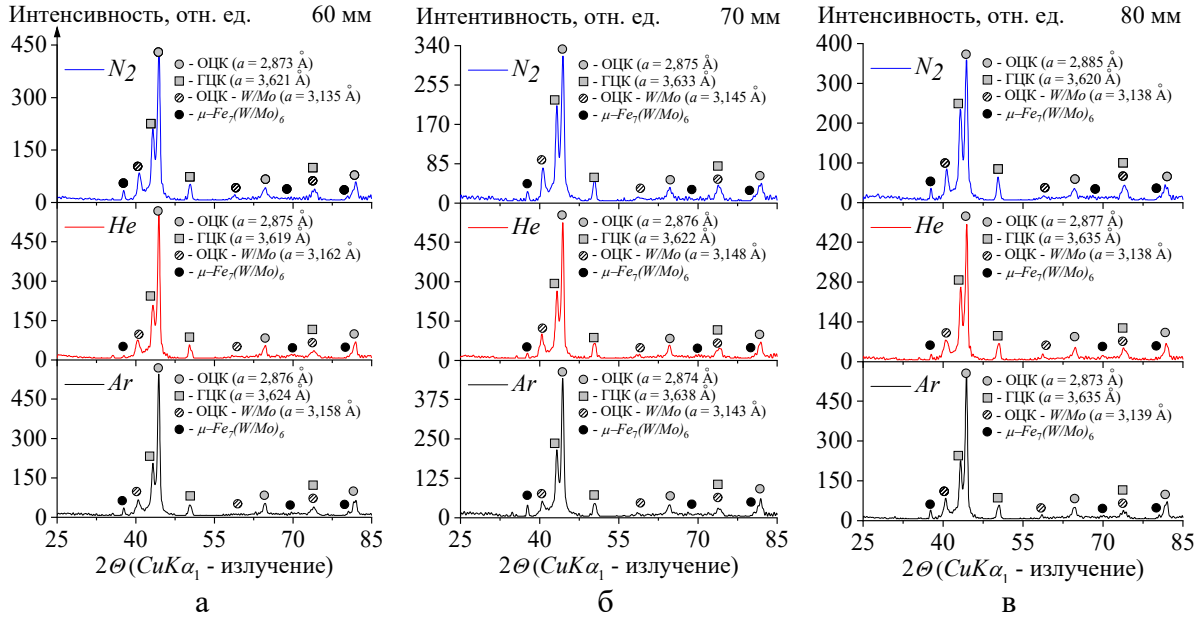

Рис. 3. Данные рентгенофазового анализа частиц состава $NiFeCoCrCuAlMoW$.

Приведенные в Таблице 2 данные это частично опровергают. Как было отмечено выше, использование N_2 позволяет увеличить E_{int} / E_{sub}, что приводит к уменьшению содержания микронных частиц в продуктах взрыва проволок. Однако в образцах, полученных в N_2, содержание ОЦК-фазы на основе тугоплавких металлов является максимальным. Данное несоответствие указывает на возможную реализацию иных механизмов фазообразования в условиях проведенных экспериментов. Одним из таких механизмов может являться распад высокотемпературной фазы по аналогии с распадом σ-фазы на ОЦК- и μ-фазу в бинарной системе Fe-Mo [15]. При электровзрывном синтезе все формирующиеся частицы переходят через жидкую фазу. Так, использование He позволяет увеличить скорость охлаждения частиц и стабилизировать метастабильные состояния на основе высокотемпературных фаз, тогда как использование N_2 и Ar способствует уменьшению скорости охлаждения наночастиц и выделению дополнительных фаз в результате распада высокотемпературных (метастабильных) состояний.

Вероятная реализация распада метастабильных состояний в сплаве

NiFeCoCrCuAlMoW в соответствии с реакцией $\sigma \rightarrow Mo/W + \mu$ позволяет объяснить наблюдаемые тенденции в зависимости фазового состава образцов от энергетических и термодинамических параметров синтеза. Подтверждение реализации данного типа фазовых превращений требует проведения отдельных дополнительных исследований.

Таблица 2. Содержание фаз в образцах *NiFeCoCrCuAlMoW* .

Фазовый состав, %	Образцы								
	He 70 мм	*He* 60 мм	*He* 80 мм	*Ar* 60 мм	*Ar* 80 мм	*Ar* 70 мм	N_2 80 мм	N_2 70 мм	N_2 60 мм
ГЦК	58,6	65,6	57,4	63,3	60,9	59,3	50,0	49,2	59,0
ОЦК	28,6	23,9	30,7	25,2	24,5	28,1	32,7	33,9	26,9
ОЦК (W / Mo)	10,4	8,7%	8,8%	7,5	9,9	7,4	12,2	12,6	10,4
$\mu - Fe_7(W/Mo)_6$	2,4	1,8	3,0	4,0	4,7	5,2	5,1	4,3	3,7

4. Заключение

Результаты проведенных исследований показывают, что кристаллическая структура и средний размер наночастиц многокомпонентных сплавов, получаемых совместным электрическим взрывом проволок, определяются комплексом параметров, включающим энергетические параметры взрыва и термодинамические параметры буферного газа. Использование *He* позволяет увеличить скорость охлаждения наночастиц. При выполнении условия $E_{int} / E_{sub} > 1$ скорость охлаждения наночастиц, определяемая теплопроводностью буферного газа, имеет существенное влияние на величину среднего размера наночастиц. При использовании *He* необходимо учитывать более раннее в сравнении с другими инертными газами формирование шунтирующего разряда, ограничивающего введение необходимого количества энергии в проволоки. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что наиболее однородный фазовый состав образцов наночастиц многокомпонентных сплавов, содержащих в том числе тугоплавкие металлы, может быть достигнут при сочетании высоких значений вводимых в проволоки энергий и скоростей охлаждения наночастиц. Сочетание указанных параметров может быть достигнуто при использовании в качестве буферного газа водорода, либо смеси газов гелий + азот.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН (тема FWRW-2026-0004).

Библиографический список:

1. **Liu, S.** Non-equilibrium synthesis methods to create metastable and high-entropy nanomaterials / S. Liu, C. Dun, J.J. Urban, M.T. Swihart // Advanced Science. – 2026. – V. 13. – I. 11. – Art. № e21953. – 37 p. DOI: 10.1002/advs.202521953

2. **Сулиз, К.В.** Структурно-фазовые состояния наночастиц CoMoFeNiCu, полученных совместным электрическим взрывом проволочек / К.В. Сулиз, Н.Ю. Сдобняков, А.В. Первиков // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2023. – Вып. 15. – С. 861-868. DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.861.
3. **Сулиз, К.В.** Кристаллическая структура и дисперсный состав наночастиц многокомпонентных NiFeCoCrCuAlMo, NiFeCoCrCuAlMoW сплавов, полученных совместным электрическим взрывом проволок / К.В. Сулиз, А.В. Первиков // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2025. – Вып. 17. – С. 211-220. DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.211.
4. **Liang, L.** Synthesis of fcc structure $Fe_{10}Co_{25}Ni_{34}Cu_{23}Al_8$ high-entropy-alloy nanoparticles by electrical wire explosion: for electromagnetic wave absorption / L. Liang, J. Wu, Z. Yin et al. // Applied Physics Letters. – 2024. – V. 124. – I. 5. – Art. № 053502. – 5 p. DOI: 10.1063/5.0187760.
5. **Liang, L.** Synergistic dynamic phase transformation during wire electro-explosion enables high-entropy alloys nanoparticles with efficient electromagnetic absorption / L. Liang, J. Wu, X. Li et al. // ACS Applied Materials & Interfaces. Interfaces. – 2026. – V. 18. – I. 36. – P. 49624-49639. DOI: 10.1021/acsami.6c08448.
6. **Сулиз, К.В.** Кристаллическая структура и дисперсный состав наночастиц многокомпонентного $(NiFeCoCuZn)_xO_y$ оксида, полученных совместным электрическим взрывом проволок / К.В. Сулиз, В.В. Шмаков, А.В. Первиков, Н.Ю. Сдобняков // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2025. – Вып. 17. – С. 203-210. DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.203
7. **Сулиз, К.В.** Кристаллическая структура и дисперсный состав наночастиц многокомпонентного $(NiCoCrFeAl)_xO_y$ оксида, полученных совместным электрическим взрывом проволочек / К.В. Сулиз, А.В. Пустовалов, А.В. Первиков // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2025. – Вып. 17. – С. 916-927. DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.
8. **Liu, S.** Synthesis of high-entropy oxide nanopowders with different crystal structures by electrical explosion of wires / S. Liu, K. Liu, L. Qi, L. Yang // Nanomaterials. – 2025. – V. 15. – I. 8. – Art. № 571. – 17 p. DOI: 10.3390/nano15080571.
9. **Romanova, V.M.** Electric explosion of fine wires: three groups of materials / V.M. Romanova, G.V. Ivanenkov, A.R. Mingaleev et al // Plasma Physics Reports. – 2015. – V. 41. – I. 8. – P. 617-636. DOI: 10.1134/S1063780X15080085.
10. **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.
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. **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.
13. **Kraus, W.** POWDER CELL–a program for the representation and manipulation of crystal structures and calculation of the resulting X-ray powder patterns / W. Kraus, G. Nolze // Journal of Applied Crystallography. – 1996. – V. 29. – I. 3. – P. 301-303. DOI: 10.1107/S0021889895014920.
14. **Bai, J.** Electrical explosion of aluminum wire for preparation of nanoparticles: an experimental study / J. Bai, Z. Shi, C. Huang et al. // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2019. – V. 52. – I. 42.– Art. № 425201. – 10 p. DOI: 10.1088/1361-6463/ab3362.
15. **Guillermet, A.F.** The Fe−Mo (iron−molybdenum) system / A.F. Guillermet // Bulletin of Alloy Phase Diagrams. – 1982. – V. 3. – I. 3. – P. 359-367. DOI: 10.1007/BF02869315.

References:

1. Liu S., Dun C., Urban J.J., Swihart M.T. Non-equilibrium synthesis methods to create metastable and high-entropy nanomaterials, *Advanced Science*, 2026, vol. 13, issue 11, art. no e21953, 37 p. DOI: 10.1002/advs.202521953.
2. Suliz K.V., Sdobnyakov N.Yu., Pervikov A.V. Strukturno-fazovye sostoyaniya nanochastits CoMoFeNiCu, poluchennykh sovmestnym elektricheskim vzryvom provolochek [Structural-phase states of the multicomponent alloy nanoparticles CoMoFeNiCu produce by of joint exploding wires], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2023, issue 15, pp. 861-868. DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.861.
3. Suliz K.V., Pervikov A.V. Kristallicheskaya struktura i dispersnyj sostav nanochastits mnogokomponentnykh NiFeCoCrCuAlMo, NiFeCoCrCuAlMoW splavov, poluchennykh sovmestnym elektricheskim vzryvom provolok [Crystal structure and dispersed composition of multicomponent NiFeCoCrCuAlMo and NiFeCoCrCuAlMoW

alloy nanoparticles obtained by joint exploding wires], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2025, issue 17, pp. 211-220. DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.211.
4. Liang L., Wu J., Yin Z. et al. Synthesis of fcc structure $Fe_{10}Co_{25}Ni_{34}Cu_{23}Al_8$ high-entropy-alloy nanoparticles by electrical wire explosion: for electromagnetic wave absorption, *Applied Physics Letters*, 2024, vol. 124, issue 5, art. no. 053502, 5 p. DOI: 10.1063/5.0187760.
5. Liang L., Wu J., Li X., et al. Synergistic dynamic phase transformation during wire electro-explosion enables high-entropy alloys nanoparticles with efficient electromagnetic absorption, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2026, vol. 18, issue 36, pp. 49624-49639. DOI: 10.1021/acsami.6c08448.
6. Suliz K.V., Shmakov V.V., Pervikov A.V., Sdobnyakov N.Yu. Kristallicheskaya struktura i dispersnyy sostav nanochastits mnogokomponentnogo $(NiFeCoCuZn)_xO_y$ oksida, poluchennykh sovmestnym elektricheskim vzryvom provolok[Crystal structure and dispersed composition of multicomponent $(NiFeCoCuZn)_XO_Y$ oxide nanoparticles obtained by joint exploding wires], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2025, issue 17, pp. 203-210. DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.203. (In Russian).
7. Suliz K.V., Pustovalov A.V., Pervikov A.V. Kristallicheskaya struktura i dispersnyy sostav nanochastits mnogokomponentnogo (NiCoCrFeAl)xOy oksida, poluchennykh sovmestnym elektricheskim vzryvom provolochek [Crystal structure and dispersed composition of multicomponent oxide (NiCoCrFeAl)xOy nanoparticles obtained via joint exploding wires], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2025, issue 17, pp. 916-927. DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.916. (In Russian).
8. Liu S., Liu K., Qi L. et al. Synthesis of high-entropy oxide nanopowders with different crystal structures by electrical explosion of wires, *Nanomaterials,* 2025, vol. 15, issue 8, art. no. 571, 17 p. DOI: 10.3390/nano15080571.
9. Romanova V.M., Ivanenkov G.V., Mingaleev A.R. et al. Electric explosion of fine wires: three groups of materials, *Plasma Physics Reports*, 2015, vol. 41, issue 8, pp. 617-636. DOI: 10.1134/S1063780X15080085.
10. 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.
11. Haynes W.M. *CRC handbook of chemistry and physics*, 95th ed. Boca Raton, CRC Press, 2014, 2704 p. DOI: 10.1201/b17118.
12. 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.
13. Kraus W., Nolze G. POWDER CELL–a program for the representation and manipulation of crystal structures and calculation of the resulting X-ray powder patterns, *Journal of Applied Crystallography*, 1996, vol. 29, issue 3, pp. 301-303. DOI: 10.1107/S0021889895014920.
14. Bai J., Shi Z., Huang C., et al. Electrical explosion of aluminum wire for preparation of nanoparticles: an experimental study, *Journal of Physics D: Applied Physics,* 2019, vol. 52, issue 42, art. no. 425201, 10 p. DOI: DOI: 10.1088/1361-6463/ab3362.
15. Guillermet, A.F. The Fe−Mo (iron−molybdenum) system, *Bulletin of Alloy Phase Diagrams*, 1982, vol. 3, issue 3, pp. 359-367. DOI: 10.1007/BF02869315.