УДК 54.055 *Оригинальная статья*

Синтез и термическая стабильность наночастиц высокоэнтропийного оксида $(CuZnNiCoFeCrAl)_xO_y$, полученных совместным электрическим взрывом проволок

А.В. Первиков, А.И. Сагун, Е.Е. Рюмин, К.В. Сулиз, М.И. Лернер
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет»
634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 36
pervikov@list.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.751

Аннотация: Впервые одностадийным методом, основанным на совместном электрическом взрыве проволок различных металлов/сплавов в кислородсодержащей атмосфере, получен порошок на основе наночастиц высокоэнтропийного оксида. Методами просвечивающей электронной микроскопии и рентгенофазового анализа определены дисперсный состав частиц и кристаллическая структура. Показано, что размеры частиц варьируются от 10 нм до 3 мкм. Частицы имеют сферическую форму с относительно однородным распределением металлов по объему. Кристаллическая структура частиц представлена фазами шпинели и каменной соли. Изучена термическая стабильность порошка. Установлено, что спекание при 800°C приводит к появлению слабых рефлексов фазы *CuO*. Увеличение температуры спекания до 1000°C приводит к увеличению размеров зерна до 2-5 мкм и формированию отдельных зерен, обогащенных медью. Синтезированный порошок использован для приготовления полимерных гранул для экструзионной печати керамических изделий на основе высокоэнтропийных оксидов. Полученные гранулы использованы для печати блочной структуры с гироидальными каналами. Результаты исследования показывают, что совместный электрический взрыв проволок разных металлов/сплавов позволяет получать частицы с контролируемой структурой и элементным составом. Управление структурой, элементным составом частиц, сегрегацией металлов на стадии синтеза частиц и сегрегацией металлов на стадии спекания частиц в объеме детали, полученной экструзионной печатью, открывает новые возможности для разработки керамических изделий с новыми или улучшенными функциональными свойствами.

Ключевые слова: наночастицы, высокоэнтропийный оксид, оксид алюминия, термическая стабильность, сегрегация, электрический взрыв проволок, ток, шпинель, каменная соль, гироидная структура

Первиков Александр Васильевич – к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории нанотехнологий металлургии физико-технического факультета ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет»
Сагун Антон Игоревич – инженер-исследователь лаборатории нанотехнологий металлургии физико-технического факультета ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет»
Рюмин Егор Евгеньевич – инженер лаборатории нанотехнологий металлургии физико-технического факультета ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет»
Сулиз Константин Владимирович – инженер-исследователь лаборатории нанотехнологий металлургии физико-технического факультета ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет»
Лернер Марат Израилевич – д.т.н., главный научный сотрудник лаборатории нанотехнологий металлургии физико-технического факультета ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет»

© А.В. Первиков, А.И. Сагун, Е.Е. Рюмин, К.В. Сулиз, М.И. Лернер, 2026

Original paper

Synthesis and thermal stability of high-entropy oxide $(CuZnNiCoFeCrAl)_xO_y$ nanoparticles obtained by joint exploding wires

A.V. Pervikov, A.I. Sagun, E.E. Ryumin, K.V. Suliz, M.I. Lerner
National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.751

Abstract: For the first time, a high-entropy oxide nanoparticle-based powder was synthesized via a single-step method based on the co-electrical explosion of various metal/alloy wires in an oxygen-containing atmosphere. The particle size distribution and crystal structure were characterized using transmission electron microscopy and X-ray diffraction analysis. It was shown that particle sizes varied from 10 nm to 3 μm. The particles exhibited a spherical morphology with a relatively uniform distribution of metals throughout their volume. Their crystal structure was represented by spinel and rock-salt phases. Thermal stability of the powder was also investigated. Sintering at 800°C was found to lead to the emergence of weak reflections of the *CuO* phase. Increasing the sintering temperature to 1000°C resulted in grain growth up to 2-5 μm and the formation of distinct copper-enriched grains. The synthesized powder was used to prepare polymer pellets for the extrusion-based 3D printing of high-entropy oxide ceramic products. The obtained pellets were applied to print a block structure with gyroidal channels. The results of this study demonstrate that co-electrical explosion of wires made of different metals/alloys enables the production of particles with a controlled structure and elemental composition. Tailoring the structure, elemental composition, and metal segregation both during particle synthesis and during sintering of the extrusion-printed part opens new avenues for developing ceramic products with novel or enhanced functional properties.

Keywords: nanoparticles, high-entropy oxide, aluminum oxide, thermal stability, segregation, electrical explosion of wires, current, spinel, rock-salt, gyroid structure.

Alexander V. Pervikov – Ph. D., Senior Researcher, Laboratory of metallurgy nanotechnology, Faculty of physics and technology, National Research Tomsk State University, ORCID: 0000-0001-7593-0710
Anton I. Sagun – Research Engineer, laboratory of metallurgy nanotechnology, Faculty of physics and technology, National Research Tomsk State University, ORCID: 0009-0001-9537-4878
Egor E. Ryumin – Engineer, Laboratory of metallurgy nanotechnology, Faculty of physics and technology, National Research Tomsk State University, ORCID: 0009-0005-2303-9519
Konstantin V. Suliz – Research Engineer, Laboratory of metallurgy nanotechnology, Faculty of physics and technology, National Research Tomsk State University, ORCID: 0000-0001-5556-2113
Marat I. Lerner – Dr. Sc., Principal Researcher, Laboratory of metallurgy nanotechnology, Faculty of physics and technology, National Research Tomsk State University, ORCID: 0000-0001-8565-1344

Поступила в редакцию/received: 01.09.2026; после рецензирования/revised: 21.09.2026; принята/accepted: 25.09.2026.

1. Введение

Использование экструзионной печати позволяет существенно расширить функциональные свойства и области применения алюминиевой керамики [1-3]. Более широкие возможности получения деталей сложной формы с необходимыми функциональными свойствами из керамических материалов методом экструзионной печати могут быть достигнуты за счет использования порошков высокоэнтропийных оксидов [4]. Показано, что электрическим взрывом проволок могут быть получены порошки Al_2O_3 для экструзионной печати [5]. Использование совместного электрического взрыва проволок разных металлов позволяет получать порошки многокомпонентных (в том числе высокоэнтропийных) оксидов с заданным элементным составом и кристаллической структурой [6-9]. Изготовление полимерных гранул на основе данных частиц и

последующая экструзионная печать изделий с использованием данных гранул, открывают новые возможности получения керамических материалов с необходимыми функциональными свойствами. Необходимо отметить, что формирование частиц в условиях совместного электрического взрыва проволок протекает в неравновесных условиях. Это указывает на необходимость определения термической стабильности кристаллической структуры формирующихся частиц.

Целью данной работы являлось получение порошков на основе микро- и наночастиц высокоэнтропийного оксида с использованием совместного электрического взрыва проволок различных металлов/сплавов и определение термической стабильности кристаллической структуры.

2. Экспериментальная часть

В качестве объекта исследования выбран состав $(CuZnNiCoFeCrAl)_x O_y$. Как известно, двух и трехвалентные металлы в зависимости от их соотношения в кристаллической решетке и содержания кислорода могут формировать два типа кристаллических структур, а именно решетки по типу каменной соли (Fm3m) и шпинели (Fd3m) [10]. Таким образом, выбор указанного состава позволяет установить связь между соотношением металлов в продуктах взрыва проволок и кристаллической структурой формирующихся частиц.

Для получения образца $(CuZnNiCoFeCrAl)_x O_y$ использовались: алюминиевая проволока (марка А5) диаметром 0,25 мм, латунная проволока (марка Л63) диаметром 0,14 мм, нихромовая проволока (марка Х15Н60) диаметром 0,20 мм, проволока сплава 29НК диаметром 0,20 мм. Выбор проволок с указанными диаметрами позволил обеспечить соотношение металлов в продуктах взрыва, составляющее $(Cu_8Zn_4Ni_{25}Co_5Fe_{23}Cr_5Al_{30})_x O_y$ ат.% (ΔS_{mix} = 13,9 кДж/моль). Параметры получения образца приведены в Таблице 1. Параметры синтеза выбирались на основании данных работы [5].

Таблица 1. Параметры ЭВП для получения порошка на основе смеси микро- и наночастиц $(CuZnNiCoFeCrAl)_x O_y$ (l – длина проволоки, C – электрическая емкость накопителя энергии, U_0 – зарядное напряжение накопителя энергии, P – давление буферного газа).

Образец	l, мм	C, мкФ	U_0, кВ	$P(Ar + 20\% O_2)$, МПа
$(Cu_8Zn_4Ni_{25}Co_5Fe_{23}Cr_5Al_{30})_x O_y$	75	2,57	25,4	0,4

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].

Структурные характеристики частиц определялись по данным растровой электронной микроскопии (РЭМ) и рентгенофазового анализа (РФА).

Спекание порошка, с целью определения термической стабильности, проводилось на воздухе при скорости нагрева 1°С/мин до температур 800°С и 1000°С с последующей выдержкой при данных температурах в течение 2 часов.

Полученный порошок использовали для приготовления гранул для экструзионной печати. В качестве полимерного связующего использовался состав MC2162 (Emery Oleochemicals, Германия). MC2162 представляет собой смесь полиэстера и полиамида с заданным массовым соотношением. Содержание порошка составляло 50 об.%. Печать блочной структуры с гироидальными каналами проводилась при температуре 130°С, толщине слоя печати 0,3 мм и скорости печати 40 мм/с.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведены временные зависимости тока (см. рис. 1 а) и вводимой в проволоки энергии (см. рис. 1 б).

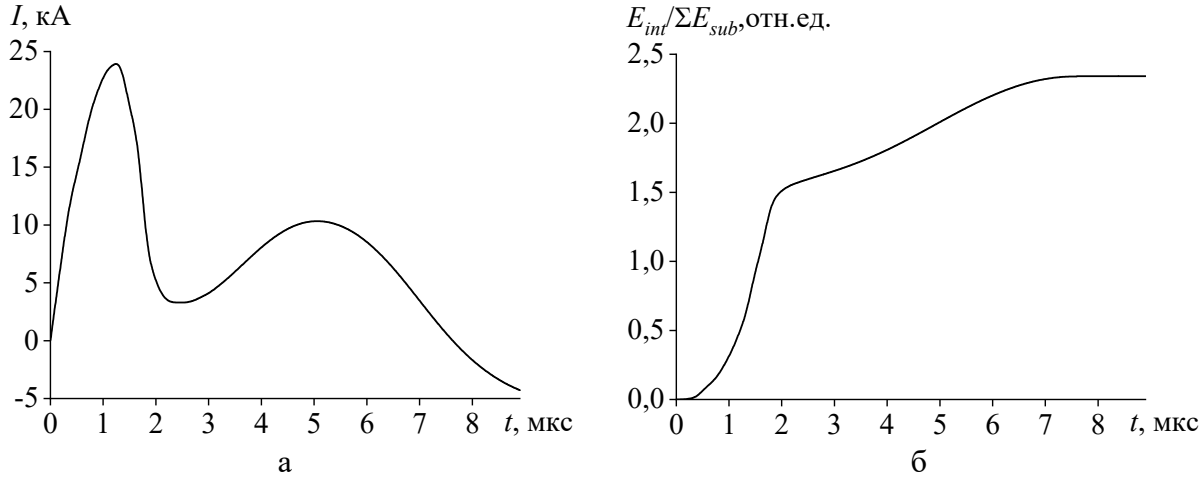
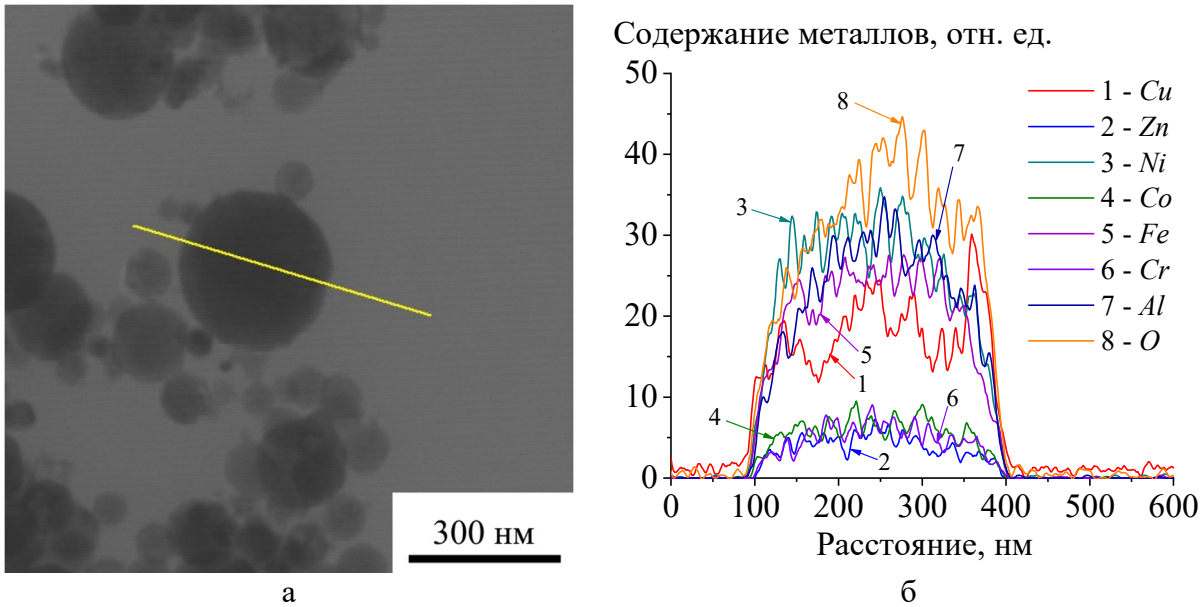


Рис. 1. Временные зависимости тока (а) и вводимой энергии (б) образца состава $\left(CuZnNiCoFeCrAl\right)_x O_y$.

Из данных рис. 1 а следует, что в условиях проведенного эксперимента реализуется режим совместного электрического взрыва проволок с шунтирующей стадией разряда. На формирование шунтирующего разряда указывает локальный минимум на кривой тока при $t \approx 2{,}5$ мкс. К данному моменту времени в проволоку вводится энергия порядка $1{,}7 \cdot \Sigma E_{sub}$. Данное значение согласуется с энергетическими параметрами взрыва алюминиевых проволок, приведенными в работе [5].

Поскольку шунтирующий разряд локализуется вне объема расширяющихся продуктов взрыва, энергия, выделяемая при шунтирующем разряде, не оказывает существенного влияния на фазовое состояние расширяющихся продуктов взрыва и кинетику формирования многокомпонентных наночастиц. На рис. 2 приведены микрофотография наночастиц (см. рис. 2 а) и данные энергодисперсионного (ЭДС) анализа, характеризующие распределение металлов по объему отдельной частицы (см. рис. 2 б). Показано, что распределение большинства металлов в объеме частицы является относительно однородным, за исключением меди.



а б

Рис. 2. Микрофотография (а) и распределение элементов в частице (б) образца состава $(CuZnNiCoFeCrAl)_x O_y$.

Для меди наблюдается тенденция, как обогащения поверхностного слоя, так и центральной области частицы. Размер частиц в полученном порошке варьируется от 10 нм до 2-3 мкм, при среднечисленном размере частиц порядка 89 ± 2 нм. Для всех частиц характерна сферическая форма.

Данные РФА показывают, что полученный порошок характеризуется наличием двух кристаллических структур, соответствующих шпинели и каменной соли (см. рис. 3). Преобладающей в образце фазой является шпинель. Для шпинели характерна структурная формула AB_2O_4, где в позиции A находятся, преимущественно, двухвалентные металлы, тогда как в позиции B – атомы трехвалентных металлов. Соотношение атомов указанных металлов в кристаллической ячейке, а также парциальное давление кислорода определяют возможность формирования фазы шпинели и/или каменной соли. Анализ соотношения двух- и трехвалентных металлов в продуктах взрыва проволок с фазовым составом

полученного образца показывает, что соотношение A/B составило 42/58. Данное значение отличается от 0,5. В этой связи, присутствие в полученном образце фазы каменной соли может быть следствием отклонения соотношения двух и трехвалентных металлов от стехиометрии, характерной для однофазной шпинели.

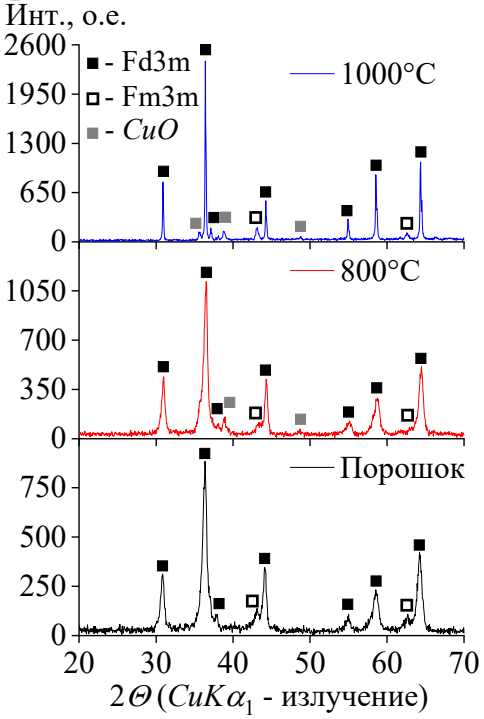
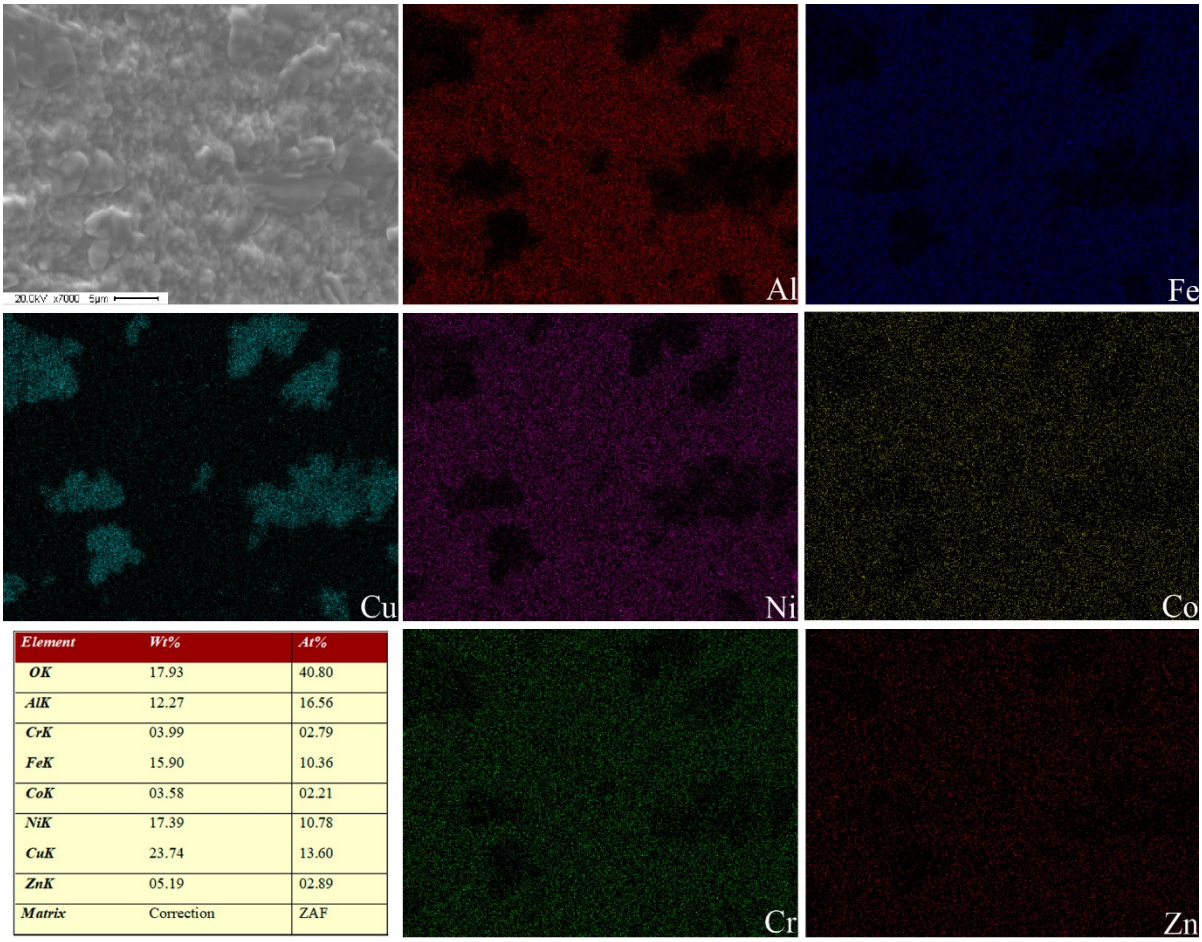


Рис. 3. Данные рентгенофазового анализа образца состава $(CuZnNiCoFeCrAl)_x O_y$.

Спекание порошка на воздухе привело к изменению фазового состава (см. рис. 3). При 800°C наблюдается формирование слабых, уширенных рефлексов, характерных для оксида меди. При этом не происходит уширения рефлексов, соответствующих шпинели, что указывает на низкую активность коалесценции частиц.

Увеличение температуры спекания до 1000°C приводит к существенному изменению структуры образца. Для всех фаз наблюдается уменьшение уширения рефлексов, что указывает на активный рост зерен в интервале температур 800-1000°C. Данные растровой электронной микроскопии показывают, что спекание при 1000°C приводит к увеличению размера зерна до 2-5 мкм (см. рис. 4).

В образце присутствуют отдельные пластинчатые зерна, обогащенные атомами меди. Сегрегация меди в высокоэнтропийных оксидах является системным явлением, обусловленным искажением Яна-Теллера [13]. Степень искажения зависит от элементного и стехиометрического состава высокоэнтропийного оксида и условий термообработки. Изменение указанных параметров позволяет регулировать степень искажения кристаллической решетки оксидной фазы.



Element	Wt%	At%
OK	17.93	40.80
AlK	12.27	16.56
CrK	03.99	02.79
FeK	15.90	10.36
CoK	03.58	02.21
NiK	17.39	10.78
CuK	23.74	13.60
ZnK	05.19	02.89
Matrix	Correction	ZAF

Рис. 4. Данные энергодисперсионного анализа распределения элементов в образце, спеченном при 1000°C. Масштабная линейка – 5 мкм.

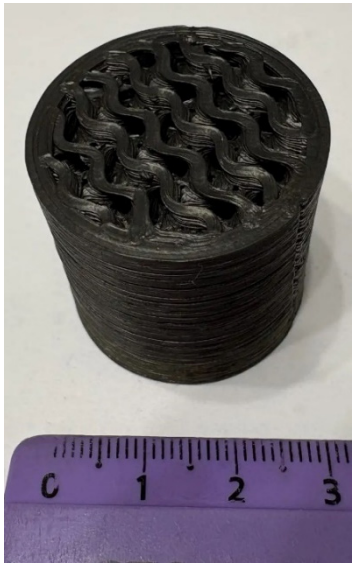


Рис. 5. Внешний вид детали с гироидальными каналами, напечатанной из гранул на основе связующего MC2162 и частиц высокоэнтропийного оксида $\left(Cu_8Zn_4Ni_{25}Co_5Fe_{23}Cr_5Al_{30}\right)_x O_y$ (высота детали – 40 мм, диаметр – 30 мм).

Полученный порошок был использован для приготовления гранул для экструзионной печати. Данным методом сформирована деталь с

гироидальной формой каналов (см. рис. 5). Последующие этапы обработки данной детали, включающие растворную стадию удаления связующего, термическое удаление связующего и спекание будут проводится с учетом термической стабильности состава $\left(Cu_8Zn_4Ni_{25}Co_5Fe_{23}Cr_5Al_{30}\right)_x O_y$.

4. Заключение

Результаты проведенных исследований показывают, что использование совместного электрического взрыва проволок позволяет получить наночастицы высокоэнтропийного оксида с заданным элементным составом и кристаллической структурой. Высокие скорости охлаждения частиц подавляют сегрегацию металлов. На примере состава $\left(Cu_8Zn_4Ni_{25}Co_5Fe_{23}Cr_5Al_{30}\right)_x O_y$ продемонстрирована возможность получения на основе двух- и трехвалентных металлов частиц с кристаллической структурой, близкой к однофазной. Как показано, последующее спекание частиц позволяет произвести формирование дополнительных оксидных фаз, способных расширить функциональные свойства изделия на основе керамики [1]. Формирование дополнительных оксидных фаз может происходить как в результате искажения Яна-Теллера, характерного для меди, так и в результате направленного отклонения стехиометрического состава частиц от составов, характерных для однофазных кристаллических структур каменной соли, шпинели и других оксидных фаз, характерных для высокоэнтропийных оксидов. В указанном случае формирование дополнительных оксидных фаз обусловлено превышением пределов взаимной растворимости, несоответствием типов кристаллических оксидов отдельных металлов, что характерно, к примеру для фаз оксидов никеля, меди и цинка. Использование несоответствия типов кристаллических структур оксидных фаз, направленного отклонения от стехиометрического состава создает условия для направленного управления структурой и функциональными свойствами конечной детали.

Необходимо отметить, что дополнительные возможности управления структурой конечной детали, полученной экструзионной печатью гранулами из электровзрывных порошков, появляются в результате использования частиц с композитной янус-структурой, в которой одно их зерен представлено высокоэнтропийным оксидом, а второе - благородным металлом [14]. Управление структурой детали, основанное на сочетании подходов по формированию дополнительных оксидных фаз и использованию композитных частиц, дает широкие возможности для формирования функциональных свойств.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-79-30006-П, https://rscf.ru/project/21-79-30006/).

Библиографический список:

1. **Hamza, A.** Additive manufacturing of ceramic composite cellular structures by spontaneous infiltration of copper oxide in alumina / A. Hamza, M. Umar Azam, A. Raza, S. Mao, K. Askar, T. Zhang // Journal of Materials Research and Technology. – 2025. – V.34. – P.1539-1548. DOI: 10.1016/j.jmrt.2024.12.152.
2. **Heuer, C.** 3D printing of alumina components via Fused Granulate Fabrication technology and solvent-free debinding of highly filled feedstocks comprising (LD)-polyethylene and cellulose / C. Heuer, B. Bock-Seefeld, P. Kaiser, C. Weigelt, P. Malczyk, N. Brachhold, D. Trimis, C.G. Aneziris // Ceramics International. – 2025. – V.51. – I.28. – P. 58287-58296. DOI: 10.1016/j.ceramint.2025.10.048.
3. **Kerber, F.** Effect of heating rate on powder-bed pre-debinding of thermal-shock-resistant 3D-printed alumina for hydrogen-combustion applications / F. Kerber, P. Malczyk, J. Hubálková, D. V. Thota, K. Markuske, S. Eckart, H. Krause, C. G. Aneziris // Ceramics International. – 2026. – V.52. – I.20. – P. 36093-36103. DOI: 10.1016/j.ceramint.2026.06.117.
4. **Wu, M.** Recent advances in high-entropy oxides: Composition modulation, morphology control, and catalytic applications / M. Wu, L. Liu, Y. Wang, S. Zhang, S. Liu, J. Low, F. Fu, J. Wan // Green Energy & Environment. – 2026. In Press, Corrected Proof. DOI: 10.1016/j.gee.2026.05.001.
5. **Первиков, А.В.** Электровзрывной синтез дисперсных порошков оксида алюминия для экструзионной 3D печати пористых изделий / А.В. Первиков, К.В. Сулиз, А.И. Сагун, и др. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2025. – Вып. 17. – С. 125-134. DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.125
6. **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, A.V. Pustovalov, A.V. Pervikov // Ceramics International. – 2025. – V.51. – I.18. – P. 25632-25643. DOI: 10.1016/j.ceramint.2025.03.245
7. **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
8. **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.
9. **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
10. **Dabrowa, J.** Synthesis and microstructure of the $(Co,Cr,Fe,Mn,Ni)_3O_4$ high entropy oxide characterized by spinel structure / J. Dabrowa, M. Stygar, A. Mikula et al. // Materials Letters. – 2018. – V. 216. – P. 32-36. DOI: 10.1016/j.matlet.2017.12.148
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. **Berardan, D.** Controlled Jahn-Teller distortion in (MgCoNiCuZn)O-based high entropy oxides / D. Berardan, A.K. Meena, S. Franger, C. Herrero, N. Dragoe // Journal of Alloys and Compounds. – 2017. – V.704. – P.693-700. DOI: 10.1016/j.jallcom.2017.02.070
14. **Suliz, K.V.** Characteristic formation of the structure composite nanoparticles high entropy oxide/Ag obtained by joint exploding wires / K.V. Suliz, A.A. Gusarenko, A.V. Pervikov // Powder Technology. – 2026. – V.469. – Art.№ 121951. – 9 p. DOI: 10.1016/j.powtec.2025.121951

References:

1. Hamza A., Umar Azam M., Raza A., et al. Additive manufacturing of ceramic composite cellular structures by spontaneous infiltration of copper oxide in alumina, *Journal of Materials Research and Technology*, *2025*, vol.34, pp.1539-1548. DOI: 10.1016/j.jmrt.2024.12.152.
2. C. Heuer, B. Bock-Seefeld, P. Kaiser et al. 3D printing of alumina components via Fused Granulate Fabrication technology and solvent-free debinding of highly filled feedstocks comprising (LD)-polyethylene and cellulos, *Ceramics International.* 2025, vol..51, issue.28, pp. 58287-58296. DOI: 10.1016/j.ceramint.2025.10.048.

3. Kerber F., Malczyk P., Hubálková J. et al. Effect of heating rate on powder-bed pre-debinding of thermal-shock-resistant 3D-printed alumina for hydrogen-combustion applications, *Ceramics International*, 2026, vol.52.issue.20, pp. 36093-36103. DOI: 10.1016/j.ceramint.2026.06.117.
4. Wu V., Liu L., Wang Y., et al. Recent advances in high-entropy oxides: Composition modulation, morphology control, and catalytic applications, *Green Energy & Environment,* 2026. In Press, Corrected Proof. DOI: 10.1016/j.gee.2026.05.001.
5. Pervikov A.V., Suliz K.V., Sagun A.I., et al. Elektrovzryvnoy sintez dispersnykh poroshkov oksida alyuminiya dlya ekstruzionnoy 3D pechati poristykh izdeliy [Exploding wires synthesis of dispersed aluminum oxide powders for extrusion 3D printing of porous product], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2025, issue 17, pp. 125-134. DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.125. (In Russian).
6. 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, pp. 25632-25643. DOI: 10.1016/j.ceramint.2025.03.245.
7. Suliz K.V., Shmakov V.V., Pervikov A.V. et al. 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).
8. 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).
9. Liu S., Liu K., Qi L., Yang L. 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.
10. Dabrowa J., Stygar M., Mikula A. et al. Synthesis and microstructure of the $(Co,Cr,Fe,Mn,Ni)_3O_4$ high entropy oxide characterized by spinel structure, *Materials Letters*, 2018, vol.216, pp. 32-36. DOI: 10.1016/j.matlet.2017.12.148.
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. Berardan D., Meena A.K., Franger S. et al. Controlled Jahn-Teller distortion in (MgCoNiCuZn)O-based high entropy oxides, *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, vol.704, pp.693-700. DOI: 10.1016/j.jallcom.2017.02.070.
14. Suliz K.V., Gusarenko A.A., Pervikov A.V. Characteristic formation of the structure composite nanoparticles high entropy oxide/Ag obtained by joint exploding wires, *Powder Technology*, 2026, vol.469, art.no. 121951, 9 p. DOI: 10.1016/j.powtec.2025.121951.