УДК 54.055 *Оригинальная статья*

Электровзрывной синтез микро- и наночастиц высокоэнтропийных сплавов NiFeCoCrCuAl и NiFeCoCrCuMo для экструзионной 3D-печати гранулами

А.В. Первиков[1], Н.В. Сваровская[1], Е.А. Глазкова[2], Е.Е. Рюмин[1], К.В. Сулиз[1], С.О. Казанцев[1], М.И. Лернер[1]

[1]ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет»

634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 36

[2]ФГБУН «Институт физики прочности и материаловедения им. В.Е. Панина СО РАН»

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

pervikov@list.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.740

Аннотация: В данной работе впервые методом совместного электрического взрыва проволок различных металлов/сплавов получены порошки высокоэнтропийных сплавов в виде однородной смеси микро- и наночастиц. С использованием растровой электронной микроскопии и рентгенофазового анализа определен дисперсный состав частиц и кристаллическая структура. Определено влияние энергетических параметров взрыва проволок на кристаллическую структуру формирующихся частиц. Установлено, что распределение частиц по размерам является бимодальным. Размеры частиц варьируются от 30 нм до 15 мкм. Кристаллическая структура частиц соответствует твердым растворам замещения с ГЦК и ОЦК решетками. Порошки использовались для приготовления полимерных гранул на основе окисленного полиэтиленового воска и полиметилметакрилата. Гранулы с 50% объемным содержанием частиц сплавов использовались для экструзионной печати блочных структур с прямыми и гироидальными каналами. Изучение структурных характеристик спеченных деталей показало, что кристаллическая структура образцов представлена фазами, характерными для твердых растворов замещения с ГЦК и ОЦК решеткой. Испытания на сжатие показали, что предел прочности сопоставим по величине, характерной для семейства сплавов Кантора с аустенитной структурой.

Ключевые слова: наночастицы, высокоэнтропийный сплав, электрический взрыв проволок, экструзия, шунтирующий разряд, ток, напряжение.

Первиков Александр Васильевич – к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории нанотехнологий металлургии физико-технического факультета ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет»

Сваровская Наталья Валентиновна – к.х.н., старший научный сотрудник лаборатории нанотехнологий металлургии физико-технического факультета ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет»

Глазкова Елена Алексеевна – к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории физикохимии высокодисперсных материалов ФГБУН «Институт физики прочности и материаловедения им. В.Е. Панина СО РАН»

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»

Казанцев Сергей Олегович – к.т.н., старший научный сотрудник 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, Н.В. Сваровская, Е.А. Глазкова, Е.Е. Рюмин, К.В. Сулиз, С.В. Казанцев, М.И. Лернер, 2026

Original paper

Electroexplosive synthesis of micro- and nanoparticles of high-entropy alloys NiFeCoCrCuAl and NiFeCoCrCuMo for fused granular fabrication

A.V. Pervikov[1], N.V. Svarovskaya[1], E.A. Glazkova[2], E.E. Ryumin[1], K.V. Suliz[1], S.O. Kazantsev[1], M.I. Lerner[1]

[1]*National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia*

[2]*Panin Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of RAS, Tomsk, Russia*

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.740

Abstract: High-entropy alloy powders were synthesized for the first time as a homogeneous micro/nanoparticle mixture via the co-electrical wire explosion of various metals and alloys. Scanning electron microscopy and X-ray diffraction determined the particle size distribution and crystal structure, revealing the critical effect of wire explosion energy parameters on the particle phase formation. The particle size distribution was found to be bimodal, with particle sizes varying from 30 nm to 15 μm. The crystal structure of the particles corresponds to substitutional solid solutions with fcc and bcc lattices. The powders were compounded into oxidized polyethylene wax and polymethyl methacrylate granules. Granules containing 50 vol.% alloy particles were extrusion-printed into block structures with straight and gyroidal channels. Structural characterization of the sintered components showed that the crystal structure consists of substitutional solid solutions with fcc and bcc lattices. Compression tests indicated that the ultimate strength is comparable to the characteristic values of the austenitic Cantor alloy family.

Keywords: nanoparticles, high entropy alloy, exploding wires, fused granular fabrication, shunting discharge, current, voltage.

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

Natalia V. Svarovskaya – Ph. D., Senior Researcher, Laboratory of metallurgy nanotechnology, Faculty of physics and technology, National Research Tomsk State University, ORCID: 0000-0002-1190-8909

Elena A. Glazkova – Ph. D., Senior Researcher, Laboratory of physical chemistry of highly dispersed materials, Panin Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of RAS, ORCID: 0000-0002-5311-5288

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

Sergey O. Kazantsev – Ph.D., Senior Researcher, Laboratory of metallurgy nanotechnology, Faculty of physics and technology, National Research Tomsk State University, ORCID: 0000-0002-1728-7947

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: 29.09.2026; принята/accepted: 30.09.2026.

1. Введение

Экструзионная печать полимерными гранулами, содержащими микронные и субмикронные частицы металлов/сплавов, керамики, является перспективным способом получения деталей сложной формы [1-3]. Результаты исследований показывают, что блочные структуры, полученные данным способом, могут быть использованы в качестве носителей для реализации каталитических реакций [4]. Возможности получения данным способом широкого спектра деталей с необходимыми функциональными свойствами ограничиваются наличием относительно небольшого количества доступных порошков сплавов и оксидов, преимущественно конструкционного назначения [5]. Это указывает на актуальность разработки новых методов получения порошков

многокомпонентных сплавов на основе широкого спектра металлов.

Одним из методов получения порошков на основе многокомпонентных сплавов является совместный электрический взрыв проволок различных металлов в атмосфере инертного газа [6]. Достоинством данного метода является возможность получения порошков многокомпонентных (высокоэнтропийных) сплавов на основе частиц сферической формы. Изменение энергетических параметров взрыва проволок и теплофизических параметров формирования частиц позволяет регулировать распределение частиц по размерам в относительно широком интервале [7].

Целью данной работы являлось получение порошков на основе микро- и наночастиц высокоэнтропийных сплавов с использованием совместного электрического взрыва проволок различных металлов/сплавов в атмосфере инертного газа и изготовление с использованием данных порошков деталей с блочной структурой методом экструзионной печати гранулами.

2. Экспериментальная часть

В качестве объектов исследования были выбраны сплавы *NiFeCoCrAlCu* и *NiFeCoCrMoCu*. Выбор указанных составов обусловлен широким спектром применения частиц сплава *NiFeCoCr* [8]. Добавление к указанному составу таких металлов, как *Al*, *Cu* и *Mo* позволяет регулировать структурные характеристики сплава и его физико-механические свойства [9].

Для получения состава *NiFeCoCrCuAl* использовались: алюминиевая проволока диаметром 0,25 мм, медная проволока диаметром 0,20 мм, нихромовая проволока (Х20Н80) диаметром 0,20 мм (2 шт.), проволока сплава 29НК диаметром 0,20 мм (2 шт.). Для получения состава *NiFeCoCrMoCu* использовались: молибденовая проволока диаметром 0,15 мм, медная проволока диаметром 0,15 мм, нихромовая проволока (Х15Н60) диаметром 0,20 мм (2 шт.), проволока сплава 29НК диаметром 0,20 мм (2 шт.). Диаметры и количество проволок подбирались таким образом, чтобы соотношение указанных металлов в продуктах взрыва проволок находилось в интервале от 5 до 35 ат.% в соответствии с определением многокомпонентных(высокоэнтропийных) сплавов [10]. Выбор проволок с указанными диаметрами позволил обеспечить получение следующих составов: $Ni_{35}Fe_{17}Co_6Cr_8Al_{18}Cu_{16}$ и $Ni_{35}Fe_{32}Co_7Cr_7Mo_8Cu_{11}$ ат.%. Параметры получения образцов приведены в Таблицах 1 и 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].

Таблица 1. Параметры ЭВП для получения порошка на основе смеси микро- и наночастиц $Ni_{35}Fe_{17}Co_6Cr_8Al_{18}Cu_{16}$ (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	$P(Ar)$, МПа
Ni_Al_1	120	2,71	35,0	0,4
Ni_Al_2			31,1	
Ni_Al_3			26,3	
Ni_Al_4			22,0	

Таблица 2. Параметры ЭВП для получения порошка на основе смеси микро- и наночастиц $Ni_{35}Fe_{32}Co_7Cr_7Mo_8Cu_{11}$ (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	$P(Ar)$, МПа
Ni_Mo_1	100	2,71	33,0	0,4
Ni_Mo_2			29,5	
Ni_Mo_3			26,8	
Ni_Mo_4			22,5	

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

Порошки, полученные при максимальных значениях $E_{int}/\Sigma E_{sub}$, были использованы для приготовления гранул. В качестве связующего использовалась смесь окисленного полиэтиленового воска и полиметилметакрилата в соотношении 70/30 вес.%. Печать блочных структур с прямыми и гироидальными каналами проводилась при температуре 200°C, толщине слоя печати 0,1 мм и скорости печати 12 мм/с.

Удаление полимерного связующего проводилось в два этапа, с использованием растворного (гептан, 24 часа при комнатной температуре) и термического (линейный нагрев до 500°C в течение 12 часов в атмосфере $Ar+5\%H_2$) методов. Механические испытания на сжатие образцов, полученных спеканием порошков при 1050°C в течение 2 часов после удаления полимерного связующего, проводились на испытательной машине Instron 3369 при скорости нагружения 0,5 мм/мин.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 1 и 2 приведены временные зависимости тока и вводимой энергии, характерные для получения образцов Ni_Al и Ni_Mo при различных значениях вводимой в проволоки энергии. Для образцов Ni_Al

увеличение зарядного напряжения с 22 до 35 кВ приводит к увеличению вводимой в проволоки энергии с 0,4 до 1,1 энергии сублимации проволок (см. рис. 1 б). Для образцов Ni_Mo увеличение зарядного напряжения с 22 до 33 кВ приводит к увеличению вводимой в проволоки энергии с 0,6 до 1,4 энергии сублимации проволок. Согласно рис. 2 а увеличение напряжения до 33 кВ приводит к формированию шунтирующего разряда по поверхности расширяющихся продуктов взрыва, что проявляется в формировании локального минимума на кривой $I(t)$ при $t \approx 3{,}5$ мкс.

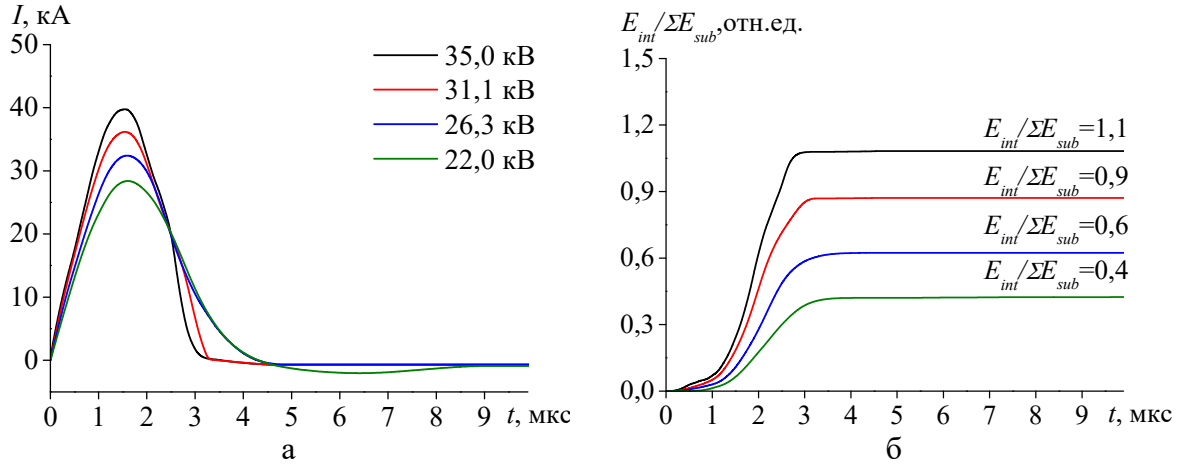

Рис. 1. Временные зависимости тока (а) и вводимой энергии (б) образцов состава $Ni_{35}Fe_{17}Co_6Cr_8Al_{18}Cu_{16}$.

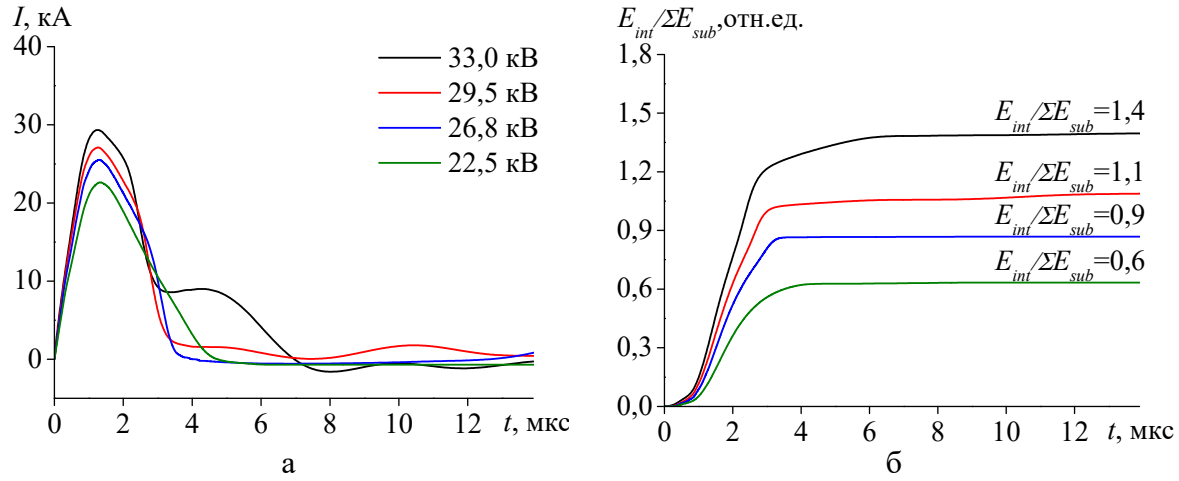

Рис. 2. Временные зависимости тока (а) и вводимой энергии (б) образцов состава $Ni_{35}Fe_{32}Co_7Cr_7Mo_8Cu_{11}$

Формирование шунтирующего разряда наиболее вероятно обусловлено низкой работой выхода электронов с поверхности молибденовой проволоки [7], что способствует ионизации буферного газа в приповерхностном слое, инициирующей развитие пробоя.

Данные РФА показывают, что увеличение вводимой энергии приводит к изменению фазового состава образцов (см. рис. 3).

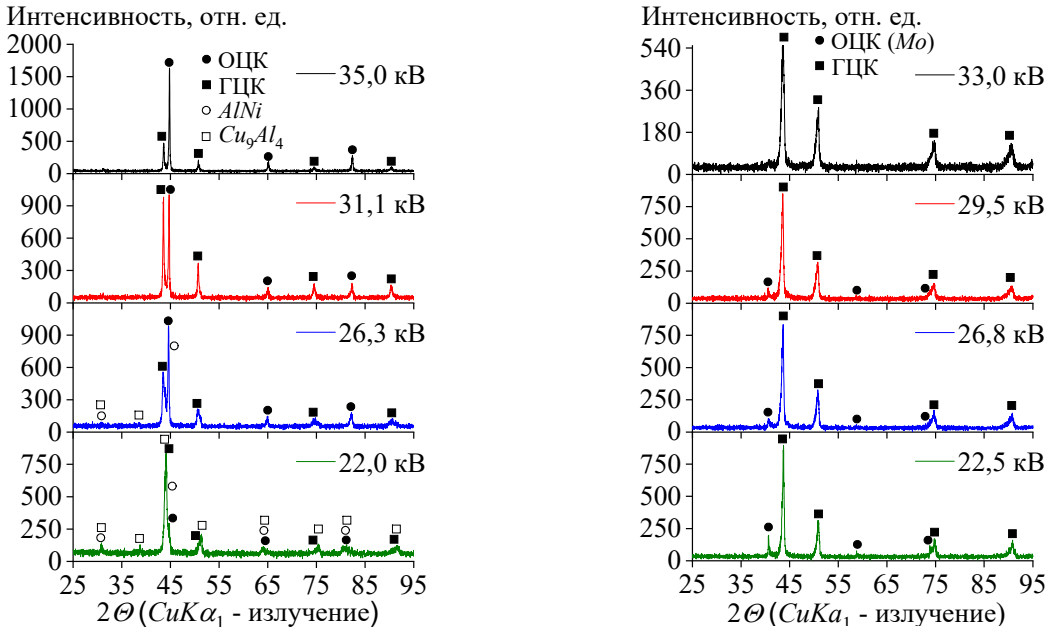

Рис. 3. Данные рентгенофазового анализа частиц состава $Ni_{35}Fe_{17}Co_6Cr_8Al_{18}Cu_{16}$ (а) и $Ni_{35}Fe_{32}Co_7Cr_7Mo_8Cu_{11}$ (б).

Для образцов Ni_Al увеличение вводимой энергии приводит к формированию двухфазного образца с ГЦК и ОЦК решетками, характерными для твердых растворов замещения. При $E_{int}/\Sigma E_{sub} = 0{,}4$ в образце наблюдается смесь фаз, характерных для интерметаллидов и твердых растворов замещения с ГЦК и ОЦК решеткой. Формирование интерметаллических фаз обусловлено более высокими значениями энергий, вводимых в медную и алюминиевую проволоки в сравнении с проволоками сплавов. Так как медная и алюминиевая проволоки обладают меньшим удельным электрическим сопротивлением в сравнении с проволоками сплавов Х15Н60 и 29НК, это способствует большей величине протекающего тока и увеличению удельного энерговклада в данные проволоки. В таких условиях нагрева продукты взрыва медной и алюминиевой проволок будут преимущественно состоять из пара и слабоионизованной плазмы, тогда как продукты взрыва проволок сплавов будут преимущественно находится в жидком состоянии, представленном каплями микронных и субмикронных размеров. Увеличение вводимой в проволоки энергии приводит к более однородному фазовому состоянию продуктов взрыва проволок с различным удельным электрическим сопротивлением, что проявляется в формировании более однородной кристаллической структуры формирующихся частиц.

Для образцов Ni_Mo увеличение вводимой в проволоки энергии до $E_{int}/\Sigma E_{sub} = 1{,}4$ проводит к формированию однофазного образца с

кристаллической структурой, соответствующей твердому раствору замещения с ГЦК решеткой. По нашему мнению, присутствие в образцах ОЦК-фазы с параметром кристаллической ячейки, близким к параметру кристаллической ячейки Mo может являться как следствием более высокой скорости охлаждения частиц Mo в жидкой фазе, так и присутствием микронных и субмикронных частиц Mo в продуктах взрыва проволок. Так как Mo имеет более низкую теплоемкость в сравнении с другими металлами, входящими в состав сплава, охлаждение частиц Mo в расширяющихся продуктах взрыва проволок будет протекать более интенсивно, что ограничивает коалесценцию частиц Mo с частицами других металлов/сплавов. Ограничение коалесценции приводит к неоднородной кристаллической структуре формирующегося многокомпонентного сплава.

На рис. 4 приведены микрофотографии, функции распределения по размерам, а также интегральные кривые массового распределения частиц Ni_Al и Ni_Mo, полученных соответственно при значениях $E_{int}/\Sigma E_{sub}$, равных 1,1 и 1,4. Данные образцы были выбраны для приготовления гранул, поскольку характеризовались наиболее однородным фазовым составом, свидетельствующим о формировании частиц в состоянии многокомпонентного сплава. Из анализа данных рис. 4 следует, что порошки представлены однородной смесью микро- и наночастиц. Отдельные частицы микронной фракции достигают размеров порядка 15-20 мкм. Распределение частиц по размерам является бимодальным с локальными максимумами, соответствующими 30 и 200 нм. Согласно интегральным кривым массового распределения частиц по размерам, для образца Ni_Al массовая доля частиц субмикронной фракции составляет порядка 60%, а для образца Ni_Mo – 85%.

С использованием полученных порошков были приготовлены полимерные гранулы на основе окисленного полиэтиленового воска и полиметилметакрилата. Объемное содержание порошка в полимерных гранулах составило 50%. С использованием данных гранул была выполнена экструзионная печать блочных структур с прямыми и гироидальными каналами (см. рис. 5). Данные РФА показали, что кристаллическая структура образца Ni_Al представлена ГЦК и ОЦК решетками, соответствующими твердым растворам замещения. Кристаллическая структура образца Ni_Mo представлена двумя ГЦК решетками на основе меди и никеля, а также фазой, соответствующей соединению Fe_3Mo_3C. Присутствие карбидной фазы указывает на необходимость дополнительной оптимизации режима термического удаления связующего.

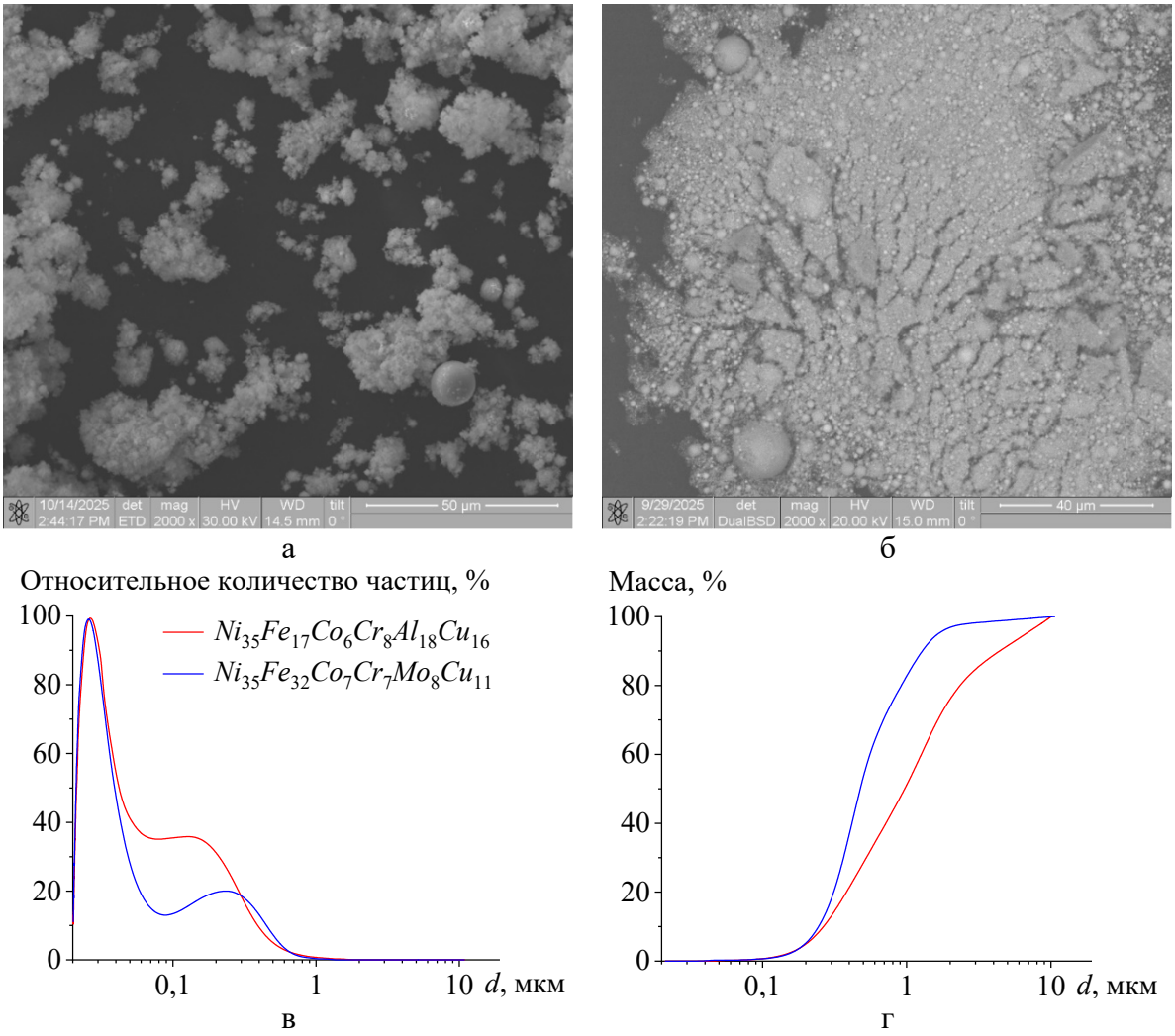

Рис. 4. Микрофотографии образцов составов $Ni_{35}Fe_{17}Co_6Cr_8Al_{18}Cu_{16}$ (а) и $Ni_{35}Fe_{32}Co_7Cr_7Mo_8Cu_{11}$ (б), кривые распределения частиц по размерам (в) и интегральные кривые массового распределения частиц (г), полученные с помощью дисковой центрифуги CPS DC 24000.

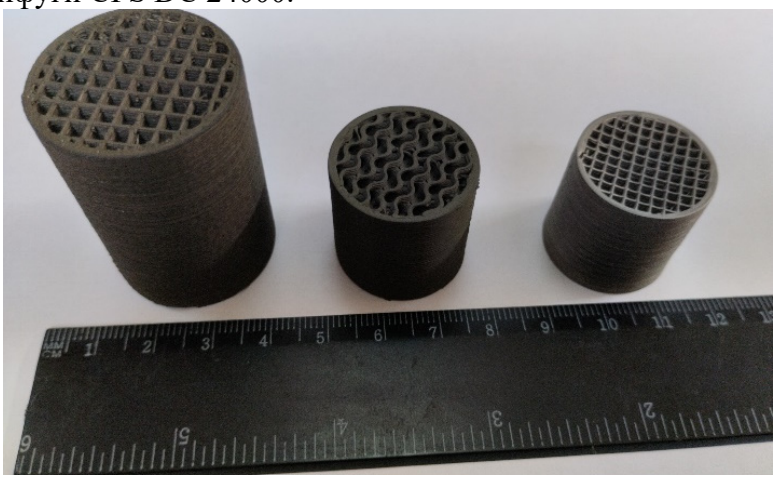

Рис. 5. Внешний вид блочных структур с прямыми и гироидальными каналами. Слева – «зеленая» деталь высотой 55 мм и диаметром 30 мм. По центру и справа - спеченные детали (высота исходной «зеленой» детали – 40 мм, диаметр – 30мм).

Результаты механических испытаний на сжатие показали, что для образца Ni_Al предел прочности на сжатие составляет порядка 980 МПа, а для образца Ni_Mo – 1300 МПа. Сравнительный анализ показал, что данные значения сопоставимы со значениями пределов прочности на сжатия, характерными для группы высокоэнтропийных сплавов Кантора с аустенитной структурой [13].

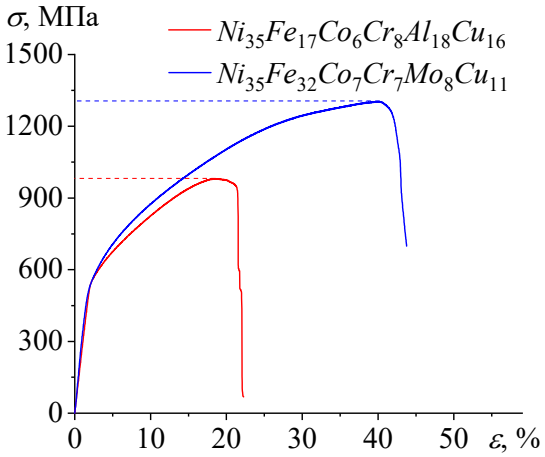

Рис. 6. Зависимости $\sigma(\varepsilon)$ при испытании на сжатие.

4. Заключение

В результате проведенного исследования на примере составов $Ni_{35}Fe_{17}Co_6Cr_8Al_{18}Cu_{16}$ и $Ni_{35}Fe_{32}Co_7Cr_7Mo_8Cu_{11}$, соответствующих высокоэнтропийным сплавам изучено влияние параметров электровзрывного синтеза на дисперсный состав и кристаллическую структуру формирующихся частиц. Данные РФА и РЭМ показали, что минимальные значения вводимой в проволоки энергии, обеспечивающий получение частиц многокомпонентных сплавов, составляет $1{,}1\cdot\Sigma E_{sub}$ для состава $Ni_{35}Fe_{17}Co_6Cr_8Al_{18}Cu_{16}$ и $1{,}4\cdot\Sigma E_{sub}$ для состава $Ni_{35}Fe_{32}Co_7Cr_7Mo_8Cu_{11}$. Увеличение вводимой энергии сверх указанных значений будет способствовать уменьшению среднего размера частиц за счет уменьшения доли микронных частиц. Снижение доли микронных частиц в порошке будет способствовать увеличению вязкости расплава при экструзионной печати. Увеличение вязкости расплава оказывает отрицательное влияние на параметры печати и структурные характеристики напечатанной детали. Результаты проведенных исследований показывают, что изменение элементного состава продуктов взрыва проволок позволяет порошки на основе высокоэнтропийных сплавов для экструзионной печати конечных деталей с различными физико-механическими характеристиками.

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

Библиографический список:

1. **Curmi, A.** Screw extrusion fused granulate fabrication: trends, materials, extruder classification and future development / A. Curmi, A. Rochman // Polymer. – 2025. – V. 130. – Art. № 128459. – 19 p. DOI: 10.1016/j.polymer.2025.128459.
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 et al. // 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 et al. // Ceramics International. – 2026. – V.52. – I.20. – P. 36093-36103. DOI: 10.1016/j.ceramint.2026.06.117.
4. **Martínez-Fuentes, J.C.** 3D-printed high-reliability alloy-based monoliths as structured supports for CO_2 methanation catalysts / J.C. Martínez-Fuentes, D.A. Chirita, I. Martínez-Lopez et al. // Chemical Engineering Journal. – 2026. – V. 547. – Art. 181376. – 15 p. DOI: 10.1016/j.cej.2026.181376.
5. **Mazeeva, A.** Multi-Metal additive manufacturing by extrusion-based 3D printing for structural applications: A Review / A. Mazeeva, D. Masaylo, G. Konov, A. Popovich. // Metals. – 2024. – V. 14. – I. 11. – Art. № 1296. – 53 p. DOI: 10.3390/polym13183160.
6. **Pervikov, A.** Energy characteristics of the electrical explosion of two intertwined wires made of dissimilar metals / A. Pervikov, E. Glazkova, M. Lerner. // Physics of Plasmas. – 2018. – V. 25. – I. 7. – Art. № 070701. – 7 p. DOI: 10.1063/1.5034184
7. **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.
8. **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.
9. **Yang, Y.-F.** High entropy alloys: A review of preparation techniques, properties and industry applications / Y.-F. Yang, F. Hu, T. Xia et al. // Journal of Alloys and Compounds. – 2025. – V. 1010. – Art. № 177691. – 24 p. DOI: 10.1016/j.jallcom.2024.177691.
10. **Yeh, J.-W.** Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes / J.-W. Yeh, S.-K. Chen, S.-J. Lin et al. // Advanced Engineering Materials. – 2004. – V. 6. – I. 5. – P. 299-303. DOI: 10.1002/adem.200300567.
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. **Zeng, Z.** Mechanical properties of Cantor alloys driven by additional elements: a review / Z. Zeng, M. Xiang, D. Zhang et al. // Journal of Materials Research and Technology. – 2021. – V. 15. – P. 1920-1934. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.09.019.

References:

1. Curmi A., Rochman A. Screw extrusion fused granulate fabrication: trends, materials, extruder classification and future development, *Polymer,* 2025*,* vol. 130, art. no. 128459, 19 p. DOI: 10.1016/j.polymer.2025.128459.
2. Heuer C., Bock-Seefeld B., Kaiser P. et al. 3D printing of alumina components via Fused Granulate Fabrication technology and solvent-free debinding of highly filled feedstocks comprising (LD)-polyethylene and cellulose, *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. Martínez-Fuentes J.C., Chirita D.A., Martínez-Lopez I. et al. 3D-printed high-reliability alloy-based monoliths as structured supports for CO_2 methanation catalysts, *Chemical Engineering Journal*, 2026, vol.547, art. no. 181376, 15 p. DOI: 10.1016/j.cej.2026.181376.
5. Mazeeva A., Masaylo D., Konov G., Popovich A. Multi-Metal additive manufacturing by extrusion-based 3D printing for structural applications: A Review, *Metals*, 2024, vol. 14, issue 11, art. no 1296, 53 p. DOI:

10.3390/polym13183160.
6. Pervikov A., Glazkova E., Lerner M. Energy characteristics of the electrical explosion of two intertwined wires made of dissimilar metals, *Physics of Plasmas*, 2018, vol. 25, issue 7, art. no. 070701, 7 p. DOI: 10.1063/1.5034184.
7. 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.
8. 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.
9. Yang Y.-F., Hu F., Xia T. et al. High entropy alloys: A review of preparation techniques, properties and industry applications, *Journal of Alloys and Compounds*, 2025, vol. 1010, art. no. 177691, 24 p. DOI: 10.1016/j.jallcom.2024.177691.
10. Yeh J.-W., Chen S.-K., Lin S.-J. et al. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes, *Advanced Engineering Materials,* 2004, vol. 6, issue 5, pp. 299-303. DOI: 10.1002/adem.200300567.
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. Zeng Z., Xiang M., Zhang D. et al**.** Mechanical properties of Cantor alloys driven by additional elements: a review, *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, vol. 15, pp. 1920-1934. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.09.019.