

УДК 54.055

Краткое сообщение

**Электровзрывной синтез дисперсных порошков оксида алюминия для
экструзионной 3D печати пористых изделий**

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

DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.125

Аннотация: Работа посвящена изучению влияния параметров электровзрывного синтеза частиц Al_2O_3 на их средний размер и фазовый состав. Варьируемыми параметрами синтеза являлись эквивалентный диаметр проволок и давление буферного газа при постоянной величине энергии, вводимой в проволоки. Установлено, что увеличение эквивалентного диаметра проволок с 0,25 до 0,50 мм приводит к увеличению среднего размера частиц с 81 до 92 нм. Увеличение давления буферного газа с 0,1 до 0,4 МПа при эквивалентном диаметре проволок порядка 0,50 мм приводит к увеличению среднего размера частиц с 76 до 106 нм. Увеличение давления буферного газа приводит к формированию дополнительной моды на кривой распределения частиц по размерам с максимумом в области 30-40 нм. Кристаллическая структура образцов, полученных при различном давлении буферного газа, соответствует θ - и γ - фазам Al_2O_3 . Результаты проведенных исследований показывают, что порошки Al_2O_3 , полученные ЭВП, могут быть использованы для изготовления пористых изделий методом экструзионной 3D печати.

Ключевые слова: оксид алюминия, наночастицы, экструзия, 3D-печать, электрический взрыв проволоки, просвечивающая электронная микроскопия, рентгенофазовый анализ.

Первиков Александр Васильевич – к.т.н., старший научный сотрудник 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»

Сагун Антон Игоревич – 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»

Short Communication

Exploding wires synthesis of dispersed aluminum oxide powders for extrusion 3D printing of porous product

A.V. Pervikov, K.V. Suliz, A.I. Sagun, S.O. Kazantsev, M.I. Lerner
National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.125

Abstract: The influence of the parameters of electroexplosive synthesis of Al_2O_3 particles on their average size and phase composition was studied. The equivalent diameter of the wires and the buffer gas pressure at a constant value of energy introduced into the wires were varied synthesis parameters. An increase in the equivalent diameter of the wires from 0.25 to 0.50 mm leads to an increase in the average particle size from 81 to 92 nm. An increase in the buffer gas pressure from 0,1 to 0,4 MPa at an equivalent wire diameter of about 0,50 mm leads to an increase in the average particle size from 76 to 106 nm. An increase in the buffer gas pressure leads to the formation of an additional mode on the

© А.В. Первиков, К.В. Сулиз, А.И. Сагун, С.О. Казанцев, М.И. Лернер, 2025

particle size distribution curve with a maximum in the region of 30-40 nm. The crystal structure of the samples obtained at different buffer gas pressures corresponds to the θ - and γ - phases for Al_2O_3 . Al_2O_3 powders obtained by electrical explosion of wires can be used to manufacture porous products by extrusion 3D printing.

Keywords: aluminum oxide, nanoparticles, extrusion, 3D-printing, exploding wires, transmission electron microscopy, X-ray phase analysis.

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

Konstantin V. Suliz – Research Engineer, Laboratory of metallurgy nanotechnology, Faculty of physics and technology, National Research Tomsk State University, ORCID: 0000-0001-5556-2113

Anton I. Sagun – Research Engineer, laboratory of metallurgy nanotechnology, Faculty of physics and technology, National Research Tomsk State University, ORCID: 0009-0001-9537-4878

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., Senior Researcher, Laboratory of metallurgy nanotechnology, Faculty of physics and technology, National Research Tomsk State University, ORCID: 0000-0001-8565-1344

Поступила в редакцию/received: 15.07.2025; после рецензирования/reviced: 20.09.2025; принята/accepted 25.09.2025.

1. Введение

Развитие аддитивных технологий дало новые возможности получения пористых керамических изделий сложной формы с различными функциональными свойствами [1]. Одним из широко используемых в данной области материалов является оксид алюминия [2, 3]. Пористые изделия из оксида алюминия представляют практический интерес для реализации различных каталитических реакций [4-7]. Для этих целей используют модификацию поверхности изделий различными металлами и химическими соединениями. В большинстве представленных работ получение пористых изделий и модификация поверхности реализуются в несколько стадий. Модификация поверхности частиц оксида алюминия благородными металлами может быть осуществлена непосредственно в процессе синтеза частиц, основанного на использовании совместного электрического взрыва проволок (СЭВП) алюминия и благородного металла, как это было продемонстрировано на примере синтеза композитных частиц Ag / Al_2O_3 в работе [8]. К достоинствам ЭВП, как метода получения порошков, следует отнести не только возможность получения композитных частиц на основе Al_2O_3 , но возможности варьирования дисперсного состава частиц в широких пределах, что имеет важное значение для оптимизации режимов экструзионной 3D печати изделий на основе Al_2O_3 [9]. Представленные данные указывают на перспективность использования электрического взрыва проволок (ЭВП), как метода получения порошков Al_2O_3 для экструзионной 3D печати пористых изделий.

Целью данной работы являлось определение влияния параметров ЭВП на дисперсный и фазовый состав порошков на основе частиц Al_2O_3 .

2. Экспериментальная часть

Для получения порошков Al_2O_3 использовалась установка, внешний вид и принцип работы которой приведены в работе [10]. В качестве варьируемых параметров синтеза были выбраны эквивалентный диаметр проволок и давление буферного газа. Изменение эквивалентного диаметра достигалось за счет увеличения числа проволок. Данные параметры, наряду с величиной энергии E , вводимой в проволоки, оказывают основное влияние на средний размер наночастиц, формирующихся в результате ЭВП [11, 12]. В данных экспериментах величина E поддерживалась постоянной и составила порядка $1,80 \times E_c$, где E_c – энергия сублимации алюминиевой проволоки, рассчитываемая с использованием справочных данных [13]. Расчет электрофизических параметров синтеза, обеспечивающих близкие значения E для проволок различных длин и диаметров проводился с использованием безразмерных критериев подобия, приведенных в работе [14]. Величина E рассчитывалась на основании временной зависимости тока $I(t)$ по методике, приведенной в работе [15]. Параметры синтеза образцов приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Параметры ЭВП для получения порошков на основе Al_2O_3 (N – число проволок заданного диаметра, C – электрическая емкость накопителя энергии, U_0 – зарядное напряжение накопителя энергии, P – давление буферного газа ($Ar + 25\%$ мол. O_2)).

Номер образца	Марка металла проволоки	Геометрические параметры проволоки		C , мкФ	U_0 , кВ	P , МПа	E , Дж	
		длина, мм	диаметр $\times N$, мм					
1	А5	30	0,25 \times 1	4,80	7,5	0,25	49	
2		60	0,25 \times 2		15,0		194	
3		90	0,25 \times 3		22,5		438	
4		120	0,25 \times 4		30,0		780	
5	А5	120	0,25 \times 4	4,80	30,0	0,1	780	
6								0,2
7								0,3
8								0,4

Морфология и структурные характеристики наночастиц определены с использованием просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на приборе JEOL JEM-2100.

Средний размер частиц определялся с использованием дисковой центрифуги CPS DC24000. Перед измерениями внутри диска был создан градиент сахарозы в соответствии с инструкцией производителя.

Градиенту давали термически уравновеситься в течение 15 минут перед началом измерений. Среднее значение плотности градиента составило $1,018 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$ (сахароза/вода). Измерения мутности на детекторе проводились с использованием диодного лазера на длине волны 405 нм. Во всех экспериментах использовалась частота вращения 6500 об/мин и объем инъекции 100 мкл. Каждое измерение калибровалось с использованием частиц полистирольного латекса с номинальным размером 430 нм и плотностью $1,05 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$. Результаты представлены как среднее арифметическое значение диаметра частиц, взвешенного по числу, из трёх повторных экспериментов.

Кристаллическая структура наночастиц определялась по данным рентгенофазового анализа, проводимого на рентгеновском дифрактометре Shimadzu XRD 6000. Идентификация фаз проводилась с использованием кристаллографической базы данных PDF2 (Set 1-47. Release, 2016).

3. Результаты и обсуждения

На рис. 1 приведены временные зависимости $I(t)$ и $E(t)$, характерные для получения образцов № 1-4 и № 5-8. Из анализа зависимостей $I(t)$ для образцов № 1-4 следует, что максимальное значение тока, протекающего через проволоку ($t \approx 1,95 \text{ мкс}$) и зажигание шунтирующего разряда ($t \approx 2,4 \text{ мкс}$) для всех образцов достигаются в близкие моменты времени, отмеченные вертикальными пунктирными линиями на рис. 1 а. Эти данные показывают, что для образцов № 1-4 обеспечены эквивалентные условия нагрева проволок. Из анализа зависимостей $E(t)$ на рис. 1 б следует, что к моменту зажигания шунтирующего разряда в проволоки вводится энергия порядка $1,80 \times E_c$. Для образцов № 5-8 наблюдается незначительное уменьшение величины протекающего тока с увеличением давления буферного газа. Это может быть обусловлено тем, что при более низком давлении вдоль поверхности проволоки формируются дополнительные проводящие каналы вследствие ионизации буферного газа в приповерхностном слое, окружающем проволоку. Увеличение давления буферного газа приводит к уменьшению степени ионизации, что снижает проводимость данных каналов. Из анализа зависимостей $E(t)$ на рис. 1 г следует, что к моменту зажигания шунтирующего разряда в проволоки также вводится энергия порядка $1,80 \times E_c$.

На рис. 2 приведены функции распределения наночастиц по размерам. Данные рис. 2 а показывают, что увеличение эквивалентного диаметра приводит к незначительному увеличению среднего размера наночастиц с 81 до 92 нм. Увеличение эквивалентного диаметра сопровождается незначительным изменением формы кривой

распределения частиц по размерам, выражающимся в формировании дополнительной моды с максимумом в интервале 30-40 нм. Данные рис. 2 в показывают, что увеличение давления буферного газа для образцов № 5-8 приводит к увеличению среднего размера наночастиц с 76 до 106 нм. Размер синтезированных частиц Al_2O_3 согласуется с размером частиц, использованных для экструзионной 3D печати в работе [3]. Увеличение давления буферного газа приводит к явному изменению формы кривой распределения частиц по размерам, выражающемуся в формировании дополнительной моды с максимумом в интервале 30-40 нм.

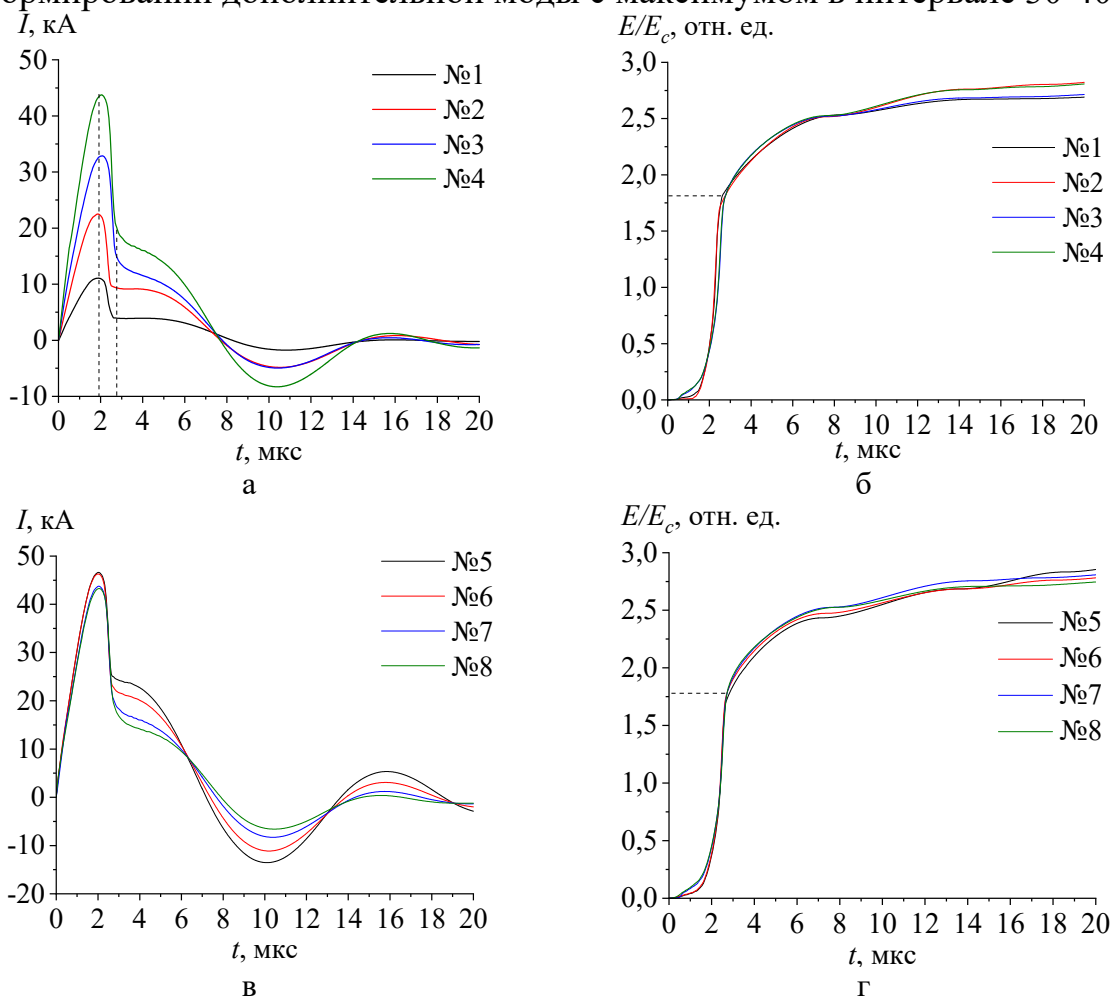


Рис. 1. Временные зависимости тока (а, в) и вводимой энергии (б, г) исследуемых образцов.

Анализ интегральных кривых массового распределения частиц по размерам показывает, что увеличение эквивалентного диаметра приводит к уменьшению массовой доли частиц с размерами менее 100 нм с 30 до 17 вес.%. Увеличение давления буферного газа приводит к уменьшению массовой доли частиц с размерами менее 100 нм с 37 до 12 вес.%. Полученные данные показывают, что изменение давления буферного газа позволяет изменять средний размер частиц в более широком интервале.

Это дает возможность регулировать не только текучесть фидстоков, используемых при экструзионной 3D печати, но и более гибко регулировать размер межчастичных пор, формирующих общую поверхностную площадь изделия. Наряду с этим, параметры синтеза образцов № 5-8 обеспечивают максимальную производительность порошка, составляющую порядка 100 г/ч.

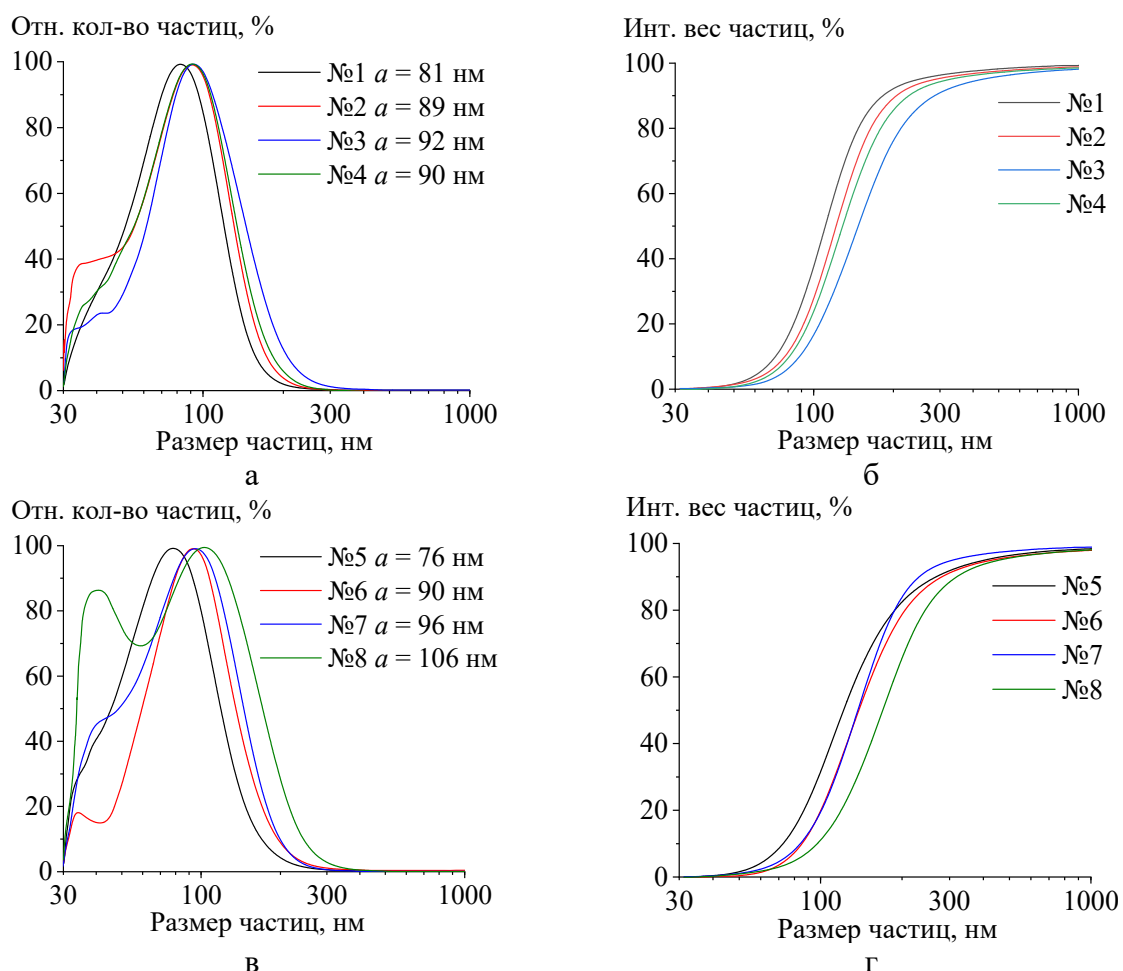


Рис. 2. Численное (а, в) и массовое распределение частиц по размерам (б, г) исследуемых образцов.

На рис. 3 приведены микрофотографии частиц по размерам. Из представленных данных следует, что все частицы имеют сферическую форму. Размер частиц варьируются от 20 до 300 нм.

На рис. 4 приведены результаты рентгенофазового анализа образцов № 5-8. Из анализа представленных данных следует, что для всех образцов характерно наличие двух кристаллических структур, соответствующих θ - и γ -фазам оксида алюминия. Изменение давления буферного газа не оказывает влияния на фазовый состав образцов.

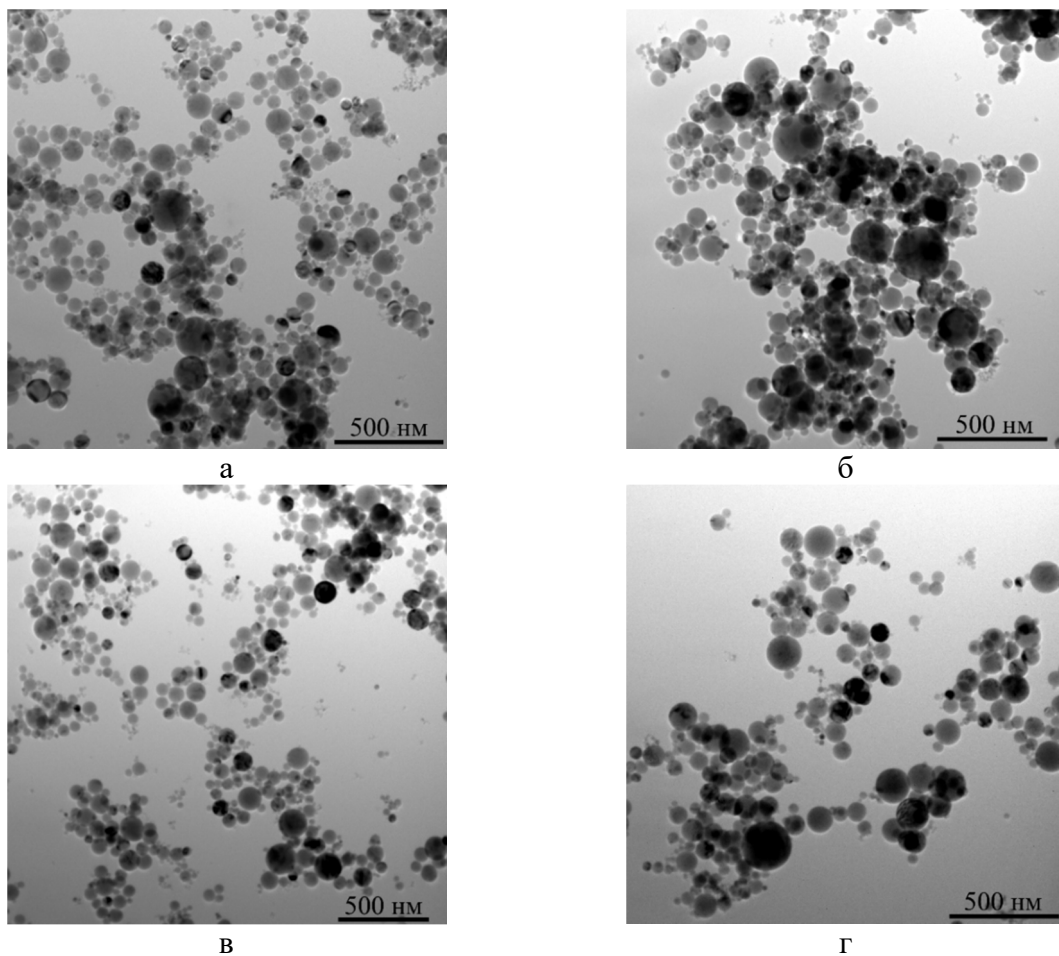


Рис. 3. Микрофотографии частиц Al_2O_3 : а – № 5, б – № 6, в – №7, г – № 8.

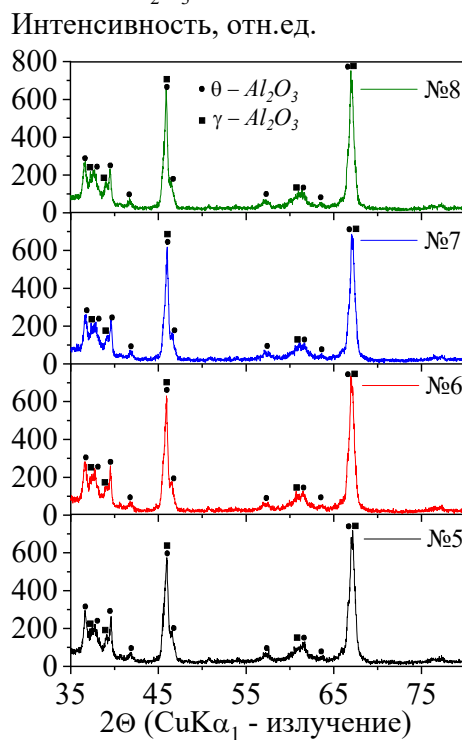


Рис. 4. Данные рентгенофазового анализа образцов № 5-8.

4. Заключение

Результаты исследований показали, что варьирование параметров ЭВП приводит к изменению среднего размера наночастиц Al_2O_3 . При величине вводимой в проволоку энергии порядка $1,80 \times E_c$, наибольшее изменение среднего размера частиц достигается в результате увеличения давления буферного газа. Увеличение давления буферного газа с 0,1 до 0,4 МПа, средний размер частиц увеличивается с 76 до 106 нм. Кристаллическая структура образцов не зависит от величины давления буферного газа и представлена θ - и γ - фазами Al_2O_3 . Увеличение эквивалентного диаметра проволок с 0,25 до 0,50 при величине вводимой в проволоку энергии порядка $1,80 \times E_c$, приводит к изменению среднего размера частиц с 81 до 90 нм. Увеличение эквивалентного диаметра проволок и давления буферного газа приводит к появлению дополнительной моды на кривой распределения частиц по размерам с максимумом в интервале 30-40 нм. Бимодальный характер кривой распределения частиц по размерам показывает, что увеличение диаметра проволок и давления буферного газа позволяют регулировать соотношение наноразмерных и субмикронных частиц в порошке. Возможность регулирования данного соотношения позволяет управлять как реологическими характеристиками фидстоков, используемых для экструзионной 3D печати, так и пористостью конечного изделия. Полученные результаты демонстрируют перспективность использования ЭВП для получения порошков Al_2O_3 для экструзионной 3D печати.

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

Библиографический список:

1. **Gao, Y.** An Overview on 3D printing of structured porous materials and their applications / Y. Gao, J. Lalevée, A. Simon-Masseron // *Advanced Materials Technologies*. – 2023. – V. 8. – I. 17. – Art. № 2300377. – 28 p. DOI: 10.1002/admt.202300377.
2. **Mastroianni, L.** DLP 3D printing of alumina catalyst architectures: Design, kinetics and modeling of structure effects on catalyst performance / L. Mastroianni, A. D. J. Medina Ferrer, A. M. De Domenico et al. // *Chemical Engineering Journal*. – 2004. – V. 501. – Art. № 157691. – 14 p. DOI: 10.1016/j.cej.2024.157691.
3. **Hossain, Sk.S.** Development of tunable porous alumina monolith using hollow microspheres via extrusion-based 3D printing / Sk S. Hossain, F. Akhtar // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2024. – V. 44. – I. 11. – P. 6620-6628. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2024.04.020.
4. **Bui, H.M.** Comparison of direct ink writing and binder jetting for additive manufacturing of Pt/ Al_2O_3 catalysts for the dehydrogenation of perhydro-dibenzyltoluene / H.M. Bui, P.F. Großmann, A. Berger et al. // *Chemical Engineering Journal*. – 2023. – V. 458. – Art. № 141361. – 12 p. DOI: 10.1016/j.cej.2023.141361.
5. **Nagata, E.Y.** Strontium-enriched phosphate coating on fused filament fabrication 3D printed alumina scaffolds / E.Y. Nagata, F.C. Nunes, L. Santana et al. // *Materials Letters*. – 2025. – V. 399. – Art. № 139033. – 5 p. DOI: 10.1016/j.matlet.2025.139033.
6. **Mastroianni, L.** Digital light processing (DLP) 3D-printed Pd/ Al_2O_3 catalysts for H_2O_2 decomposition: towards efficient green thrusters / L. Mastroianni, G. Agovino, F. Sandri et al. // *Applied Catalysis A, General*. – 2025. – V. 706. – Art. № 120466. – 14 p. DOI: 10.1016/j.apcata.2025.120466.

7. **Razavi, S.A.** 3D-printed Ni/ γ -Al₂O₃ catalysts for CO₂ methanation: Effect of Ni loading and sintering temperature / S. A. Razavi, G. Fargas, I. Serrano et al. // *Chemical Engineering Journal*. – 2025. –V. 523. – Art. № 168665. – 19 p. DOI: 10.1016/j.cej.2025.168665.
8. **Lozhkomoev, A.S.** New approach to production of antimicrobial Al₂O₃-Ag nanocomposites by electrical explosion of two wires / A.S. Lozhkomoev, S.O. Kazantsev, A.V. Pervikov et al. // *Materials Research Bulletin*. – 2019. – V. 119. – Art.№ 110545. – 7 p. DOI: 10.1016/j.materresbull.2019.110545.
9. **Chandan, P.B.** Tailoring the proportion of particle size to evaluate extrusion-based 3D printed alumina ceramics / P. B. Chandan, M. R. Sankar // *Materials Science and Engineering B*. – 2025. – V.314. – Art. № 117984. – 15 p. DOI: 10.1016/j.mseb.2025.117984.
10. **Lozhkomoev, A.S.** Synthesis of Fe/Fe₃O₄ core-shell nanoparticles by electrical explosion of the iron wire in an oxygen-containing atmosphere / A.S. Lozhkomoev, A.V. Pervikov, S.O. Kazantsev, et al // *Journal of Nanoparticle Research*. – 2021. – V. 23. – I. 2. – Art. № 73. – 12 p. DOI: 10.1007/s11051-021-05180-x.
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. **Lerner, M.I.** Production technology, characteristics, and some applications of electric-explosion nanopowders of metals / M.I. Lerner, N.V. Svarovskaya, S.G. Psakhie et al // *Nanotechnologies in Russia*. – 2009. – V.4. – I. 11-12. – P.741-757. DOI: 10.1134/S1995078009110019.
13. **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.
14. **Kwon, Y.-S.** Ultra-fine powder by wire explosion method / Y.-S. Kwon, Y.-H. Jung, N.A. Yavorovsky et al. // *Scripta Materialia*. – 2001. – V.44. – I. 8-9. – P. 2247-2251. DOI: 10.1016/S1359-6462(01)00757-6.
15. **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.
16. Powder Diffraction File JCPDS-ICDD PDF-2 (Set 1-47). (Release, 2016). – Режим доступа: [www.url: https://www.icdd.com/pdf-2](http://www.icdd.com/pdf-2). – 15.06.2025.

References:

1. Gao Y., Lalevée J., Simon-Masseron A. An overview on 3D printing of structured porous materials and their applications, *Advanced Materials Technologies*, 2023, vol. 8, issue 17, art. no. 2300377, 28 p. DOI: 10.1002/admt.202300377.
2. Mastroianni L., Medina Ferrer A.D.J., De Domenico A.M. et al. DLP 3D printing of alumina catalyst architectures: design, kinetics and modeling of structure effects on catalyst performance, *Chemical Engineering Journal*, 2024, vol. 501, art. no. 157691, 14 p. DOI: 10.1016/j.cej.2024.157691.
3. Hossain Sk.S., Akhtar F. Development of tunable porous alumina monolith using hollow microspheres via extrusion-based 3D printing, *Journal of the European Ceramic Society*, 2024, vol. 44, issue 11, pp. 6620-6628. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2024.04.020.
4. Bui H.M., Großmann P.F., Berger A. et al. Comparison of direct ink writing and binder jetting for additive manufacturing of Pt/Al₂O₃ catalysts for the dehydrogenation of perhydro-dibenzyltoluene, *Chemical Engineering Journal*, 2023, vol. 458, art. no. 141361, 12 p. DOI: 10.1016/j.cej.2023.141361.
5. Nagata E.Y., Nunes F.C., Santana L. et al. Strontium-enriched phosphate coating on fused filament fabrication 3D printed alumina scaffolds, *Materials Letters*, 2025, vol. 399, art. no. 139033, 5 p. DOI: 10.1016/j.matlet.2025.139033.
6. Mastroianni L., Agovino G., Sandri F. et al. Digital light processing (DLP) 3D-printed Pd/Al₂O₃ catalysts for H₂O₂ decomposition: towards efficient green thrusters, *Applied Catalysis A: General*, 2025, vol. 706, art. no. 120466, 14 p. DOI: 10.1016/j.apcata.2025.120466.
7. Razavi S.A., Fargas G., Serrano I. et al. 3D-printed Ni/ γ -Al₂O₃ catalysts for CO₂ methanation: Effect of Ni loading and sintering temperature, *Chemical Engineering Journal*, 2025, vol. 523, art. no. 168665, 19 p. DOI: 10.1016/j.cej.2025.168665.
8. Lozhkomoev A.S., Kazantsev S.O., Pervikov A.V. et al. New approach to production of antimicrobial Al₂O₃-Ag nanocomposites by electrical explosion of two wires, *Materials Research Bulletin*, 2019, vol. 119, art. no. 110545, 7 p. DOI: 10.1016/j.materresbull.2019.110545.
9. Chandan P.B., Sankar M.R. Tailoring the proportion of particle size to evaluate extrusion-based 3D printed alumina ceramics, *Materials Science and Engineering B*, 2025, vol. 314, art. no. 117984, 15 p. DOI: 10.1016/j.mseb.2025.117984.
10. Lozhkomoev A.S., Pervikov A.V., Kazantsev S.O. et al. Synthesis of Fe/Fe₃O₄ core-shell nanoparticles by

- electrical explosion of the iron wire in an oxygen-containing atmosphere, *Journal of Nanoparticle Research*, 2021, vol. 23, issue 2, art. no. 73, 12 p. DOI: 10.1007/s11051-021-05180-x.
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. Lerner M.I., Svarovskaya N.V., Psakhie S.G. et al. Production technology, characteristics, and some applications of electric-explosion nanopowders of metals, *Nanotechnologies in Russia*, 2009, vol. 4, issue 11-12, pp. 741-757. DOI: 10.1134/S1995078009110019.
13. Haynes W.M. CRC handbook of chemistry and physics, 95th ed., Boca Raton, CRC Press, 2014, 2704 p. DOI: 10.1201/b17118.
14. Kwon Y.-S., Jung Y.-H., Yavorovsky N.A. et al. Ultra-fine powder by wire explosion method, *Scripta Materialia*, 2001, vol.44, issue 8-9, pp. 2247-2251. DOI: 10.1016/S1359-6462(01)00757-6.
15. 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.
16. Powder Diffraction File JCPDS-ICDD PDF-2 (Set 1-47). (Release, 2016). Available at: www.url:https://www.icdd.com/pdf-2 (accessed 15.06.2025).