

Научная статья

УДК 621.763

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31307>



А.И. Зайцев , А.В. Сотов, А.Э. Абдрахманова, А.А. Попович

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

 zaytsev.alexander2011@yandex.ru

ПОЛУЧЕНИЕ ПОЛИМЕР-КЕРАМИЧЕСКИХ И КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СИЛИКАТА ЦИРКОНИЯ ($ZrSiO_4$) МЕТОДОМ ПОСЛОЙНОГО НАПЛАВЛЕНИЯ ФИЛАМЕНТА (FDM-ТЕХНОЛОГИЯ)

Аннотация. На сегодняшний день аддитивные технологии открывают широкие возможности для создания функциональных материалов различного применения. Одним из актуальных направлений исследований является создание полимер-керамических композитов методом послойного наплавления филамента (FDM-технология). Такой подход совмещает преимущества 3D-печати и уникальные свойства композиционных материалов. В представленной работе проведено исследование полимер-керамического композиционного материала (ПККМ) на основе силиката циркония ($ZrSiO_4$), полученного FDM-печатью. Для исследования свойств и структуры материала применялись методы оптической и электронной микроскопии, ДСК и ТГА анализы. Механические испытания включали определение ударной вязкости на маятниковом копре и измерение поверхностной твердости по Шору D. В ходе анализа результатов установлено увеличение ударной вязкости по сравнению с чистым PLA более чем на 30%. Продемонстрирована возможность получения керамических изделий путем термического удаления полимерного связующего и спекания керамических частиц. Результаты показывают перспективы использования FDM-технологии для изготовления функциональных изделий из полимер-керамических материалов с заданными свойствами.

Ключевые слова: аддитивное производство, полимер-керамический материал, FDM-технология, удаление связующего, спекание керамики.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Санкт-Петербургского научного фонда (Договор №23-РБ-0939).

Для цитирования:

Зайцев А.И., Сотов А.В., Абдрахманова А.Э., Попович А.А. Получение полимер-керамических и керамических материалов на основе силиката циркония ($ZrSiO_4$) методом послойного наплавления филамента (FDM-технология) // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 3. С. 98–106. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31307>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31307>*A.I. Zaytsev* ✉, *A.V. Sotov*, *A.E. Abdrakhmanova*, *A.A. Popovich*

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

✉ zaytsev.alexander2011@yandex.ru

PRODUCTION OF POLYMER-CERAMIC AND CERAMIC MATERIALS BASED ON ZIRCONIUM SILICATE ($ZrSiO_4$) USING THE FUSED DEPOSITION MODELING (FDM-TECHNOLOGY)

Abstract. To date, additive technologies offer wide opportunities for creating functional materials for various applications. One of the most relevant research areas is the development of polymer-ceramic composites using the fused deposition modeling (FDM) method. This approach combines the advantages of 3D printing with the unique properties of composite materials. The article presents a study of a polymer-ceramic composite material (PCCM) based on zirconium silicate ($ZrSiO_4$) produced by FDM printing. Optical and electron microscopy, DSC and TGA analysis were used to study the properties and structure of the material. Mechanical testing included the determination of the impact strength using a pendulum impact tester and the measurement of the surface hardness using the Shore D scale. The analysis of the results showed an increase in impact strength of more than 30% compared to pure PLA. The feasibility of producing ceramic components through the thermal removal of the polymer binder and sintering of ceramic particles was demonstrated. The results indicate the promising potential of FDM technology for manufacturing functional products from polymer-ceramic materials with specified properties.

Keywords: additive manufacturing, polymer-ceramic material, FDM, debinding, sintering.

Acknowledgements: The research was supported by the St. Petersburg Science Foundation grant No. 23-RB-0939.

Citation:

Zaytsev A.I., Sotov A.V., Abdrakhmanova A.E., Popovich A.A., Production of polymer-ceramic and ceramic materials based on zirconium silicate ($ZrSiO_4$) using the fused deposition modeling (FDM-technology), *Global Energy*, 31 (03) (2025) 98–106, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31307>

Введение. Технологии аддитивного производства (АП) активно внедряются в различные отрасли – от машиностроения и энергетики до радиотехники и аэрокосмического строения. Принцип построения изделий слой за слоем обладает рядом преимуществ в сравнении с традиционными подходами. В частности, АП позволяет создавать изделия со сложной геометрией при сокращении производственных отходов [1–3].

Среди семи общепринятых методов АП наиболее распространенным является процесс послойного наплавления филамента [4]. Сущность технологии FDM-печати заключается в нагреве термопластичного материала до вязкотекучего состояния и выборочном нанесении полимера в соответствии с 3D-моделью. Данная технология зарекомендовала себя как доступный аналог традиционным процессам для создания функциональных изделий. На сегодняшний день существует большое количество материалов для FDM-печати, которые подбираются в зависимости от требований к будущим изделиям. Наиболее распространенными являются полимолочная кислота (PLA), акрилонитрилбутадиенстирол (ABS), полиэтилентерефталатгликоль (PETG), полимерные композиционные материалы и др. [5]. Одним из перспективных, но малоизученных направлений является создание и исследование полимеров, наполненных керамическими и металлическими частицами [6]. В научных работах большее внимание уделяется

изучению полимер-металлических материалов, проводятся физико-механические испытания, исследуется структура и возможность получения металлических изделий путем проведения постобработки [7, 8]. Однако полимер-керамические материалы также представляют большой интерес за счет уникальных свойств керамики и широкого спектра доступных на сегодняшний день полимерных материалов. Это является катализатором развития области получения функциональных изделий из керамонаполненных филаментов [9–11].

В настоящей работе проведены исследования свойств полимер-керамического композиционного материала (ПККМ) на основе силиката циркония ($ZrSiO_4$), полученного методом FDM-печати. Исследована возможность изготовления керамического материала путем термического удаления полимера и спекания керамических частиц.

Материалы и методы исследования

В качестве исходного материала использовался коммерчески доступный филамент диаметром 1,75 мм на основе PLA, наполненного силикатом циркония ($ZrSiO_4$) от компании Virtual Foundry (США). Силикат циркония обладает уникальными тепловыми, механическими и диэлектрическими свойствами [12, 13]. ПККМ поставляется в катушках увеличенного диаметра, что снижает риск обрыва филамента в процессе хранения и 3D-печати. Такая мера обусловлена высокой долей керамического наполнителя (64–72 масс. %), которая повышает хрупкость материала. Высокое содержание керамики обеспечивает возможность получения керамических изделий путем проведения дополнительной термической обработки¹. Для исследования влияния керамических частиц на механические свойства материала был использован чистый PLA от компании U3print (Россия).

Исследование полимер-керамического материала проводилось с использованием оптического микроскопа Leica DMi8 (Германия), сканирующего электронного микроскопа Tescan Mira 3 (Чехия), дифференциального сканирующего калориметра Netzsch DSC 404 F3 (Германия) и термогравиметрического анализатора SETSYS Evolution 16 (Франция).

Изготовление образцов осуществлялось методом FDM-печати с использованием настольного 3D-принтера Anycubic Kobra 3 Combo (Китай). Основным требованием к оборудованию являлось наличие системы прямой подачи филамента для обеспечения минимального расстояния между механизмом податчика и соплом для печати. Такая компоновка наиболее предпочтительна при работе с композиционными и хрупкими материалами, склонными к образованию надломов и дефектов в процессе печати.

Ударные испытания полученных образцов проводились в соответствии с ГОСТ 4647-2015 на маятниковом копре Zwick Roell RKP-450 (Германия). Поверхностная твердость материала после 3D-печати была измерена на твердомере со шкалой Шора D согласно ГОСТ 24621-91. Для вычисления плотности ПККМ использовался метод гидростатического взвешивания. Измерения проводились на аналитических весах GR-202, как описано в ГОСТ 3 57713-207.

При работе с высоконаполненными полимерами после 3D-печати получают так называемую «зеленую» модель, из которой впоследствии возможно получение керамического изделия путем соответствующей постобработки. Проведение термической обработки полимер-керамических образцов для исследования возможности получения керамических изделий осуществлялось в вакуумной печи Siom (Китай) с возможностью нагрева до 1700°C.

Результаты и обсуждение

Первый этап работы заключался в анализе исходного материала. Сечение филамента имеет форму окружности и состоит из керамических частиц различной формы, содержащихся в полимерной матрице. Для определения основных температурных переходов был проведен ДСК

¹ The Virtual Foundry – SDS – Zirconium Silicate 24-01. Режим доступа: <https://thevirtualfoundry.com/wp-content/uploads/2025/04/The-Virtual-Foundry-SDS-Zirconium-Silicate-24-01.pdf> (дата обращения: 15.08.2025).

анализ (рис. 3). Пик температуры стеклования составил $62,5^{\circ}\text{C}$, а пик температуры плавления – 170°C . Полученные данные учитывались при подборе температурных параметров 3D-печати и режимов термической постобработки.

Следующий этап заключался в отработке параметров FDM-печати. В соответствии с рекомендациями производителя для печати образцов было использовано сопло диаметром 0,6 мм. Процесс отработки режимов для достижения наилучших результатов включал настройку таких параметров, как температура экструзии и температура печатной платформы, скорость печати, высота и ширина трека, а также коэффициент подачи материала (табл. 1).

Таблица 1

Параметры FDM-печати ПККМ

Table 1

FDM-printing parameters of PCCM

Температура экструзии, $^{\circ}\text{C}$	Температура платформы, $^{\circ}\text{C}$	Коэффициент подачи, %	Скорость печати, мм/с	Высота слоя, мм	Ширина трека, мм
210	55	1,3	20	0,2	0,6

Результаты исследования структуры «зеленой» модели, напечатанной с использованием оптимизированных параметров, показали широкое распределение керамических частиц по размеру (рис. 1). Преимущественно частицы имеют оскольчатую форму, что характерно для порошка, полученного механическим способом. Структура заполнения без ярко выраженных треков также может свидетельствовать о прочных межслойных связях ввиду отсутствия пор непосредственно между проходами. Средняя плотность ПККМ при этом составила $2,4 \text{ г/см}^3$.

Исследование механических свойств продемонстрировало увеличение ударных характеристик ПККМ и незначительное влияние наполнителя на поверхностную твердость образцов. На рис. 2 представлен 3D-печатный полимер-керамический образец до испытаний на удар и образец после удара. В табл. 2 приведены полученные в ходе механических испытаний значения для ПККМ и PLA. Из результатов испытаний видно, что наличие керамического наполнителя в материале приводит к увеличению ударной вязкости более чем на 30%. Структура излома, характерная для 3D-печатных образцов, свидетельствует об увеличении хрупкой фазы разрушения в сравнении с образцами из чистого PLA [14, 15]. Кроме того, отсутствие расслоений в месте излома говорит о прочной межслойной адгезии образцов в процессе удара.

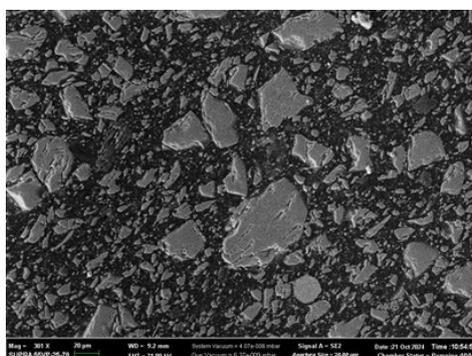


Рис. 1. Структура ПККМ после 3D-печати

Fig. 1. Structure of PCCM after 3D printing

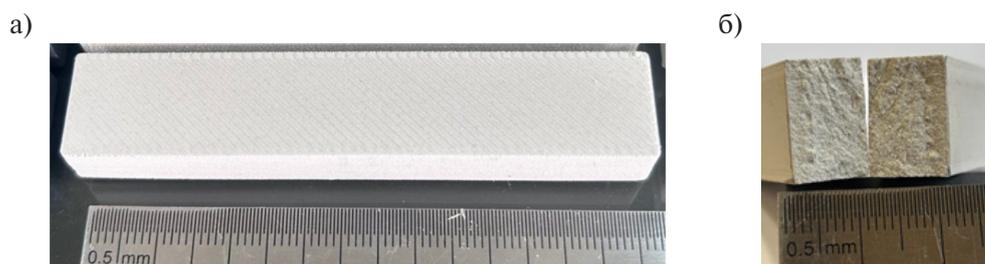


Рис. 2. Полимер-керамический образец для испытаний на удар:
а) образец до испытаний; б) образец после испытаний

Fig. 2. Polymer-ceramic sample for impact testing: a) sample before testing; b) sample after testing

Исследование возможности получения керамических изделий из силиката циркония с использованием полимер-керамического филамента заключалось в проведении термической постобработки путем удаления полимерного связующего и спекания керамических частиц. Температурные режимы для проведения термического удаления подбирались исходя из данных ТГА, ДСК анализов (рис. 3) и рекомендаций производителя. Параметры спекания силиката циркония были выбраны в соответствии со значениями изготовителя филамента.

Таблица 2

Результаты механических испытаний ПККМ

Table 2

Results of mechanical testing for PCCM

Ударная вязкость, кДж/м ²						
	1	2	3	Ср.		
PLA + ZrSiO ₄	18,7	21,8	20,6	20,3		
PLA	14,3	14,3	17,6	15,4		
Поверхностная твердость ПККМ						
	1	2	3	4	5	Ср.
PLA + ZrSiO ₄	74	72	72	74	73	73
PLA	79	76	78	76	75	76,8

Исходя из зависимости потери массы от температуры можно сделать вывод о незначительном расхождении данных производителя с фактическими, при этом массовая доля наполнителя в исследуемом материале составила 78 масс %².

Для оценки влияния геометрических параметров на качество получаемых керамических изделий были напечатаны образцы различной высоты – от 1 до 5 мм с шагом 1 мм (рис. 4). Термическое удаление связующего проводилось в вакууме с целью уменьшения возможности возникновения дефектов в процессе нагрева. Для удаления связующего образцы нагревали до 450°С при скорости нагрева 0,5°С/мин и выдерживали 2 часа. После этого производился процесс спекания при температуре 1550°С в течение 1 часа.

Результаты показали незначительное влияние толщины образцов на образование деформаций в процессе удаления полимера и спекания керамики (рис. 4). Объемная усадка на основе

² The Virtual Foundry – SDS – Zirconium Silicate 24-01. Режим доступа: <https://thevirtualfoundry.com/wp-content/uploads/2025/04/The-Virtual-Foundry-SDS-Zirconium-Silicate-24-01.pdf> (дата обращения: 15.08.2025).

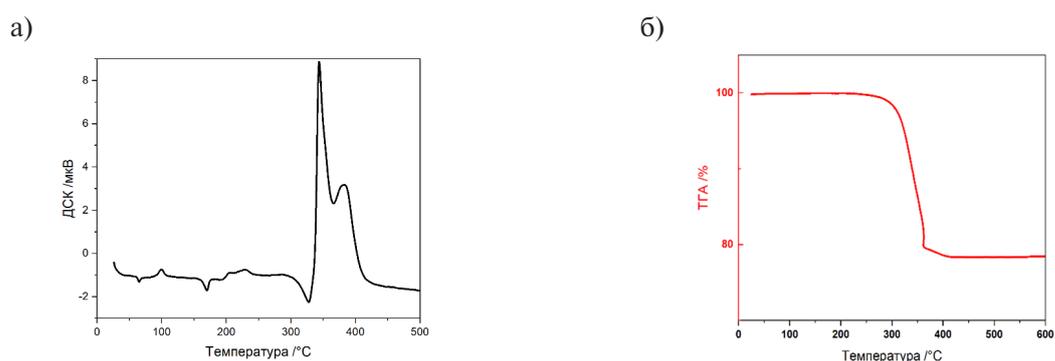


Рис. 3. Результаты термического анализа для ПККМ: а) данные ДСК анализа; б) данные ТГА анализа
 Fig. 3. Thermal analysis results for PCCM: a) DSC analysis data; b) TGA analysis data

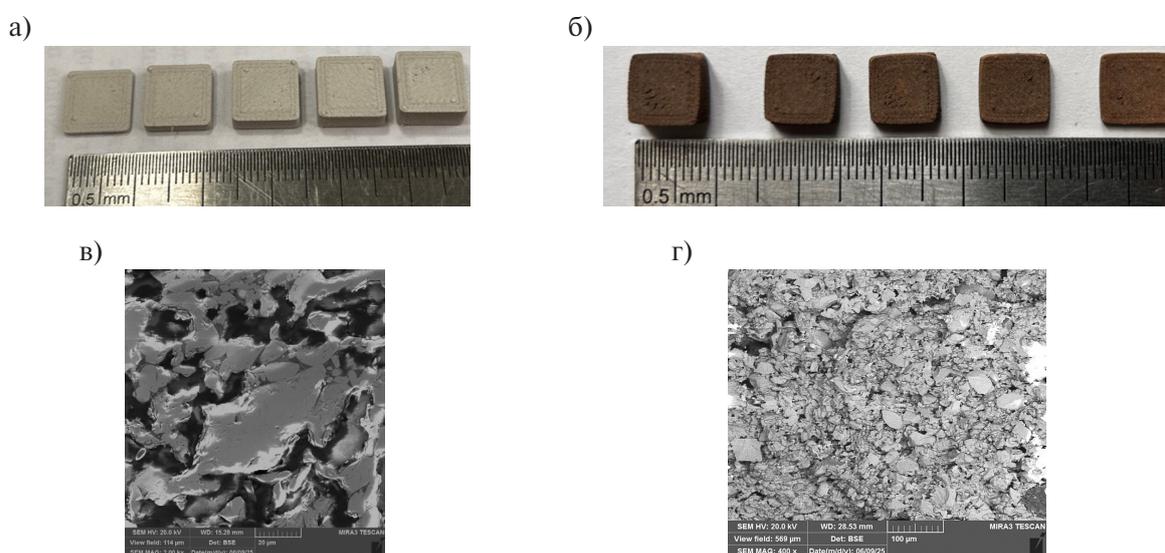


Рис. 4. Образцы из ПККМ до и после обработки: а) образцы после 3D-печати; б) керамические образцы после удаления связующего и спекания; в) поперечное сечение образца; г) излом образца
 Fig. 4. Samples of PCCM before and after processing: a) 3D-printed samples; б) ceramic samples after debinding and sintering; в) cross-section of the sample; г) fracture of the sample

измерений геометрических параметров образцов до и после обработки составила около 30%. Анализ структуры полученного керамического материала выявил образование пор и неспеченных участков преимущественно в центральной части образцов. Однако детальное исследование позволило локализовать зоны спекания, что свидетельствует о возможности уменьшения количества пор после настройки параметров процесса постобработки.

Заключение

В ходе исследования установлено, что FDM-печать с использованием филамента на основе $ZrSiO_4$ позволяет получать полимер-керамические материалы с повышенными механическими свойствами. Добавление керамического наполнителя способствует увеличению ударной вязкости и сохранению прочных межслойных связей. Термическое удаление связующего и последующее спекание подтвердили возможность получения керамики, однако выявлено образование пор преимущественно в центральной части образцов. Для улучшения качества керамики требуется дальнейшая настройка режимов постобработки.

Полученные результаты подтверждают потенциал использования технологии FDM-печати ПКМ для практических применений. Такие материалы могут применяться для создания изделий с заданными свойствами. В частности, для получения полимер-керамических диэлектрических компонентов радиотехнического оборудования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Srivastava M., Rathee S.** Additive manufacturing: Recent trends, applications and future outlooks, *Progress in Additive Manufacturing*, 7 (2022) 261–287. DOI: 10.1007/s40964-021-00229-8
- [2] **Zhou L., Miller J., Vezza J., Mayster M., Raffay M., Justice Q., Al Tamimi Z., Hansotte G., Sun-kara L.D., Bernat J.** Additive manufacturing: A comprehensive review, *Sensors*, 24 (9) (2024) 2668. DOI: 10.3390/s24092668
- [3] **Satish Prakash K., Nancharaih T., Subba Rao V.V.** Additive manufacturing techniques in manufacturing – An overview, *Materials Today: Proceedings*, 5 (2(1)) (2018) 3873–3882. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.11.642
- [4] **Bhatia A., Sehgal A.K.** Additive manufacturing materials, methods and applications: A review, *Materials Today: Proceedings*, 81 (2) (2023) 1060–1067. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.04.379
- [5] **Doshi M., Mahale A., Singh S.K., Deshmukh S.** Printing parameters and materials affecting mechanical properties of FDM-3D printed Parts: Perspective and prospects, *Materials Today: Proceedings*, 50 (5) (2022) 2269–2275. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.10.003
- [6] **Rane K., Strano M.** A comprehensive review of extrusion-based additive manufacturing processes for rapid production of metallic and ceramic parts, *Advances in Manufacturing*, 7 (2019) 155–173. DOI: 10.1007/s40436-019-00253-6
- [7] **Ramazani H., Kami A.** Metal FDM, a new extrusion-based additive manufacturing technology for manufacturing of metallic parts: A review, *Progress in Additive Manufacturing*, 7 (2022) 609–626. DOI: 10.1007/s40964-021-00250-x
- [8] **Zaitceva M., Sotov A., Popovich A., Sufiiarov V.** Stainless steel 316L fabricated by fused deposition modeling process: microstructure, geometrical and mechanical properties, *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 8 (6) (2024) 259. DOI: 10.3390/jmmp8060259
- [9] **Zaytsev A.I., Sotov A.V., Abdrahmanova A.E., Popovich A.A.** Additive manufacturing of polymer-ceramic materials using fused deposition modeling (FDM) technology: A review, *Powder Metallurgy and Functional Coatings (Izvestiya Vuzov. Poroshkovaya Metallurgiya i Funktsional'nye Pokrytiya)*, 18 (6) (2024) 77–88. DOI: 10.17073/1997-308X-2024-6-77-88
- [10] **Sofokleous P., Paz E., Herraiz-Martínez F.J.** Design and manufacturing of dielectric resonators via 3D printing of composite polymer/ceramic filaments, *Polymers*, 16 (18) (2024) 2589. DOI: 10.3390/polym16182589
- [11] **Smirnov A., Nikitin N., Peretyagin P., Khmyrov R., Kuznetsova E., Solis Pinargote N.W.** Experimental and statistical modeling for effect of nozzle diameter, filling pattern, and layer height of FDM-printed ceramic–polymer green body on biaxial flexural strength of sintered alumina ceramic, *Journal of Composites Science*, 7 (9) (2023) 381. DOI: 10.3390/jcs7090381
- [12] **Zaharin M., Ku Ahmad K., Othman R., Yahaya R., Tarawneh M.** Effect of zirconium silicate content on dielectric and mechanical properties of polyurethane elastomer, *Journal of Advanced Manufacturing Technology (JAMT)*, 17 (2) (2023).
- [13] **Nakamori F., Ohishi Y., Muta H., Kurosaki K., Fukumoto K.-i., Yamanaka S.** Mechanical and thermal properties of ZrSiO₄, *Journal of Nuclear Science and Technology*, 54 (11) (2017) 1267–1273. DOI: 10.1080/00223131.2017.1359117

[14] **Mishra P.K., P. Senthil, S. Adarsh, M.S.** Anoop, An investigation to study the combined effect of different infill pattern and infill density on the impact strength of 3D printed polylactic acid parts, *Composites Communications*, 24 (2021) 100605. DOI: 10.1016/j.coco.2020.100605

[15] **Tunçel O.** Optimization of Charpy impact strength of tough PLA samples produced by 3D printing using the Taguchi method, *Polymers*, 16 (4) (2024) 459. DOI: 10.3390/polym16040459

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЗАЙЦЕВ Александр Ильич – инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: zaytsev.alexander2011@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3138-8365>

СОТОВ Антон Владимирович – ведущий научный сотрудник, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: sotovanton@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7303-5912>

АБДРАХМАНОВА Анна Эдуардовна – инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: abdrahmanova.an@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4494-7300>

ПОПОВИЧ Анатолий Анатольевич – директор ИММТ, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.

E-mail: popovicha@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5974-6654>

REFERENCES

[1] **M. Srivastava, S. Rathee**, Additive manufacturing: Recent trends, applications and future outlooks, *Progress in Additive Manufacturing*, 7 (2022) 261–287. DOI: 10.1007/s40964-021-00229-8

[2] **L. Zhou, J. Miller, J. Vezza, M. Mayster, M. Raffay, Q. Justice, Z. Al Tamimi, G. Hansotte, L.D. Sun-kara, J. Bernat**, Additive manufacturing: A comprehensive review, *Sensors*, 24 (9) (2024) 2668. DOI: 10.3390/s24092668

[3] **K. Satish Prakash, T. Nancharaih, V.V. Subba Rao**, Additive manufacturing techniques in manufacturing – An overview, *Materials Today: Proceedings*, 5 (2(1)) (2018) 3873–3882. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.11.642

[4] **A. Bhatia, A.K. Sehgal**, Additive manufacturing materials, methods and applications: A review, *Materials Today: Proceedings*, 81 (2) (2023) 1060–1067. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.04.379

[5] **M. Doshi, A. Mahale, S.K. Singh, S. Deshmukh**, Printing parameters and materials affecting mechanical properties of FDM-3D printed Parts: Perspective and prospects, *Materials Today: Proceedings*, 50 (5) (2022) 2269–2275. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.10.003

[6] **K. Rane, M. Strano**, A comprehensive review of extrusion-based additive manufacturing processes for rapid production of metallic and ceramic parts, *Advances in Manufacturing*, 7 (2019) 155–173. DOI: 10.1007/s40436-019-00253-6

[7] **H. Ramazani, A. Kami**, Metal FDM, a new extrusion-based additive manufacturing technology for manufacturing of metallic parts: A review, *Progress in Additive Manufacturing*, 7 (2022) 609–626. DOI: 10.1007/s40964-021-00250-x

- [8] **M. Zaitceva, A. Sotov, A. Popovich, V. Sufiiarov**, Stainless steel 316L fabricated by fused deposition modeling process: microstructure, geometrical and mechanical properties, *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 8 (6) (2024) 259. DOI: 10.3390/jmmp8060259
- [9] **A.I. Zaytsev, A.V. Sotov, A.E. Abdrahmanova, A.A. Popovich**, Additive manufacturing of polymer-ceramic materials using fused deposition modeling (FDM) technology: A review, *Powder Metallurgy and Functional Coatings (Izvestiya Vuzov. Poroshkovaya Metallurgiya i Funktsional'nye Pokrytiya)*, 18 (6) (2024) 77–88. DOI: 10.17073/1997-308X-2024-6-77-88
- [10] **P. Sofokleous, E. Paz, F.J. Herraiz-Martínez**, Design and manufacturing of dielectric resonators via 3D printing of composite polymer/ceramic filaments, *Polymers*, 16 (18) (2024) 2589. DOI: 10.3390/polym16182589
- [11] **A. Smirnov, N. Nikitin, P. Peretyagin, R. Khmyrov, E. Kuznetsova, N.W. Solis Pinargote**, Experimental and statistical modeling for effect of nozzle diameter, filling pattern, and layer height of FDM-printed ceramic–polymer green body on biaxial flexural strength of sintered alumina ceramic, *Journal of Composites Science*, 7 (9) (2023) 381. DOI: 10.3390/jcs7090381
- [12] **M. Zaharin, K. Ku Ahmad, R. Othman, R. Yahaya, M. Tarawneh**, Effect of zirconium silicate content on dielectric and mechanical properties of polyurethane elastomer, *Journal of Advanced Manufacturing Technology (JAMT)*, 17 (2) (2023).
- [13] **F. Nakamori, Y. Ohishi, H. Muta, K. Kurosaki, K.-i. Fukumoto, S. Yamanaka**, Mechanical and thermal properties of ZrSiO₄, *Journal of Nuclear Science and Technology*, 54 (11) (2017) 1267–1273. DOI: 10.1080/00223131.2017.1359117
- [14] **P.K. Mishra, P. Senthil, S. Adarsh, M.S. Anoop**, An investigation to study the combined effect of different infill pattern and infill density on the impact strength of 3D printed polylactic acid parts, *Composites Communications*, 24 (2021) 100605. DOI: 10.1016/j.coco.2020.100605
- [15] **O. Tunçel**, Optimization of Charpy impact strength of tough PLA samples produced by 3D printing using the Taguchi method, *Polymers*, 16 (4) (2024) 459. DOI: 10.3390/polym16040459

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Alexander I. ZAYTSEV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: zaytsev.alexander2011@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3138-8365>

Anton V. SOTOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: sotovanton@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7303-5912>

Anna E. ABDRAKHMANOVA – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: abdrahmanova.an@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4494-7300>

Anatoliy A. POPOVICH – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: popovicha@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5974-6654>

Поступила: 20.09.2025; Одобрена: 10.10.2025; Принята: 10.10.2025.

Submitted: 20.09.2025; Approved: 10.10.2025; Accepted: 10.10.2025.