Материалы и покрытия, получаемые методами аддитивных технологий Materials and Coatings Fabricated Using the Additive Manufacturing Technologies



**УДК** 621.763

https://doi.org/10.17073/1997-308X-2024-6-77-88

Обзорная статья Review article



# Аддитивное производство полимер-керамических материалов методом послойного наплавления материала (FDM-технология): Обзор

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

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29

### 🖂 zajtsev\_ai2@spbstu.ru

- Аннотация. Технологии аддитивного производства, также известные как 3D-печать, находятся в фазе активного развития и набирают широкую популярность, заменяя и дополняя при этом традиционные способы производства. Особое внимание уделяется получению изделий из металлических, керамических, полимерных и композиционных материалов. Среди 7 общепринятых методов аддитивного производства отдельно выделяют экструзию материала (*material extrusion* MEX), которая включает в себя технологию послойного наплавления материала (FDM). Повышенное внимание к ней объясняется доступностью оборудования и возможностью использования широкого спектра исходных материалов (от ставших классическими полимеров PLA, PETG и др. до композиционных материалов, в том числе метало- и керамонаполненных нитей). Цель настоящей работы заключалась в систематизации и обобщении существующих знаний о процессе изготовления полимеркерамических изделий с использованием керамонаполеннных филаментов. Представлен анализ основных этапов производства производства, выбора исходных материалов, получения филамента и процесса 3D-печати. Рассмотрены области исследований и потенциальные сферы применения.
- **Ключевые слова:** аддитивное производство, 3D-печать, FDM-технология, полимер-керамические материалы, наполненный филамент

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. Аддитивное производство полимер-керамических материалов методом послойного наплавления материала (FDM-технология): Обзор. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия.* 2024;18(6):77–88. https://doi.org/10.17073/1997-308X-2024-6-77-88

# Additive manufacturing of polymer-ceramic materials using fused deposition modeling (FDM) technology: A review

## A. I. Zaytsev<sup>20</sup>, A. V. Sotov, A. E. Abdrahmanova, A. A. Popovich

### Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

29 Polytechnicheskaya Str., St.Petersburg 195251, Russia

#### 💌 zajtsev\_ai2@spbstu.ru

**Abstract.** Additive manufacturing technologies, also known as 3D printing, are currently undergoing rapid development and gaining wide popularity, complementing and, in some cases, replacing traditional manufacturing methods. Particular attention is being paid to the fabrication of products from metallic, ceramic, polymeric, and composite materials. Among the seven commonly recognized methods of additive manufacturing, material extrusion stands out, which includes the Fused Deposition Modeling (FDM) technology. The heightened interest in FDM is due to the accessibility of equipment and the wide range of starting materials available, ranging from classic polymers such as PLA and PETG to composite materials, including metal- and ceramic-filled filaments. The objective of this



study was to systematize and summarize the existing knowledge on the fabrication process of polymer-ceramic products using ceramicfilled filaments. The paper provides an analysis of the main stages of production, including material selection, filament fabrication, and the 3D printing process. Areas of research and potential applications are also examined.

Keywords: additive manufacturing, 3D-printing, FDM technology, polymer-ceramic materials, filled filament

Acknowledgements: This research was supported by a grant from the St. Petersburg Science Foundation, Agreement No 23-RB-0939.

For citation: 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*. 2024;18(6):77–88. https://doi.org/10.17073/1997-308X-2024-6-77-88

### Введение

В последние десятилетия наблюдается интенсивный рост в области разработки новых материалов и методов производства. Это способствует активному развитию технологий аддитивного производства (АП), или 3D-печати, которые относятся к передовым процессам изготовления, способным частично заменить или оптимизировать традиционные производственные процессы [1-4]. Их преимуществом является уменьшение количества отходов материала при производстве путем выращивания изделий различной геометрии по слоям. Принцип построения слоя за слоем позволяет создавать сложнопрофильные изделия в рамках одной технологической операции. Благодаря технологиям АП ученые и инженеры создают уникальные разработки с использованием современных материалов и передовых технологических решений [5-9]. Одним из них является внедрение процессов АП с возможностью получения изделий из полимер-керамических материалов [10], интерес к которым обусловлен достоинствами полимеров, гибкостью производства, а также уникальными преимуществами керамики, такими как высокие прочность, твердость, электрические свойства и др.

В настоящем обзоре подробно рассмотрен процесс получения полимер-керамических композитов (ПКК) с использованием FDM-технологии – послойного наплавления материала (рис. 1). Представлено краткое описание метода 3D-печати полимер-керамическими материалами. Проведен анализ процесса получения керамонаполненного филамента, описаны особенности последующей FDM-печати, отражены тенденции развития в области исследования и производства изделий из ПКК методом 3D-печати и сделаны выводы о состоянии области FDM-печати полимер-керамических материалов на сегодняшний день.

# Технологии 3D-печати полимер-керамическими материалами

Изготовление полимер-керамических изделий находится на стадии развития благодаря прогрессу в области разработки и внедрения новых материалов, конструкций и составных частей функциональных изделий. К традиционным способам производства относится хорошо известный процесс литья под давлением [11–13]. Среди методов АП для получения ПКК существуют такие технологии, как FDM, SLA (стереолитография) [14–17] и др. [18; 19].

Метод FDM-печати известен с конца XX в., когда компания «Stratasys» (США) запатентовала процесс 3D-печати под названием «моделирование методом послойного наплавления» [20; 21]. Его суть заключается в последовательном наплавлении слоев разогретого до вязкотекучего состояния филамента, который



*Рис.* 1. Основные стадии производства керамонаполненного филамента: от выбора сырья до конечного изделия *Fig.* 1. Key stages in ceramic-filled filament production, from raw material selection to final product

послойно подается через сопло [22]. На сегодняшний день существует достаточно большое количество коммерчески доступных машин, базирующихся на данной технологии. Зачастую подобные установки для 3D-печати представлены в виде настольных систем, для которых характерно выращивание изделия по слоям в плоскости платформы построения. Подобные установки для FDM-печати подразделяются на 2 типа подачи материала в зависимости от расположения податчиков:

 – директ-экструдер, когда податчик закреплен на печатающей голове;

– боуден-экструдер, при котором податчик закреплен на корпусе принтера и материал подается по специальному каналу до печатающей головы [23–25].

Первая система подачи предпочтительнее при использовании с гибкими, хрупкими и композиционными материалами, поскольку в ходе процесса уменьшается риск засорения сопла и деформации полимера в канале подачи.

В качестве исходных материалов в FDM-технологии применяются специальные полимерные нити (филаменты) различных диаметров в зависимости от параметров оборудования. На сегодняшний день существует большое количество производителей, которые предлагают как классические полимеры для 3D-печати, так и современные материалы с улучшенным составом, которые обладают повышенными механическими характеристиками, улучшенной износоустойчивостью, эффектом памяти формы, более высокой рабочей температурой. Также продолжаются работы по улучшению существующих термопластичных филаментов для FDM-печати и разработке новых улучшенных составов на базе различных типов материалов [26–28].

# Особенности получения керамонаполненного филамента

Получение филамента является одним из ключевых этапов при изготовлении изделий из ПКК. Этот процесс считается определяющим при прогнозировании свойств будущих изделий и непосредственно влияет на весь цикл производства – от стадии 3D-печати до получения конечного продукта.

На первоначальной стадии осуществляется выбор материала матрицы и функционального наполнителя в соответствии с требуемыми характеристиками конечного изделия. Полимерной основой в большинстве случаев служат распространенные в FDM-печати термопластичные материалы, такие как полимолочная кислота (PLA) [29; 30], акрилонитрилбутадиенстирол (ABS) [31; 32] и другие реже встречающиеся составы: полиэтилентерефталат гликоль (PETG) [33; 34], полиамид-12 (PA 12) [35; 36].

В роли керамических наполнителей часто применяют техническую керамику, такую как оксиды алюминия (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), кремния (SiO<sub>2</sub>), циркония (ZrO<sub>2</sub>) и титана (TiO<sub>2</sub>), а также карбид кремния (SiC) и др. [12; 37]. Эти материалы получили широкое распространение благодаря уникальным физико-механическим, электрическим и тепловым свойствам. Помимо перечисленных добавок также используют порошки пьезокерамики – титанаты бария (ВаТіО,) и стронция (BaSrTiO<sub>3</sub>), которые позволяют улучшить электрические характеристики. На стадии подбора материалов помимо состава добавок определяется фракция керамического порошка, от которой будут зависеть как свойства ПКК, так и качество 3D-печати. В табл. 1 представлены различные комбинации материалов керамонаполненных филаментов (коммерчески доступных и полученных в рамках исследовательских работ).

После выбора необходимого состава сырья следуют подготовка ПКК и производство филамента. К основным этапам данного процесса относятся получение композитной смеси и изготовление керамонаполненного филамента для 3D-печати. Подготовительные и промежуточные шаги зачастую включают в себя удаление влаги из исходных составов. Кроме того, для обеспечения сцепления керамических частиц с полимером и лучшего диспергирования используют различные добавки, такие как ацетон, стеариновая кислота и др. (см. табл. 1).

Описанный процесс получения керамонаполненного филамента подробно представлен в исследовательских работах многих научных коллективов. Например, авторы [40] из греческого Института нанонауки и нанотехнологий (Institute of Nanoscience and Nanotechnology, N.C.S.R. Demokritos) получали композитную нить из гранул PLA («Gorinchem», Нидерланды), которые использовались в качестве матрицы, а также порошка SiC (размер зерен 8,3 мкм) («Struers», Дания). Гранулы полимерного материала были предварительно просушены, а затем перемешаны с керамическим порошком. Для обеспечения адгезии между гранулами и керамическими частицами был добавлен ацетон. Далее следовала сушка подготовленной смеси (t = 100 °C, τ = 24 ч). Полученное сырье пропускалось через одношнековый экструдер («Felfil Evo», Италия) при  $t = 185 \div 195$  °C. В результате было получено 5 типов композитов диаметром 1,75 мм с различным содержанием SiC (от 1 до 3 мас. %).

Аналогичная комбинация материалов была выбрана командой ученых из Технологического института Стивенса (Department of Mechanical Engineering, Stevens Institute of Technology, Нью-Джерси, США) [39]. Однако в качестве исходного сырья вместо полимерных гранул были использо-



### Таблица 1. Результаты анализа процесса получения керамонаполненного филамента Table 1. Results of analyzing the process of producing ceramic-filled filament

Полимер	Керамика	Краткое описание технологии экструзии филамента	Лит. ист.
PLA	ZrO <sub>2</sub>	Материал от компании «Zetamix» (Франция)	[38]
	SiC	<i>Исходные материалы:</i> порошки PLA (размер 74 мкм) и SiC (15 мкм). Порошки просушивали при $t = 70$ °C в течение 4 ч, затем перемешивали во вращающемся стакане со скоростью 64 об/мин с добавлением стальных шаров для лучшего диспер- гирования. Для производства филамента использовали одношнековый экструдер. Температура расплава – 180 °C, скорость вращения шнека – 35 об/мин. Получены различные филаменты с различным содержанием SiC: 10, 20, 30 и 40 мас. %. Проведено сравнение с чистым PLA и PLA с добавлением графита (C) или смеси SiC + C	[39]
		Исходные материалы: гранулы PLA и порошок SiC (8,3 мкм). Гранулы PLA просушивали при $t = 100$ °C в течение 24 ч и перемешивали при $t = 75$ °C с добавлением ацетона. Полученную смесь подвергали сушке при 100 °C в течение 24 ч. Филамент получали в одношнековом экструдере. Температура экструзии 185–195 °C, скорость экструзии – 50 см/мин. Получены пять типов композитов с различным содержанием SiC: 1,0, 1,5, 2,0, 2,5 и 3,0 мас. %	[40]
	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Керамонаполненный филамент изготовлен из PLA/Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> в массовом соотношении 95/5 с применением двухшнекового экструдера	[12]
ABS	BaSrTiO <sub>3</sub>	Исходные материалы: гранулы ABS и керамический порошок BaSrTiO <sub>3</sub> . Грануль ABS растворяли в ацетоне с массовым соотношением 1/1,5. Полученную смеси замешивали с керамическим порошком, заливали в формы и сушили при комнатной температуре в течение 48 ч. Полученные композиты гранулировали и сушили при $t = 80$ °C в течение 48 ч. Получение филамента осуществляли с помощью экструдера при 220 °C и 60 об/мин. Максимальная массовая доля керамического порошка составила 50,27 %	
	BaTiO <sub>3</sub>	Исходные материалы: гранулы ABS и керамический порошок $BaTiO_3$ (3 мкм). Гранулы ABS замешивали с частицами $BaTiO_3$ в объемных соотношениях 10, 20, 30, 35, 40, 45 и 50 % с добавлением 1,1 мас. % стериновой кислоты в качестве поверхностно-активного вещества. Полученное сырье сушили в течение 24 ч при $t = 130$ °C. Филамент получали с помощью одношнекового экструдера Noztek Pro (Англия) при температуре в диапазоне от 185 до 210 °C	[42]
		<i>Исходные материалы:</i> гранулы ABS и микрочастицы BaTiO <sub>3</sub> (<3 мкм). Гранулы ABS растворяли в ацетоне, затем добавляли титанат бария. Полученную суспензию оставляли в специальных формах для испарения ацетона. Затвердевшие листы композита измельчали и просушивали при $t = 70$ °C. Получение филамента осуществляли с помощью одношнекового экструдера Noztek Pro при $t = 190\div210$ °C	[43]
		<i>Исходные материалы:</i> гранулы ABS и микрочастицы BaTiO <sub>3</sub> . В качестве поверхностно- активного вещества и пластификатора использовали октилгаллат и дибутилфталат. Получение филамента основано на опыте предыдущей работы Castles F. и др. [43]	[44]
PETG	TiO <sub>2</sub>	Керамонаполненный филамент подготовлен в сотрудничестве с компанией «Prusa Polymers» (Чехия). Исходные материалы: гранулы PETG и частицы TiO <sub>2</sub> (50–300 мкм). Гранулы PETG смешивали с керамическими частицами и расплавляли для последующей гомогенизации. С помощью шнекового экструдера были получены композитные филаменты с различным массовым содержанием TiO <sub>2</sub> – 10 и 20 %	
PA12	ZrO <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Uсходные материалы: гранулы PA12, порошки Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , ZrO <sub>2</sub> . Проводили двухэтапную модификацию поверхности керамических порошков: травление и химическое воздействие. Предварительно материалы подвергали сушке: PA12 при $t = 50$ °C в течение 10 ч, а порошки керамики при 150 °C. Для компаундирования использовали двухшнековый экструдер, для получения филамента – одношнековый («Dr. Collin GmbH», Германия)	
PMMA	ZrO <sub>2</sub>	ZrO2         Исходные материалы: РММА и наночастицы ZrO2 (20–80 нм). Предварительно материалы подвергали сушке при 100 °С в течение 2 ч. Получение филамента осуществляли с помощью одношнекового экструдера («Haake Rheomix 252p», Thermo Fisher Scientific, США)	



ваны порошки PLA (74 мкм) и SiC (15 мкм). Перед дальнейшей обработкой материалы были предварительно просушены при t = 70 °C в течение 4 ч. Перемешивание осуществлялось во вращающемся стакане с использованием шаров из хромовой стали. Получение филамента проводилось на одношнековом экструдере. Для дальнейшего изучения дисперсии SiC в PLA были проанализированы образцы филамента, содержащие 50 мас. % SiC. На основе анализа изображения (рис. 2) сделан вывод о достаточном диспергировании частиц SiC в матрице PLA, поскольку исходный порошок SiC имел размер частиц 15 мкм, а согласно изображению сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) установлено значительное уменьшение фракции керамического порошка до 5 мкм в ходе перемешивания.

Похожий способ изготовления нити применялся в исследовании [45], где ученые из Чешского технического университета Праги (Department of Electrotechnology, Faculty of Electrical Engineering, Czech Technical University in Prague) в качестве исходного сырья использовали гранулы РЕТС и порошок  $TiO_2$  (50–300 мкм). Для производства образцов были получены филаменты с различным содержанием  $TiO_2$ . В двух случаях РЕТС был наполнен диоксидом титана (10 и 20 мас. %) для увеличения диэлектрической проницаемости, в то время как третий филамент представлял собой чистый РЕТС (рис. 3).

Особенности процесса могут заключаться в способах приготовления композитной смеси в зависимости от исходных компонентов. Так, в работе [41] описан отличный от предыдущих исследований метод получения полимер-керамического состава. Ученые из Великобритании смешивали гранулы ABS с ацетоном,



Рис. 2. СЭМ-изображение поперечного сечения керамического филамента на основе PLA с содержанием SiC 50 мас. % [39]

*Fig. 2.* SEM image of the cross-section of PLA-based ceramic filament containing 50 wt. % SiC [39]



**Рис. 3.** Изображения филаментов, полученные с помощью микроскопа [45] *I* – чистый РЕТG; *2* – РЕТG + 10 мас. % TiO<sub>2</sub>; *3* – РЕТG + 20 мас. % TiO<sub>2</sub>

Fig. 3. Microscope images of filaments produced [45]  $1 - \text{pure PETG}; 2 - \text{PETG} + 10 \text{ wt. }\% \text{ TiO}_2;$  $3 - \text{PETG} + 20 \text{ wt. }\% \text{ TiO}_2$ 

растворяя тем самым полимер для получения вязкой смеси. К полученному раствору добавляли пьезокерамический порошок BaSrTiO<sub>3</sub> (размер частиц менее 0,5 мкм) и смешивали в течение 10 мин. Полученные композитные смеси заливали в специальные формы, в которых осуществлялось полное застывание в течение 48 ч. После этого композиты подвергали механическому гранулированию, дополнительной сушке и экструзии для получения филамента.

Таким образом, представленный в данном разделе анализ отражает сущность процесса получения керамонаполненного филамента с использованием различных технологических особенностей и материалов. Описанный подход применим для работы с различными комбинациями полимерных и керамических составов, что делает его наиболее универсальным и распространенным.

## Особенности процесса 3D-печати

Процесс 3D-печати керамонаполненными филаментами сопровождается рядом технологических особенностей, которые связаны как со спецификой оборудования, так и со сложностью использования наполненных, а в особенности высоконаполненных, полимеров. Частицы, которые содержатся в составе филамента, делают его более хрупким и подверженным образованию засора сопла и обрывов во время печати [48; 49]. Решение этой и других проблем, связанных с 3D-печатью ПКК, возможно при ведении процесса в оптимальных условиях, к которым



Матариал	Содержание	Температура	Скорость	Диаметр	Высота	Лит.
Материал	керамики, мас. %	печати, °С	печати, мм/с	сопла, мм	слоя, мм	источник
PLA/ZrO <sub>2</sub>	86	190	40	0,60	0,20	[38]
ABS/BaSrTiO <sub>3</sub>	50	250	40	0,55	0,10	[41]
PETG/TiO <sub>2</sub>	10 и 20	250	—	0,40	0,15	[45]
PLA/Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	5, 10 и 15	200	40	0,40	0,15	[12]
PLA/SiC	1–3	200-210	50	1,00	_	[40]
ABS/керамика («Premix Oy»)	_	260	10–20	0,50	0,30	[54]

Таблица 2. Основные параметры FDM-печати керамонаполненными филаментами Table 2. Key parameters of FDM printing with ceramic filaments

относят температуру и скорость печати, высоту слоя, коэффициент подачи и др. [50–53] (табл. 2).

В работе [54] приводятся результаты исследований основных режимов процесса FDM-печати, таких как скорость печати, ширина трека, высота слоя, структура заполнения (рис. 4). Изучено влияние данных характеристик на диэлектрические свойства и качество получаемых изделий. Установлено, что скорость печати оказывает значительное влияние на межслойную адгезию, сцепление материала с платформой построения. На основе представленных на рис. 4, *а* снимков можно сделать вывод о значительном влиянии скорости печати на качество поверхности и образование пор, что напрямую определяет конечные свойства получаемых изделий. Диапазон скоростей 10–20 мм/с показал наилучшее качество печати без видимых дефектов.

С использованием указанных параметров были подготовлены образцы для измерения диэлектрических характеристик. Результаты показали значительное снижение диэлектрической проницаемости ( $\varepsilon_r = 7,38$ ) по сравнению с образцом, который был получен методом литья под давлением ( $\varepsilon_r = 10$ ). Для выявления причины сильного расхождения было про-



**Рис. 4.** Результаты исследования влияния параметров печати на качество образцов и диэлектрические свойства [54] *а* – влияние скорости печати на качество образцов; *б* и *в* – влияние ширины экструзии на расстояние между треками и диэлектрические свойства; *с* и *д* – влияние высоты слоя и коэффициента заполнения на диэлектрические свойства

*Fig. 4.* Research results on the influence of printing parameters on sample quality and dielectric properties [54] a – influence of printing speed on sample quality;  $\delta$  and e – influence of extrusion width on track spacing and dielectric properties; c and  $\partial$  – layer height and material infill on dielectric properties

ведено исследование поверхности образцов с помощью оптического микроскопа, в ходе которого обнаружены воздушные зазоры между треками. Решение заключалось в уменьшении ширины экструзии с 0,5 до 0,45 мм (рис. 4, e), что поспособствовало увеличению относительной диэлектрической проницаемости и уменьшению тангенса угла потерь (tan  $\delta$ ). В свою очередь, исследование влияния высоты слоя на диэлектрические характеристики показало (рис. 4, e), что с увеличением высоты слоя возрастают диэлектрические свойства. Также установлено, что изменение коэффициента заполнения материала позволяет эффективно контролировать диэлектрические свойства 3D-печатных структур (рис. 4, d).

Многие исследования выполняются с использованием коммерчески доступных настольных FDM-принтеров. Например, в работе [45] изготовление образцов из полимера PETG, наполненного частицами ТіО, (10 и 20 мас. %), выполнялось на 3D-принтере I3 MK3S («PRUSA Research», Чехия), который оснащен директ-экструдером. Для изготовления образцов применялось сопло диаметром 0,4 мм, что позволило осуществлять печать с толщиной слоя 0,15 мм при 100 %-ном коэффициенте заполнения для получения высокой плотности и уменьшения количества пор. Оборудование той же компании было выбрано в исследовании [38] для изготовления образцов из различных материалов, в том числе из PLA с 50 %-ным содержанием частиц ZrO<sub>2</sub>, а также полиолефина с различным содержанием ТіО. В этом случае было использовано сопло диаметром 0,6 мм, а высота слоя составляла 0,2 мм.

Анализ опубликованных исследований показал, что сопла с большим диаметром используются чаще. Это связано с особенностью печати наполненными полимерами и их способностью к постепенному засорению сопла. Наиболее распространенные в FDMпечати латунные сопла подвержены быстрому износу под воздействием керамических частиц. Исходя из этого, исследователи чаще выбирают износостойкие сопла. Кроме того, диаметр сопла влияет на равномерность подачи материала, как следствие, его увеличение уменьшает риски возникновения дефектов (поры, трещины), которые могут быть вызваны неоднородностью материала.

# Применение

Работы в области изготовления изделий из полимер-керамических филаментов можно разделить на 3 направления:

исследование и улучшение диэлектрических свойств;

 изучение влияния керамических наполнителей на механические свойства;  получение керамических изделий из высоконаполненных полимер-керамических филаментов.

Значительная часть научных работ в области разработки и исследования ПКК, полученного на FDM-принтере, посвящена изучению диэлектрических свойств. Это связано с простотой изготовления, широким спектром применения напечатанных изделий, а также развитием сферы 3D-печатной электроники. Известно, что полимеры, полученные методом 3D-печати, используются в качестве изоляторов [55]. Добавление проводящих углеродных волокон или металлических частиц, напротив, дает возможность создавать функциональные изделия, проводящие электрический ток [56; 57], в то время как введение в полимерную основу керамического порошка улучшает его диэлектрические свойства. Так, учеными проведены исследования влияния TiO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub>, BaSrTiO<sub>3</sub> и др. на диэлектрические свойства полимер-керамических образцов для дальнейшего использования в конденсаторах, диэлектрических антеннах и других применениях, которые используют диэлектрические компоненты.

Как упоминалось ранее [45], ученые из Чехии исследовали ПКК с использованием полимера РЕТС и керамического порошка  $TiO_2$ . В работе описаны испытания цилиндрических образцов с различными диаметром (19,1 и 9,5 мм) и толщиной (2,8 и 3,0 мм) для определения диэлектрических свойств ПКК. Лучшие результаты показал образец с 20 мас. %  $TiO_2$ . Диэлектрическая проницаемость при этом увеличилась на 50 % по сравнению с чистым РЕТС, а ее максимальное значение составило 4,4. Установлено отсутствие влияния температуры и частоты на диэлектрическую проницаемость и диэлектрические потери.

Кроме изучения диэлектрических свойств напечатанных образцов проводятся исследования по оценке возможности использования 3D-печатных полимер-керамических диэлектриков в составе электронного и радиотехнического оборудования. Команда ученых из Великобритании провела работу по изучению свойств ПКК [41]. Материал на основе ABS и порошка BaSrTiO<sub>3</sub> с массовым соотношением 50/50 показал максимальное значение относительной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_{\mu} = 6,05$ . В рамках исследования создан прототип патч-антенны (рис. 5), для которого была напечатана полимер-керамическая диэлектрическая линза полусферической формы. Ее использование увеличило коэффициент усиления на 3,86 дБ, практически не повлияв на эффективность антенны.

Помимо исследований диэлектрических свойств полимер-керамических композитов на основе PLA ведутся работы по изучению влияния керамических добавок на механическую прочность материала.





#### Рис. 5. Прототип патч-антенны

*а* – схема получения полимер-керамической диэлектрической линзы; *б* – внешний вид готовой антенны [41]

#### Fig. 5. Prototype of the patch antenna

a – process diagram for producing epy polymer-ceramic dielectric lens;  $\delta$  – appearance of the finished antenna [41]

В работе [12] приводятся результаты механических испытаний образцов на основе PLA, армированного порошком Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. Учеными проведено сравнение образцов, полученных методом литья под давлением, и образцов, напечатанных на FDM-принтере. В первом случае были получены 3 серии образцов с различным массовым соотношением полимер/керамика (85/15, 90/10, 95/05). По результатам их механических испытаний для дальнейших исследований было выбрано соотношение 95/05. Эти образцы обладали адгезией и меньшим количеством дефектов и, как следствие, более высокими значениями прочности. Далее с использованием выбранного соотношения сравнивались механические характеристики образцов, полученных вышеуказанными методами. На основе результатов сделан вывод о снижении прочности напечатанных образцов на 12,0, 15,5 и 13,5 % при испытаниях на растяжение, изгиб и ударную вязкость соответственно.

Одним из малоизученных, но перспективных направлений работы с ПКК является исследование влияния керамических частиц на проявление эффекта памяти формы (ЭПФ). Известно, что многие полимеры для FDM-печати обладают способностью проявлять ЭПФ, который, как правило, стимулируется путем температурного воздействия [58-61]. В работе [39] рассмотрено влияние добавки SiC в полимерную основу PLA на характеристики восстановления формы. Результаты показали, что время восстановления может зависеть от теплопроводности материала. Испытания проводились на экструдированных нитях (рис. 6) и напечатанных образцах. Выявлено, что композиты с наполнителем из SiC восстанавливаются быстрее, чем материал из чистого PLA.

Таким образом, получение полимер-керамических композитов по технологии FDM-печати является развивающимся направлением и обладает рядом трудностей и ограничений. Основные методы решения таких проблем, как склонность к возникновению дефектов (поры, трещины), заключаются в комплексной работе, а именно в получении подходящего состава при производстве филамента и правильном подборе параметров печати.

Однако на сегодняшний день изучены не все вопросы касательно обеспечения однородности получаемого материала и возникновения дефектов в процессе печати. Такие аспекты, как влияние термообработки и механических напряжений, возникающих во время печати, на качество и конечные свойства



Рис. 6. Изображения, полученные для керамонаполненных филаментов, показывающие восстановление формы [39]



изделий, остаются недостаточно изученными и требуют дальнейших исследований. Подобные вопросы создают научный интерес для дальнейшего изучения ПКК и возможности внедрения в работу будущих изделий.

### Заключение

Представлен подробный анализ получения полимер-керамических композитов методом FDM-печати. Рассмотрены основные технологические этапы - от выбора сырья до изготовления конечных изделий. Проведен анализ научных публикаций, выделены наиболее распространенные керамические добавки: SiC, ZrO<sub>2</sub>, BaTiO<sub>3</sub> и др. Использование таких наполнителей улучшает показатели диэлектрической проницаемости, механической прочности и оказывает влияние на время активации эффекта памяти формы. Это позволяет использовать керамические филаменты для создания диэлектрических компонентов электронных и радиотехнических систем, сенсоров, конструкционных элементов и изделий с ЭПФ.

Проведенный обзор служит основой для дальнейших исследований в области разработки и изучения 3D-печатных ПКК. Планируется получение 3D-печатных объемных изделий из ПКК с повышенной диэлектрической проницаемостью.

# Список литературы / References

- Bhatia A., Sehgal A.K. Additive manufacturing materials, 1. methods and applications: A review. Materials Today: Proceedings. 2023;81:1060-1067. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.379
- 2. Pereira T., Kennedy J.V., Potgieter J. A comparison of traditional manufacturing vs additive manufacturing, the best method for the job. Procedia Manufacturing. 2019; 30:11-18. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.003
- 3. Attaran M. The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. Business Horizons. 2017;60(5):677-688. https://doi.org/10.1016/j.bushor.2017.05.011
- 4. Kanishka K., Acherjee B. Revolutionizing manufacturing: A comprehensive overview of additive manufacturing processes, materials, developments, and challenges. Journal of Manufacturing Processes. 2023;107:574-619. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.10.024
- 5. Hajare D.M., Gajbhiye T.S. Additive manufacturing (3D printing): Recent progress on advancement of materials and challenges. Materials Today: Proceedings. 2022;58: 736-743. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.391
- 6. Hasanov S., Alkunte S., Rajeshirke M., Gupta A., Huseynov O., Fidan I., Alifui-Segbaya F., Rennie A. Review on additive manufacturing of multi-material parts: progress and challenges. Journal of Manufacturing and Materials Processing. 2022;6(1):4.

https://doi.org/10.3390/jmmp6010004

- 7. Mehrpouya M., Dehghanghadikolaei A., Fotovvati B., Vosooghnia A., Emamian S.S., Gisario A. The potential of additive manufacturing in the smart factory industrial 4.0: A review. Applied Sciences. 2019;9(18):3865. https://doi.org/10.3390/app9183865
- Martinelli A., Mina A., Moggi M. The enabling technolo-8. gies of industry 4.0: examining the seeds of the fourth industrial revolution. Industrial and Corporate Change. 2021;30(1):161-188. https://doi.org/10.1093/icc/dtaa060
- 9. Сотов А.В., Зайцев А.И., Абдрахманова А.Э., Попович А.А. Аддитивное производство непрерывно армированных полимерных композитов с использованием промышленных роботов: Обзор. Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2024;18(1):20-30.

https://doi.org/10.17073/1997-308X-2024-1-20-30

Sotov A.V., Zaytsev A.I., Abdrahmanova A.E., Popovich A.A. Additive manufacturing of continuous fibre reinforced polymer composites using industrial robots: A review. Powder Metallurgy and Functional Coatings. 2024;18(1):20-30.

https://doi.org/10.17073/1997-308X-2024-1-20-30

10. Kumar R., Singh R., Hashmi M.S. J. Polymer-ceramic composites: A state of art review and future applications. Advances in Materials and Processing Technologies. 2022;8(1):895-908.

https://doi.org/10.1080/2374068X.2020.1835013

- 11. Czepiel M., Bańkosz M., Sobczak-Kupiec A. Advanced injection molding methods. Materials. 2023;16(17):5802. https://doi.org/10.3390/ma16175802
- 12. John L.K., Ramu M., Singamneni S., Binudas N. Strength evaluation of polymer ceramic composites: a comparative study between injection molding and fused filament fabrication techniques. Progress in Additive Manufacturing. 2024;1-9. https://doi.org/10.1007/s40964-024-00626-9
- 13. Fu H., Xu H., Liu Y., Yang, Z., Kormakov S., Wu D., Sun J. Overview of injection molding technology for processing polymers and their composites. ES Materials & Manufacturing. 2020;8(20):3-23. http://dx.doi.org/10.30919/esmm5f713
- 14. Li W.D., Wang C., Yin H.Y., Deng J.B., Mu H.B., Zhang G.J., Chen Y., Song F.L., Chen Y.L. Additive manufacturing of polymer-matrix composite dielectric materials using stereolithography technique. In: International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE). IEEE. 2021. P. 1-4. https://doi.org/10.1109/ICEMPE51623.2021.9509221
- 15. Colella R., Chietera F. P., Montagna F., Greco A., Catarinucci L. Customizing 3D-printing for electromagnetics to design enhanced RFID antennas. IEEE Journal of Radio Frequency Identification. 2020;4(4):452-460. https://doi.org/10.1109/JRFID.2020.3001043
- 16. Colella R., Chietera F.P., Catarinucci L. Analysis of FDM and DLP 3D-printing technologies to prototype electromagnetic devices for RFID applications. Sensors. 2021; 21(3):897. https://doi.org/10.3390/s21030897
- 17. Edhere E.S. 3D-printing of dielectric antennas through digital light processing. Master's thesis. North Carolina Agricultural and Technical State University, 2022.

- 18. Chueh Y.H., Zhang X., Wei C., Sun Z., Li L. Additive manufacturing of polymer-metal/ceramic functionally graded composite components via multiple material laser powder bed fusion. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2020;142(5):051003. https://doi.org/10.1115/1.4046594
- Chaudhary R.P., Parameswaran C., Idrees M., Rasaki A.S., Liu C., Chen Z., Colombo P. Additive manufacturing of polymer-derived ceramics: Materials, technologies, properties and potential applications. *Progress in Materials Science*. 2022;128:100969. https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2022.100969
- 20. Lalegani Dezaki M., Mohd Ariffin M.K.A., Hatami S. An overview of fused deposition modelling (FDM): Research, development and process optimization. *Rapid Prototyping Journal*. 2021;27(3):562–582.

https://doi.org/10.1108/RPJ-08-2019-0230

- 21. Gibson I., Rosen D.W., Stucker B., Khorasani M., Rosen D., Stucker B., Khorasani M. Additive manufacturing technologies. Cham, Switzerland: Springer, 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-56127-7
- **22.** ГОСТ Р 59100-2020 Пластмассы. Филаменты для аддитивных технологий. Общие технические требования. М.: Стандартинформ, 2020.
- **23.** Patel A., Taufik M. Extrusion-based technology in additive manufacturing: a comprehensive review. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2024;49(2):1309–1342. https://doi.org/10.1007/s13369-022-07539-1
- 24. Moetazedian A., Budisuharto A.S., Silberschmidt V.V., Gleadall A. CONVEX (CONtinuously Varied EXtrusion): a new scale of design for additive manufacturing. *Additive Manufacturing*. 2021;37:101576. https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101576
- 25. Azhar M.A.M., Sukindar N.A., Ani M.H., Anuar H.B., Kamaruddin S.B., Shaharuddin S.I.S., Mustafa M.Y., Adesta E.Y.T., Arief R.K., Sulaiman M.H. Review on fused deposition modelling extruder types with their specialities in filament extrusion process. In: *Advances in Manufacturing and Materials Engineering: ICAMME 2022* (5<sup>th</sup> Intern. Conf. on Mechanical Engineering, Kuala Lumpur, Malaysia 9–10 August). Singapore: Springer, 2023. P. 407–413. https://doi.org/10.1007/978-981-19-9509-5 54
- 26. Krajangsawasdi N., Blok L.G., Hamerton I., Longana M.L., Woods B.K.S., Ivanov D.S. Fused deposition modelling of fibre reinforced polymer composites: A parametric review. *Journal of Composites Science*. 2021; 5(1):29. https://doi.org/10.3390/jcs5010029
- 27. Kantaros A., Soulis E., Petrescu F.I.T., Ganetsos T. Advanced composite materials utilized in FDM/FFF 3D printing manufacturing processes: The case of filled filaments. *Materials*. 2023;16(18):6210. https://doi.org/10.3390/ma16186210
- **28.** Wickramasinghe S., Do T., Tran P. FDM-based 3D printing of polymer and associated composite: A review on mechanical properties, defects and treatments. *Polymers*. 2020;12(7):1529.
  - https://doi.org/10.3390/polym12071529
- **29.** Yang L., Li S., Li Y., Yang M., Yuan Q. Experimental investigations for optimizing the extrusion parameters on FDM PLA printed parts. *Journal of Materials Engineer*-

*ing and Performance*. 2019;28:169–182. https://doi.org/10.1007/s11665-018-3784-x

- 30. Valerga A.P., Batista M., Salguero J., Girot F. Influence of PLA filament conditions on characteristics of FDM parts. *Materials*. 2018;11(8):1322. http://dx.doi.org/10.3390/ma11081322
- Samykano M., Selvamani S.K., Kadirgama K., Ngui W.K., Kanagaraj G., Sudhakar K. Mechanical property of FDM printed ABS: Influence of printing parameters. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019;102:2779–2796. https://doi.org/10.1007/s00170-019-03313-0
- 32. Rodríguez-Panes A., Claver J., Camacho A.M. The influence of manufacturing parameters on the mechanical behaviour of PLA and ABS pieces manufactured by FDM: A comparative analysis. *Materials*. 2018;11(8):1333. http://dx.doi.org/10.3390/ma11081333
- 33. Özen A., Auhl D., Völlmecke C., Kiendl J., Abali B.E. Optimization of manufacturing parameters and tensile specimen geometry for fused deposition modeling (FDM) 3Dprinted PETG. *Materials*. 2021;14(10):2556. http://dx.doi.org/10.3390/ma14102556
- **34.** Sehhat M.H., Mahdianikhotbesara A., Yadegari F. Impact of temperature and material variation on mechanical properties of parts fabricated with fused deposition modeling (FDM) additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022;120(7):4791–4801.

https://doi.org/10.1007/s00170-022-09043-0

- **35.** Rahim T.T., Abdullah A.M., Akil H.M., Mohamad D., Rajion Z.A. The improvement of mechanical and thermal properties of polyamide 12 3D printed parts by fused deposition modelling. *Express Polymer Letters*. 2017;11(12):963–982.
  - https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2017.92
- 36. Jafferson J.M., Chatterjee D. A review on polymeric materials in additive manufacturing. *Materials Today: Proceedings*. 2021;46:1349–1365. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.485
- 37. Romero G.F., Maldonado S.R., Arciniaga L.F., Gonzales D.A., Villalobos E.B., Potter B.G., Muralidharan K., Loy D.A., Szivek J.A., Margolis D.S. Polymer-ceramic composites for fused deposition modeling of biomimetic bone scaffolds. *Results in Engineering*. 2024;102407. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102407
- Sofokleous P., Paz E., Herraiz-Martínez F.J. Design and Manufacturing of Dielectric Resonators via 3D Printing of Composite Polymer/Ceramic Filaments. *Polymers*. 2024; 16(18):2589. https://doi.org/10.3390/polym16182589
- Liu W., Wu N., Pochiraju K. Shape recovery characteristics of SiC/C/PLA composite filaments and 3D printed parts. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2018;108:1–11.

https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.02.017

40. Skorda S., Bardakas A., Segkos A., Chouchoumi N., Hourdakis E., Vekinis G., Tsamis C. Influence of SiC doping on the mechanical, electrical, and optical properties of 3D-printed PLA. *Journal of Composites Science*. 2024;8(3):79. https://doi.org/10.3390/jcs8030079

- **41.** Goulas A., McGhee J.R., Whittaker T., Ossai D., MistryE., Whittow W., Vaidhyanathan B., Reaney I.M., Vardaxoglou J.C., Engstrøm, D. S. Synthesis and dielectric characterisation of a low loss BaSrTiO<sub>3</sub>/ABS ceramic/polymer composite for fused filament fabrication additive manufacturing. *Additive Manufacturing*. 2022;55:102844. http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2022.102844
- 42. Khatri B., Lappe K., Habedank M., Mueller T., Megnin C., Hanemann T. Fused deposition modeling of ABS-Barium Titanate composites: A simple route towards tailored dielectric devices. *Polymers*. 2018;10(6):666. https://doi.org/10.3390/polym10060666
- 43. Castles F., Isakov D., Lui A., Lei Q., Dancer C.E., Wang Y., Janurudin J.M., Speller S.C., Grovenor C.R.M., Grant P.S. Microwave dielectric characterisation of 3Dprinted BaTiO<sub>3</sub>/ABS polymer composites. *Scientific Reports*. 2016;6(1):1–8. http://dx.doi.org/10.1038/srep22714
- 44. Wu Y., Isakov D., Grant P.S. Fabrication of composite filaments with high dielectric permittivity for fused deposition 3D printing. *Materials*. 2017;10(10):1218. https://doi.org/10.3390/ma10101218
- 45. Veselý P., Froš D., Hudec T., Sedláček J., Ctibor P., Dušek K. Dielectric spectroscopy of PETG/TiO<sub>2</sub> composite intended for 3D printing. *Virtual and Physical Prototyping*. 2023;18(1):e2170253. https://doi.org/10.1080/17452759.2023.2170253
- 46. Nakonieczny D.S., Kern F., Dufner L., Antonowicz M., Matus K. Alumina and zirconia-reinforced polyamide PA-12 composites for biomedical additive manufacturing. *Materials*. 2021;14(20):6201. https://doi.org/10.3390/ma14206201
- 47. Linh N.T.D., Huy K.D., Dung N.T.K., Luong N.X., Hoang T., Tham D.Q. Fabrication and characterization of PMMA/ZrO<sub>2</sub> nanocomposite 3D printing filaments. *Vietnam Journal of Chemistry*. 2023;61(4):461–469. https://doi.org/10.1002/vjch.202200185
- 48. Kuznetsova E., Pristinskiy Y.O., Bentseva E., Pinargote N.S., Smirnov A. Rheological behavior and 3D printing of highly filled alumina-polyamide filaments during fused deposition modeling. *High Temperature Material Processes: An International Quarterly of High-Technolo*gy Plasma Processes. 2024;28(3):9–24. https://doi.org/10.1615/HighTempMatProc.2023051057
- **49.** Angelopoulos P.M., Samouhos M., Taxiarchou M. Functional fillers in composite filaments for fused filament fabrication: A review. *Materials Today: Proceedings*. 2021;37:4031–4043.
  - https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.069
- 50. Solomon I.J., Sevvel P., Gunasekaran J. A review on the various processing parameters in FDM. *Materials Today: Proceedings*. 2021;37:509–514. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.484
- **51.** Dey A., Yodo N. A Systematic Survey of FDM process parameter optimization and their influence on part charac-

teristics. Journal of Manufacturing and Materials Processing. 2019;3(3):64.

https://doi.org/10.3390/jmmp3030064

- 52. Portoacă A.I., Ripeanu R.G., Diniță A., Tănase M. Optimization of 3D printing parameters for enhanced surface quality and wear resistance. *Polymers*. 2023;15(16):3419. https://doi.org/10.3390/polym15163419
- 53. Syrlybayev D., Zharylkassyn B., Seisekulova A., Akhmetov M., Perveen A., Talamona D. Optimisation of strength properties of FDM printed parts: A critical review. *Polymers*. 2021;13(10):1587. https://doi.org/10.3390/polym13101587
- 54. Goulas A., Zhang S., Cadman D.A., Järveläinen J., Mylläri V., Whittow W.G., Vardaxoglou J.C., Engstrøm D.S. The impact of 3D printing process parameters on the dielectric properties of high permittivity composites. *Designs*. 2019;3(4):50. https://doi.org/10.3390/designs3040050v
- 55. Zhang Y., Li W., Wang C., Xue H., Yuan A., Li D., Zhang G. 3D printed polycarbonate support insulator for quick repair: Insulation and mechanical performance. In: *International Conferebce on High Voltage Engineering* and Applications (ICHVE). IEEE. 2022. P. 1–5. https://doi.org/10.1109/ICHVE53725.2022.9961392
- 56. Nabipour M., Akhoundi B., Bagheri Saed A. Manufacturing of polymer/metal composites by fused deposition modeling process with polyethylene. *Journal of Applied Polymer Science*. 2020;137(21):48717. https://doi.org/10.1002/app.48717
- **57.** Galos J., Hu Y., Ravindran A.R., Ladani R.B., Mouritz A.P. Electrical properties of 3D printed continuous carbon fibre composites made using the FDM process. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2021;151:106661.

https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2021.106661

- 58. Valvez S., Reis P.N.B., Susmel L., Berto F. Fused filament fabrication-4D-printed shape memory polymers: A review. *Polymers*. 2021;13(5):701. https://doi.org/10.3390/polym13050701
- Ehrmann G., Ehrmann A. 3D printing of shape memory polymers. *Journal of Applied Polymer Science*. 2021; 138(34):50847. https://doi.org/10.1002/app.50847
- 60. Barletta M., Gisario A., Mehrpouya M. 4D printing of shape memory polylactic acid (PLA) components: Investigating the role of the operational parameters in fused deposition modelling (FDM). *Journal of Manufacturing Processes*. 2021;61:473–480. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.11.036
- 61. Kong D., Guo A., Wu H., Li X., Wu J., Hu Y., Qu P., Wang S., Guo S. Four-dimensional printing of polymerderived ceramics with high-resolution, reconfigurability, and shape memory effects. *Additive Manufacturing*. 2024; 83:104050. https://doi.org/10.1016/j.addma.2024.104050



Сведения об авторах	Information about the Authors
Александр Ильич Зайцев – инженер российско-китайской научно-исследовательской лаборатории «Функциональные материалы», Санкт-Петербургский политехнический универ- ситет Петра Великого (СПбПУ) О ORCID: 0000-0002-3138-8365 E-mail: zajtsev_ai2@spbstu.ru	Alexander I. Zaytsev – Engineer at the Russian-Chinese Research Laboratory "Functional materials", Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU)
Антон Владимирович Сотов – к.т.н., вед. науч. сотрудник ла- боратории «Дизайн материалов и аддитивного производства», СПбПУ	<ul> <li>Anton V. Sotov – Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher of the Laboratory "Material Design and Additive Manufacturing", SPbPU</li> <li>D ORCID: 0000-0002-7303-5912</li> <li>☑ E-mail: sotov_av@spbstu.ru</li> </ul>
Анна Эдуардовна Абдрахманова – инженер лаборатории «Дизайн материалов и аддитивного производства», СПбПУ <b>О ORCID</b> : 0009-0003-4494-7300 <b>E-mail:</b> abdrahm_ae@spbstu.ru	Anna E. Abdrahmanova – Engineer of the Laboratory "Material De- sign and Additive Manufacturing", SPbPU [10] ORCID: 0009-0003-4494-7300 ⊠ E-mail: abdrahm_ae@spbstu.ru
Анатолий Анатольевич Попович – д.т.н., профессор Научно- образовательного центра «Конструкционные и функциональ- ные материалы», СПбПУ	<ul> <li>Anatoliy A. Popovich – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Scientific and Educational Center "Structural and Functional Materials", SPbPU</li> <li>DRCID: 0000-0002-5974-6654</li> <li>☑ E-mail: director@immet.spbstu.ru</li> </ul>
Вклад авторов	Contribution of the Authors
<i>А. И. Зайцев</i> – поиск и анализ литературы, подготовка текста статьи. <i>А. В. Сотов</i> – формирование основной концепции, поиск и ана- лиз литературы, формулировка выводов. <i>А. Э. Абдрахманова</i> – корректировка текста, формулировка выводов. <i>А. А. Попович</i> – научное руководство, формализация задачи, формирование основной концепции.	<ul> <li>A. I. Zaytsev – literature search and analysis, writing the manuscript.</li> <li>A. V. Sotov – development of the main concept, literature search and analysis, conclusion formulation.</li> <li>A. E. Abdrahmanova – manuscript revision, conclusion formulation.</li> <li>A. A. Popovich – scientific supervision, problem formalization, development of the main concept.</li> </ul>

Статья поступила 05.08.2024 г. Доработана 11.09.2024 г. Принята к публикации 13.09.2024 г. Received 05.08.2024 Revised 11.09.2024 Accepted 13.09.2024