

Научная статья
УДК 621.3.049.77:666.3:621.9.048.7
doi:10.37614/2949-1215.2025.16.4.034

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ КЕРАМИЧЕСКИХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ МИКРОВОЛНОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

**Екатерина Александровна Балабанова¹, Михаил Владимирович Тимошенко²,
Марсель Фалиевич Ахматнабиев³, Андрей Сергеевич Долгин⁴, Наталья Геральдовна Тюрнина⁵,
Зоя Геральдовна Тюрнина⁶, Андрей Вилевич Тумаркин⁷, Сергей Витальевич Балабанов⁸,
Максим Максимович Сычев⁹, Андрей Викторович Дроздовский¹⁰**

^{1–6, 8, 9}Институт химии силикатов имени И. В. Гребенщикова (филиал Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»), Санкт-Петербург, Россия
^{7, 10}Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

имени В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

¹balabanova.e.a@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0003-1784-7542>

²timoshe-mikhail@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-8919-2648>

³marsel.akhmatnabiev@mail.ru, <http://orcid.org/0009-0006-5639-1129>

⁴dolgin.andrey@inbox.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9409-7453>

⁵turnina.ng@iscras.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9410-8917>

⁶turnina.zg@iscras.ru, <http://orcid.org/0000-0003-3134-7309>

⁷avtumarkin@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9858-3846>

⁸sergeybalabanov@yahoo.com, <http://orcid.org/0000-0002-2249-350X>

⁹msychov@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9736-6452>

¹⁰avdrozdovskii@etu.ru, <http://orcid.org/0000-0003-2127-1291>

Аннотация

Синтезированы композиты на основе пластиков АБС и СБС с наполнителями TiO₂ и SrTiO₃. Из них изготовлены филаменты для 3D-печати СВЧ-элементов. Изучены структура, механические и диэлектрические свойства. Наиболее перспективным признан состав АБС–40 % TiO₂, обладающий $\epsilon \approx 8,1$, $\tan \delta \approx 0,02$ (3 ГГц) и высокую прочность ($\sigma_p = 29,8$ МПа, $\sigma_{\text{н}} = 44,1$ МПа). Впервые показана возможность получения печатного филамента с содержанием керамики свыше 20 %.

Ключевые слова:

полимер-керамические композиты, АБС, СБС, TiO₂, SrTiO₃, филаменты для 3D-печати, FDM-технология, диэлектрическая проницаемость, СВЧ-элементы

Финансирование:

результаты исследований, связанные с РФА-, СЭМ-микроскопией получены в рамках государственного задания на НИР №1024030700034-2-1.4.3 и №1024031700022-6-1.4.3.

Результаты исследований, связанные с изготовлением филамента наполненного керамикой, его 3D-печатью и изучение физико-механических свойств выполнены в рамках государственного задания №1024030700040-3-1.4.3.

Результаты исследований, связанные с экспериментальными исследованиями электрических свойств, выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках темы № FSEE-2025-0010.

Для цитирования:

Балабанова Е. А., Тимошенко М. В., Ахматнабиев М. Ф., Долгин А. С., Тюрнина Н. Г., Тюрнина З. Г., Тумаркин А. В., Балабанов С. В., Сычев М. М., Дроздовский А. В. Перспективные полимерные композиты с высоким содержанием керамических наполнителей для 3D-печати микроволновых элементов // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2025. Т. 16, № 4. С. 179–183. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.4.034.

Original article

PROMISING POLYMER COMPOSITES WITH HIGH CERAMIC FILLER CONTENT FOR 3D PRINTING OF MICROWAVE COMPONENTS

**Ekaterina A. Balabanova¹, Mikhail V. Timoshenko², Marsel F. Akhmatnabiev³, Andrey S. Dolgin⁴,
Natalia G. Tyurnina⁵, Zoya G. Tyurnina⁶, Andrey V. Tumarkin⁷, Sergey V. Balabanov⁸, Maksim M. Sychev⁹,
Andrey V. Drozdovsky¹⁰**

^{1–6, 8, 9}Institute of Silicate Chemistry, Saint Petersburg, 199034, Russia

^{7, 10}Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI”, Saint Petersburg, Russia

¹balabanova.e.a@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0003-1784-7542>
²timoshe-mikhail@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-8919-2648>
³marsel.akhmatnabiev@mail.ru, <http://orcid.org/0009-0006-5639-1129>
⁴dolgin.andrey@inbox.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9409-7453>
⁵turnina.ng@iscras.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9410-8917>
⁶turnina.zg@iscras.ru, <http://orcid.org/0000-0003-3134-7309>
⁷avtumarkin@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9858-3846>
⁸sergeybalabanov@yahoo.com, <http://orcid.org/0000-0002-2249-350X>
⁹msychov@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9736-6452>
¹⁰avdrozdovskii@etu.ru, <http://orcid.org/0000-0003-2127-1291>

Abstract

Polymer composites based on ABS and SBS plastics filled with TiO_2 and SrTiO_3 were synthesized and processed into filaments for 3D printing of microwave components. The structural, mechanical, and dielectric properties of the composites were investigated. The most promising composition, ABS–40 wt % TiO_2 , exhibits a dielectric permittivity of $\epsilon \approx 8.1$, low dielectric loss ($\tan \delta \approx 0.02$ at 3 GHz), and high mechanical strength ($\sigma_t = 29.8$ MPa, $\sigma_f = 44.1$ MPa). For the first time, a printable filament with a ceramic filler content above 20 wt % has been successfully fabricated while maintaining sufficient processability.

Keywords:

polymer-ceramic composites, ABS, SBS, TiO_2 , SrTiO_3 , 3D printing filaments, FDM technology, dielectric permittivity, microwave components

Funding:

The research related to X-ray diffraction analysis (XRD) and scanning electron microscopy (SEM) was carried out within the framework of state-funded research projects No. 1024030700034-2-1.4.3 and No. 1024031700022-6-1.4.3.

The research on the fabrication of ceramic-filled filaments, their 3D printing, and investigation of physico-mechanical properties was performed under state-funded project No. 1024030700040-3-1.4.3.

The experimental study of the electrical properties was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under project No. FSEE-2025-0010.

For citation:

Balabanova E. A., Timoshenko M. V., Akhmatnabiev M. F., Dolgin A. S., Tyrnina N. G., Tyrnina Z. G., Tumarkin A. V., Balabanov S. V., Sychev M. M., Drozdovsky A. V. Promising polymer composites with high ceramic filler content for 3D printing of microwave components // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2025. Vol. 16, No. 4. P. 179–183. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.4.034

Введение

Развитие аддитивных технологий позволило применять метод FDM не только для прототипирования, но и для изготовления функциональных изделий [1–4]. Для СВЧ-применений необходимы материалы с высокой диэлектрической проницаемостью и низкими потерями, при этом традиционные керамики ограничены хрупкостью. Альтернативой выступают полимер-керамические композиты, сочетающие технологичность и регулируемые электрические свойства.

В исследовании разработаны композиты на основе пластиков АБС и СБС с наполнителями TiO_2 и SrTiO_3 (20–50 масс. %). Цель исследования — создание 3D-печатаемых материалов с управляемыми диэлектрическими и механическими характеристиками и установление зависимостей «состав — структура — свойства».

Результаты исследований

В качестве матриц использованы АБС и СБС. Наполнители — TiO_2 (20, 40, 50 масс. %) и SrTiO_3 (30 масс. %). Филаменты диаметром 1,75 мм получали методом компаундирования и экструдирования. Образцы печатали по технологии FDM с 100 % заполнением. Исследованы диэлектрические (3 ГГц) и механические свойства (сжатие, изгиб, растяжение).

Результаты измерения относительной диэлектрической проницаемости, тангенса угла диэлектрических потерь, а также механических испытаний (прочность на растяжение (σ_p) и изгиб ($\sigma_{\text{и}}$)) образцов, напечатанных на 3D-принтере, представлены в табл.

Для оценки перспективности разработанных материалов был проведен сравнительный анализ их механических и диэлектрических характеристик с известными в литературе аналогами на основе АБС с наполнителями BaTiO_3 и BaSrTiO_3 (табл.).

© Балабанова Е. А., Тимошенко М. В., Ахматнабиев М. Ф., Долгин А. С., Тюрнина Н. Г., Тюрнина З. Г., Тумаркин А. В., Балабанов С. В., Сычев М. М., Андрей Викторович Дроздовский А. В., 2025

Таблица

Сравнительные механические и диэлектрические характеристики композитов АБС/СБС с наполнителями TiO_2 и SrTiO_3 (данная работа) и аналогичных материалов из литературы

Полимер	Наполнитель	Наполнитель масс. %	σ_p , МПа	σ_n , МПа	ε	$\tan \delta$	Источник
АБС	TiO_2	20	27,1	44,1	5,4	0,011	Наши данные
		40	29,8	48,3	8,1	0,021	
		1	39,4	62	–	–	[5]
		5	43,6	72			
		10	43,0	72			
		0,5	37,0	53	–	–	[6]
		2,5	36,0	53			
		5	33,0	50			
		10	31,0	51			
АБС	SrTiO_3	30	20,0	38,4	6,7	0,015	Наши данные
СБС	TiO_2	50	19,3	37,8	8,23	0,026	Наши данные
АБС	BaTiO_3	50	–	–	4,95	0,016	[7]
		70	–	–	8,72	0,027	
АБС	BaTiO_3	10	23,5	73	4,1	–	[8]
		20	21,5	60	5,6		
		30	16,5	35,18	8,2		
		35	13,7	–	11,5		
АБС	BaSrTiO_3	50	–	–	6,05	0,007	[9]

Согласно таблице, для достижения $\varepsilon \approx 8$ в композитах АБС– BaTiO_3 требуется ≥ 70 wt % наполнителя, что сопровождается заметным снижением прочности.

В настоящей работе сопоставимая диэлектрическая проницаемость ($\varepsilon \approx 8,1$) достигнута уже при 40 wt % TiO_2 , при этом прочность на растяжение и изгиб составила 29,8 и 48,3 МПа соответственно.

Выводы

Синтезированы композиты на основе пластиков ABS и SBS с наполнителями TiO_2 и SrTiO_3 . Из них изготовлены филаменты для 3D-печати СВЧ-элементов. Изучены механические и диэлектрические свойства. Наиболее перспективным признан состав АБС–40 % TiO_2 , обладающий $\varepsilon \approx 8,1$, $\tan \delta \approx 0,02$ (3 ГГц) и высокую прочность ($\sigma_p = 29,8$ МПа, $\sigma_n = 44,1$ МПа). Впервые показана возможность получения печатного филамента с содержанием керамики свыше 20 %.

Таким образом, композиты АБС– TiO_2 являются перспективными кандидатами для изготовления диэлектрических линз, антенных отражателей и радиопрозрачных конструкций в Ка-диапазоне (26–40 ГГц), где оптимальными считаются $\varepsilon \approx 8$ –10 и $\tan \delta \leq 0,03$ [10]. Перспективным направлением дальнейших исследований является модификация поверхности TiO_2 и использование гибридных наполнителей ($\text{TiO}_2 + \text{BaTiO}_3$) для расширения диапазона рабочих свойств при сохранении технологичности.

Список источников

1. Balabanov S., Sychoy M., Koshevaya K., Makogon A., Gravit M. Study of isotropy of mechanical properties of the TPMS-based cellular structures // E3S Web of Conferences. 2022. Т. 363. С. 04053.
2. Timoshenko M. V., Balabanov S. V., Sychev M. M., Nikiforov D. I. Thermoplastic Elastomer for 3D Printing by Fused Deposition Modeling // Polymer Science, Series A. 2021. Т. 63. № 6. С. 652–656.
3. Tumarkin A. V., Sinelshchikova O. Y., Zigankova D. I., Tyurnina N. G., Tyurnina Z. G., Gagarin A. G., Karamov A. R. Ferroelectric Composites of BaTiO_3 and SrTiO_3 with the Low-Melting Additive B_2O_3 // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2024. Т. 88. № 5. С. 687–692.
4. Tumarkin A. V., Tyurnina N. G., Tyurnina Z. G., Sinelshchikova O. Y., Tsygankova D. I., Gagarin A. G., Balabanova E. A. Composite Materials Based on Polytetrafluoroethylene with SiO_2 and BaTiO_3 Inorganic Fillers // Glass Physics and Chemistry. 2023. Т. 49. № Suppl 1. С. S94–S101.

5. Skorski M. R., Esenther J. M., Ahmed Z., Miller A. E., Hartings M. R. The chemical, mechanical, and physical properties of 3D printed materials composed of TiO₂-ABS nanocomposites // *Science and Technology of advanced MaTeRIalS*. 2016. Т. 17. № 1. С. 89–97.
6. Vidakis N., Petousis M., Maniadi A., Koudoumas E., Liebscher M., Tzounis L. Mechanical properties of 3D-printed acrylonitrile-butadiene-styrene TiO₂ and ATO nanocomposites // *Polymers*. 2020. Т. 12. № 7. С. 1589.
7. Castles F., Isakov D., Lui A., Lei Q., Dancer C. E., Wang Y., Grant P. S. Microwave dielectric characterisation of 3D-printed BaTiO₃ // *Scientific reports*. 2016. Т. 6. № 1. С. 1–8.
8. 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. Т. 10. № 6. С. 666.
9. Goulas A., McGhee J.R., Whittaker T., Ossai D., Mistry E., Whittow W., Engstrøm D. S. Synthesis and dielectric characterisation of a low loss BaSrTiO₃ // *Additive Manufacturing*. 2022. Т. 55. С. 102844.
10. Sebastian M., Uvic R., Jantunen H. *Microwave materials and applications*. John Wiley & Sons, 2017. 1152 p.

References

1. Balabanov S., Syrov M., Koshevaya K., Makogon A., Gravit M. Study of isotropy of mechanical properties of the TPMS-based cellular structures. *E3S Web of Conferences* [E3S Web of Conferences], 2022, Vol. 363, Art. No. 04053.
2. Timoshenko M. V., Balabanov S. V., Sychev M. M., Nikiforov D. I. Thermoplastic Elastomer for 3D Printing by Fused Deposition Modeling. *Polymer Science, Series A* [Polymer Science, Series A], 2021, Vol. 63, No. 6, pp. 652–656. (In Russ.).
3. Tumarkin A. V., Sinelshchikova O. Y., Zigankova D. I., Tyurnina N. G., Tyurnina Z. G., Gagarin A. G., Karamov A. R. Ferroelectric Composites of BaTiO₃ and SrTiO₃ with the Low-Melting Additive B₂O₃. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics], 2024, Vol. 88, No. 5, pp. 687–692. (In Russ.).
4. Tumarkin A. V., Tyurnina N. G., Tyurnina Z. G., Sinelshchikova O. Y., Tsygankova D. I., Gagarin A. G., Balabanova E. A. Composite Materials Based on Polytetrafluoroethylene with SiO₂ and BaTiO₃ Inorganic Fillers. *Glass Physics and Chemistry* [Glass Physics and Chemistry], 2023, Vol. 49, No. Suppl. 1, pp. S94–S101. (In Russ.).
5. Skorski M. R., Esenther J. M., Ahmed Z., Miller A. E., Hartings M. R. The chemical, mechanical, and physical properties of 3D printed materials composed of TiO₂-ABS nanocomposites. *Science and Technology of advanced MaTeRIalS* [Science and Technology of advanced MaTeRIalS], 2016, Vol. 17, No. 1, pp. 89–97.
6. Vidakis N., Petousis M., Maniadi A., Koudoumas E., Liebscher M., Tzounis L. Mechanical properties of 3D-printed acrylonitrile-butadiene-styrene TiO₂ and ATO nanocomposites. *Polymers* [Polymers], 2020, Vol. 12, No. 7, Art. No. 1589.
7. Castles F., Isakov D., Lui A., Lei Q., Dancer C.E., Wang Y., Grant P.S. Microwave dielectric characterisation of 3D-printed BaTiO₃. *Scientific reports* [Scientific reports], 2016, Vol. 6, No. 1, Art. No. 26313.
8. 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* [Polymers], 2018, Vol. 10, No. 6, Art. No. 666.
9. Goulas A., McGhee J. R., Whittaker T., Ossai D., Mistry E., Whittow W., Engstrøm D. S. Synthesis and dielectric characterisation of a low loss BaSrTiO₃. *Additive Manufacturing* [Additive Manufacturing], 2022, Vol. 55, Art. No. 102844.
10. Sebastian M., Uvic R., Jantunen H. *Microwave materials and applications*. Chichester, John Wiley & Sons, 2017, 1152 p.

Информация об авторах

Е. А. Балабанова — младший научный сотрудник;
М. В. Тимошенко — младший научный сотрудник;
М. Ф. Ахматнабиев — аспирант, инженер-исследователь;
А. С. Долгин — младший научный сотрудник;
Н. Г. Тюрни́на — кандидат химических наук, заместитель директора по научной работе;
З. Г. Тюрни́на — кандидат химических наук, старший научный сотрудник;
А. В. Тумаркин — доктор химических наук, профессор;
С. В. Балабанов — младший научный сотрудник;
М. М. Сычев — доктор технических наук, ведущий научный сотрудник;
А. В. Дроздовский — кандидат физико-математических наук, доцент.

© Балабанова Е. А., Тимошенко М. В., Ахматнабиев М. Ф., Долгин А. С., Тюрни́на Н. Г., Тюрни́на З. Г.,
Тумаркин А. В., Балабанов С. В., Сычев М. М., Андрей Викторович Дроздовский А. В., 2025

Information about the authors

E. A. Balabanova — Junior Researcher;

M. V. Timoshenko — Junior Researcher;

M. F. Akhmatnabiev — Graduate Student, Researcher, Research Engineer;

A. S. Dolgin — Junior Researcher;

N. G. Tyurnina — PhD (Chemistry), associate Director;

Z. G. Tyurnina — PhD (Chemistry), Researcher;

A. V. Tumarkin — Doctor (Chemistry), Professor;

S. V. Balabanov — Junior Researcher;

M. M. Sychev — Doctor (Engineering), Leading Researcher;

A. V. Drozdovsky — PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor.

Статья поступила в редакцию 08.10.2025; одобрена после рецензирования 15.10.2025; принята к публикации 27.10.2025.
The article was submitted 08.10.2025; approved after reviewing 15.10.2025; accepted for publication 27.10.2025.