

Комплексные электромеханические характеристики и микроструктурные особенности сегнетомягкой пористой пьезокерамики

© Н.А. Швецова¹, И.А. Швецов¹, Н.А. Колпачева², А.Н. Рыбняц¹

¹ Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

² Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия

E-mail: nashvecova@sfedu.ru

Поступило в Редакцию 29 апреля 2026 г.

В окончательной редакции 29 апреля 2026 г.

Принято к публикации 9 июля 2026 г.

Представлены результаты сравнительного исследования микроструктуры и комплексных электромеханических свойств сегнетомягкой плотной и пористой пьезокерамики на основе твердых растворов системы цирконата-титаната свинца одинакового химического состава. Измерены и проанализированы полные наборы комплексных констант экспериментальных образцов. Рассмотрены микроструктурные и физические механизмы, определяющие электромеханические свойства плотной и пористой пьезокерамики.

Ключевые слова: пористая пьезокерамика, микроструктура, пьезорезонансные спектры, комплексные электромеханические параметры.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.20.63609.20752

Широкое внедрение композиционных материалов в конструкции ультразвуковых преобразователей и их технологические процессы производства обуславливает необходимость решения ряда сложных задач, включая пересмотр традиционных подходов к разработке и производству пьезокерамических материалов [1,2]. Одним из наиболее перспективных направлений в этой области является использование пористой пьезокерамики, которая в последние годы привлекает все большее внимание исследователей и инженеров [3].

Пористая пьезокерамика представляет собой гетерогенную среду с уникальной микроструктурой, формирующей комплекс специфических функциональных свойств, лежащих в основе ее применения в различных

устройствах [4,5]. Эффективность пористой керамики в практических приложениях во многом определяется именно структурно-функциональными параметрами, которые зависят от микроструктуры, формируемой на этапах выбора исходных компонентов и режимов обработки. Для формирования заданной пористой структуры могут применяться различные методы, такие как выжигание порообразователя, метод пористых шаблонов, метод полимерной пены и др. [6,7]. Несмотря на многочисленные исследования, посвященные влиянию пористости на физические свойства керамических материалов, многие вопросы, касающиеся корреляции между микроструктурными особенностями, такими как распределение пор и морфология керамического каркаса, и

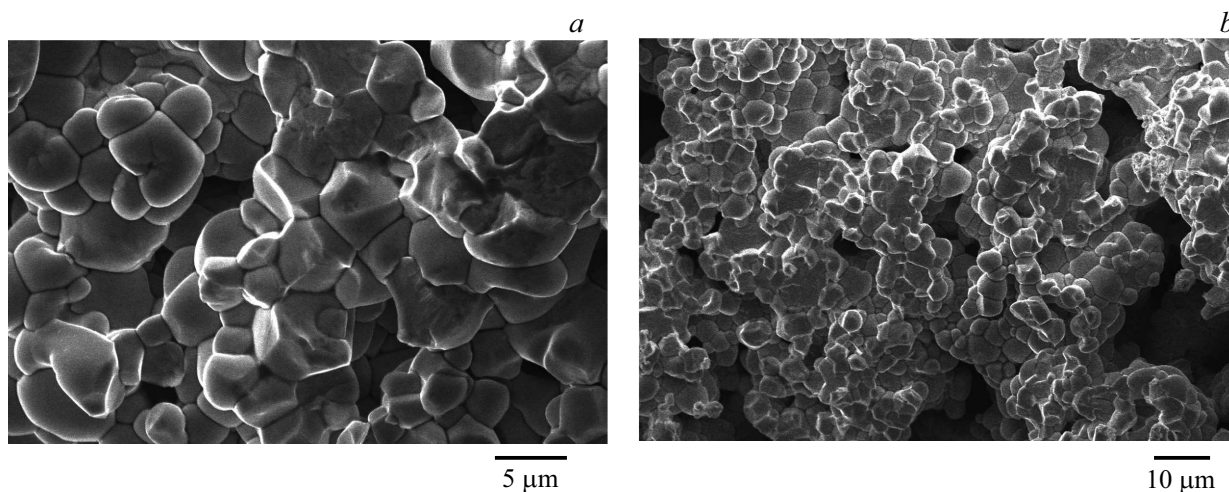


Рис. 1. СЭМ-изображение сколотой поверхности пористой пьезокерамики с относительной пористостью 25 %. *a* — зеренная структура, *b* — мезоструктурные элементы керамического каркаса.

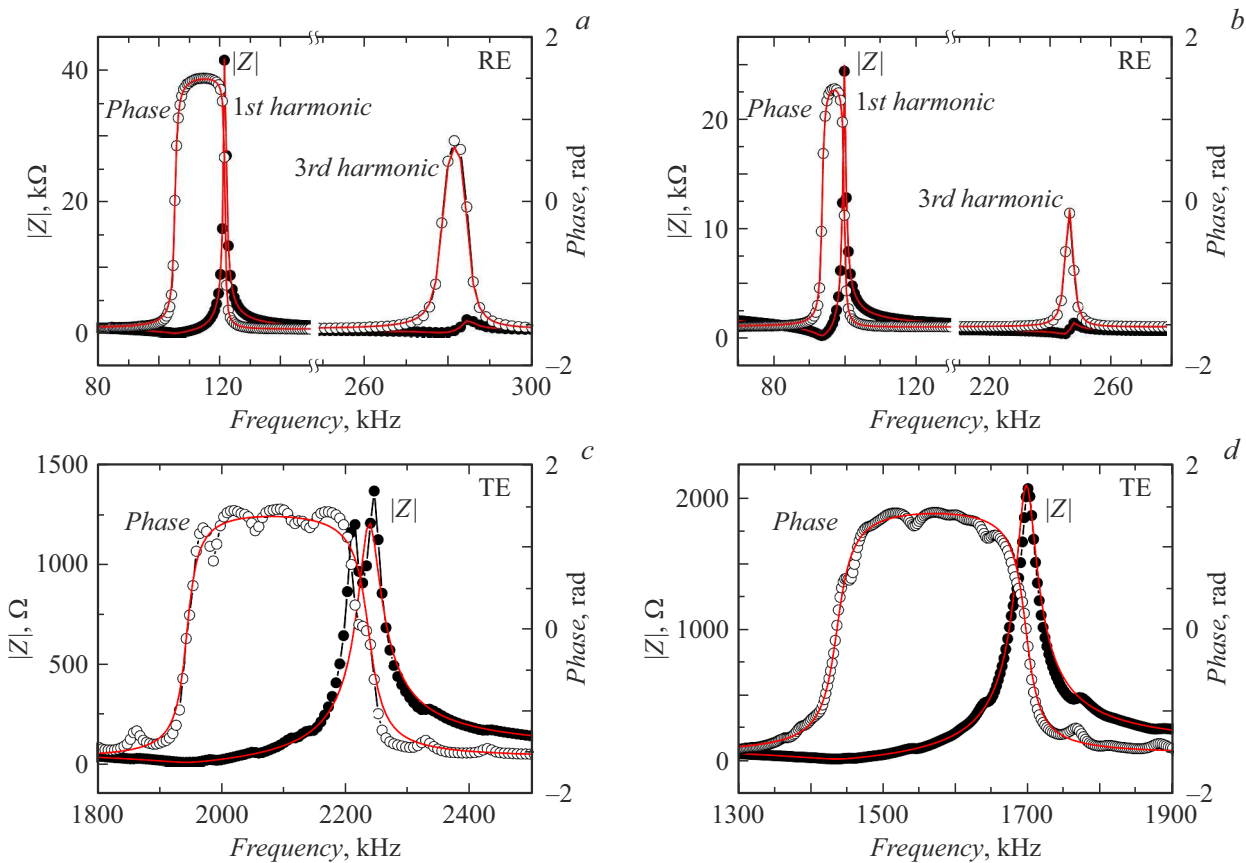


Рис. 2. Импедансные спектры радиальной (RE) (a, b) и толщинной (TE) (c, d) мод колебаний плотного (a, c) и пористого (b, d) пьезокерамических дисков диаметром 20 mm и толщиной 1 mm, поляризованных в направлении толщины.

результатирующими электромеханическими параметрами, остаются недостаточно изученными.

Для проведения сравнительного анализа микроструктурных характеристик и электромеханических свойств была выбрана сегнетомягкая пьезокерамика на основе твердых растворов системы цирконата-титаната свинца состава $\text{PbTi}_{0.45}\text{Zr}_{0.53}(\text{W}_{1/2}\text{Cd}_{1/2})_{0.02}\text{O}_3$. Остаточная пористость в образцах плотной пьезокерамики составляла 2.5%, что характерно для керамик, полученных обычным спеканием. Пористая пьезокерамика с относительной пористостью 25% и средним размером пор в диапазоне 10–30 μm получалась модифицированным методом выжигания порообразующих добавок [8].

Для определения полных наборов комплексных параметров использовались одномерные моды колебаний стандартных образцов, изготовленных из плотной и пористой пьезокерамики и соответствующих классу симметрии $6mm$ [9]. Образцы пьезокерамики с воженными серебряными электродами поляризовались на воздухе путем приложения к электродам постоянного электрического поля ($\sim 1.5 \text{ kV/mm}$) при нагревании выше температуры Кюри ($\sim 340^\circ\text{C}$) и последующем охлаждении до комнатной температуры.

Измерения пьезорезонансных спектров стандартных образцов проводились с помощью анализатора импедан-

са Agilent 4294A. Комплексные параметры исследованной пьезокерамики определялись в результате анализа измеренных пьезорезонансных спектров с помощью программы PRAP [10].

Микроструктурные исследования проводились на сколотых поверхностях образцов пьезокерамики с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) TM-100, Hitachi. Микрофотографии, иллюстрирующие основные особенности микроструктуры сегнетомягкой пористой пьезокерамики, представлены на рис. 1. Как следует из микрофотографии, пористая пьезокерамика характеризуется хаотичным распределением пор неправильной формы со средним размером 10–30 μm (рис. 1). Микрофотографии также демонстрируют наличие в пористой пьезокерамике жесткого трехмерного пьезокерамического каркаса с непрерывной квазистержневой структурой в направлении толщины образца (рис. 1, b). Разветвленная кораллоподобная микроструктура пористой керамики определяет основные особенности ее электромеханических свойств.

Спектры импеданса, измеренные для радиальной и толщинной мод колебаний пьезокерамических элементов, в качестве примера представлены на рис. 2. PRAP-анализ [10] измеренных пьезорезонансных спектров для радиальных, толщинных, сдвиговых и продоль-

Таблица 1. Полный набор комплексных констант плотной пьезокерамики состава $\text{PbTi}_{0.45}\text{Zr}_{0.53}(\text{W}_{1/2}\text{Cd}_{1/2})_{0.02}\text{O}_3$

Параметр*	Действительная часть	Мнимая часть	Параметр*	Действительная часть	Мнимая часть
Сдвиговая мода (ST)			Продольная мода (LE)		
f_s , Hz	$2.055 \cdot 10^6$	45282.8	f_s , Hz	$2.816 \cdot 10^5$	$7.984 \cdot 10^3$
f_p , Hz	$2.724 \cdot 10^6$	27674.1	f_p , Hz	$2.346 \cdot 10^5$	80.562
k_{15}	0.694	0.009	k_{33}	0.67	$7.98 \cdot 10^{-3}$
C_{55}^E , N/m ²	$2.604 \cdot 10^{10}$	$1.29 \cdot 10^9$	S_{33}^D , м ² /N	$3.07 \cdot 10^{-12}$	$3.49 \cdot 10^{-12}$
C_{55}^D , N/m ²	$5.027 \cdot 10^{10}$	$1.021 \cdot 10^9$	S_{33}^E , м ² /N	$1.41 \cdot 10^{-11}$	$1.40 \cdot 10^{-12}$
S_{55}^D , м ² /N	$1.98 \cdot 10^{-11}$	$3.94 \cdot 10^{-13}$	d_{33} , C/N	$2.63 \cdot 10^{-10}$	$6.01 \cdot 10^{-11}$
S_{55}^E , м ² /N	$3.831 \cdot 10^{-11}$	$1.792 \cdot 10^{-12}$	g_{33} , В·м/N	0.02	$1.90 \cdot 10^{-4}$
e_{15} , C/m ²	10.071	0.406	ε_{33}^T , F/m	$6.1 \cdot 10^{-9}$	$0.28 \cdot 10^{-9}$
h_{15} , В/м	$2.403 \cdot 10^9$	$7.734 \cdot 10^7$	Радиальная мода (RE)		
d_{15} , C/N	$3.851 \cdot 10^{-10}$	$3.361 \cdot 10^{-11}$	$f_{s1 \text{ harm.}}$, Hz	$1.05 \cdot 10^5$	659.44
g_{15} , В·м/N	0.048	0.001	$f_{s3 \text{ harm.}}$, Hz	$2.79 \cdot 10^5$	1540.87
ε_{11}^T , F/m	$8.047 \cdot 10^{-9}$	$0.799 \cdot 10^{-9}$	$f_{p1 \text{ harm.}}$, Hz	$1.218 \cdot 10^5$	296.435
ε_{11}^S , F/m	$4.182 \cdot 10^{-9}$	$0.304 \cdot 10^{-9}$	S_{11}^E , м ² /N	$13.351 \cdot 10^{-12}$	$0.123 \cdot 10^{-12}$
Толщинная мода (TE)			$ S_{12}^E $, м ² /N	$3.769 \cdot 10^{-12}$	$0.001 \cdot 10^{-12}$
f_s , Hz	$1.944 \cdot 10^6$	$1.323 \cdot 10^4$	$ d_{31} $, C/N	$95.807 \cdot 10^{-12}$	$3.372 \cdot 10^{-12}$
f_p , Hz	$2.236 \cdot 10^6$	17697.7	ε_{33}^T , F/m	$6.0 \cdot 10^{-9}$	$0.21 \cdot 10^{-9}$
k_t	0.533	0.001	k_p	0.565	0.006
C_{33}^D , N/m ²	$166.6 \cdot 10^9$	$2.6 \cdot 10^9$	σ^P	0.282	0.002
C_{33}^E , N/m ²	$119.2 \cdot 10^9$	$1.5 \cdot 10^9$	S_{66}^E , м ² /N	$34.242 \cdot 10^{-12}$	$0.245 \cdot 10^{-12}$
e_{33} , C/m ²	11.63	0.122	C_{66}^E , N/m ²	$29.202 \cdot 10^9$	$20.969 \cdot 10^7$
h_{33} , В/м	$40.810 \cdot 10^8$	$0.478 \cdot 10^8$	Дополнительные параметры		
ε_{33}^S , F/m	$2.85 \cdot 10^{-9}$	$0.34 \cdot 10^{-9}$	ρ , кг/м ³	$7.8 \cdot 10^3$	—
			Z_A , MRayl	34.8	—
			d_{33} , C/N	$260 \cdot 10^{-12}$	—
			(квазистат.)		

*Верхние индексы D и E отвечают электрически зажатому ($D = \text{const}$) и электрически свободному ($E = \text{const}$) образцу соответственно, а S и T отвечают механически зажатому ($S = \text{const}$) и механически свободному ($T = \text{const}$) образцу соответственно.

ных мод колебаний пьезокерамических элементов был использован для расчета полных наборов комплексных параметров исследованной плотной и пористой пьезокерамики, приведенных в табл. 1 и 2.

Как видно из табл. 1, плотная пьезокерамика характеризуется высокими значениями модулей упругости C_{33}^D , C_{55}^D и пьезомодулей d_{33} , d_{31} , а также коэффициентов электромеханической связи k_t , k_p . Пьезокерамика обладает высокой пьезочувствительностью g_{33} , низкими значениями диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$, механической добротности $Q_M^T = C_{33}^{D'}/C_{33}^{D''}$, а также диэлектрических потерь ($\text{tg } \delta = \varepsilon_{33}^{T''}/\varepsilon_{33}^{T'}$), определяемых как отношение мнимой и действительной частей соответствующих комплексных констант. Совокупность указанных параметров в сочетании с хорошо сформированной и однородной микроструктурой определяет широкое применение исследованной пьезокерамики в широкополосных ультразвуковых преобразователях, ультразвуковых датчиках с высокой чувствительностью и различных пьезоэлектрических устройствах.

В то же время пористая пьезокерамика с относительной пористостью 25 % (табл. 2) сохраняет высокие значения продольного пьезомодуля $d_{33} = 269$ pC/N, а также демонстрирует повышенные значения толщинного коэффициента электромеханической связи $k_t \approx 0.57$, превышающие аналогичные показатели для плотной керамики, более низкие значения диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0 = 585$ и диэлектрических потерь $\text{tg } \delta = 0.02$. Снижение $\text{tg } \delta$ связано с более развитой внутренней поверхностью пористой пьезокерамики, которая способствует фиксации доменных стенок и приводит к снижению $\text{tg } \delta$ [11].

Как было показано ранее [8], высокие значения пьезомодуля d_{33} пористой пьезокерамики обусловлены ее микроструктурными особенностями, а именно сохранением непрерывности квазистержневой керамической структуры в направлении толщины и остаточной поляризации образца. Уменьшение объема активного пьезоматериала в этом случае компенсируется ростом удельного давления, действующего на керамический каркас. Уменьшение поперечного пьезомодуля d_{31} и коэффици-

Таблица 2. Полный набор комплексных констант пористой пьезокерамики состава $\text{PbTi}_{0.45}\text{Zr}_{0.53}(\text{W}_{1/2}\text{Cd}_{1/2})_{0.02}\text{O}_3$ с пористостью 25 %

Параметр*	Действительная часть	Мнимая часть	Параметр*	Действительная часть	Мнимая часть
Сдвиговая мода (ST)			Продольная мода (LE)		
f_s , Hz	$1.468 \cdot 10^6$	$1.158 \cdot 10^5$	f_s , Hz	$2.093 \cdot 10^5$	$1.177 \cdot 10^3$
f_p , Hz	$1.785 \cdot 10^6$	$4.785 \cdot 10^4$	f_p , Hz	$2.492 \cdot 10^5$	$7.563 \cdot 10^2$
k_{15}	0.61	0.06	k_{33}	0.58	$3.4 \cdot 10^{-3}$
C_{55}^E , N/m ²	$1.74 \cdot 10^{10}$	$3.03 \cdot 10^9$	S_{33}^D , м ² /N	$1.77 \cdot 10^{-11}$	$2.52 \cdot 10^{-13}$
C_{55}^D , N/m ²	$2.79 \cdot 10^{10}$	$1.49 \cdot 10^9$	S_{33}^E , м ² /N	$2.74 \cdot 10^{-11}$	$3.28 \cdot 10^{-13}$
S_{55}^D , м ² /N	$3.58 \cdot 10^{-11}$	$1.95 \cdot 10^{-12}$	d_{33} , C/N	$2.52 \cdot 10^{-10}$	$5.06 \cdot 10^{-12}$
S_{55}^E , м ² /N	$5.58 \cdot 10^{-11}$	$9.63 \cdot 10^{-12}$	g_{33} , В·м/N	0.045	$7.21 \cdot 10^{-4}$
e_{15} , C/m ²	6.5	1.01	ε_{33}^T , F/m	$4.86 \cdot 10^{-9}$	$0.117 \cdot 10^{-9}$
h_{15} , В/м	$1.61 \cdot 10^9$	$1.66 \cdot 10^7$	Радиальная мода (RE)		
d_{15} , C/N	$3.52 \cdot 10^{-10}$	$1.19 \cdot 10^{-10}$	$f_{s1\text{ harm.}}$, Hz	$9.369 \cdot 10^4$	498
g_{15} , В·м/N	0.058	0.002	$f_{s3\text{ harm.}}$, Hz	$2.45 \cdot 10^5$	1216
ε_{11}^T , F/m	$6.2 \cdot 10^{-9}$	$0.181 \cdot 10^{-9}$	$f_{p1\text{ harm.}}$, Hz	$9.999 \cdot 10^4$	930
ε_{11}^S , F/m	$4.04 \cdot 10^{-9}$	$0.676 \cdot 10^{-9}$	S_{11}^E , м ² /N	$2.29 \cdot 10^{-11}$	$2.11 \cdot 10^{-13}$
Толщинная мода (TE)			$ S_{12}^E $, м ² /N	$6.21 \cdot 10^{-12}$	$0.094 \cdot 10^{-12}$
f_s , Hz	$1.436 \cdot 10^6$	$1.534 \cdot 10^4$	$ d_{31} $, C/N	$7.72 \cdot 10^{-11}$	$4.57 \cdot 10^{-12}$
f_p , Hz	$1.696 \cdot 10^6$	$1.394 \cdot 10^4$	ε_{33}^T , F/m	$4.68 \cdot 10^{-9}$	$0.186 \cdot 10^{-9}$
k_t	0.574	0.026	k_p	0.39	$1.19 \cdot 10^{-2}$
C_{33}^D , N/m ²	$7.22 \cdot 10^{10}$	$2.40 \cdot 10^9$	σ^P	0.27	$6.13 \cdot 10^{-3}$
C_{33}^E , N/m ²	$5.53 \cdot 10^{10}$	$4.19 \cdot 10^9$	S_{66}^E , м ² /N	$5.82 \cdot 10^{-11}$	$2.57 \cdot 10^{-13}$
e_{33} , C/m ²	7.21	0.241	C_{66}^E , N/m ²	$1.72 \cdot 10^{10}$	$7.57 \cdot 10^7$
h_{33} , В/м	$2.37 \cdot 10^9$	$1.63 \cdot 10^8$	Дополнительные параметры		
ε_{33}^S , F/m	$3.03 \cdot 10^{-9}$	$0.107 \cdot 10^{-9}$	ρ , кг/м ³	$6.08 \cdot 10^3$	—
			Z_A , MRayl	18.5	—
			d_{33} , C/N (квазистат.)	$269 \cdot 10^{-12}$	—

*Верхние индексы D и E отвечают электрически зажатому ($D = \text{const}$) и электрически свободному ($E = \text{const}$) образцу соответственно, а S и T отвечают механически зажатому ($S = \text{const}$) и механически свободному ($T = \text{const}$) образцу соответственно.

ента связи k_p обусловлено нарушением электромеханической связности пьезокерамического каркаса в поперечном направлении и быстрым увеличением соответствующих упругих податливостей пористой керамики.

Увеличение коэффициента электромеханической связи k_t толщинной моды колебаний пористого пьезокерамического диска и его приближение к продольному коэффициенту электромеханической связи k_{33} обусловлено частичным снятием механического зажатия квазистержневого пьезокерамического каркаса в поперечном направлении, характерного для плотной пьезокерамики.

Кроме того, пористая пьезокерамика с относительной пористостью 25 % характеризуется низкими значениями модуля упругости C_{33}^D и скорости звука $V_t^D = \sqrt{C_{33}^D/\rho}$, а также пониженными значениями поперечного пьезомодуля $d_{31} \approx -77$ pC/N и коэффициента связи $k_p = 0.39$, низким акустическим импедансом $Z = \sqrt{C_{33}^D/\rho} = 18.5$ MRayl и механической добротностью $Q_M^t = 30$.

Изменение пористости пьезокерамики позволяет изменять ее основные параметры контролируемым образом в широких пределах [8,12]. Эти особенности делают исследованную пористую пьезокерамику перспективной для использования в широкополосных ультразвуковых преобразователях и сенсорах с высокой чувствительностью и разрешающей способностью для медицинской диагностической и терапевтической аппаратуры, устройств неразрушающего контроля и диагностики [13].

Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание в сфере научной деятельности, проект № FENW-2026-0027).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A. Safari, E.K. Akdoğan, J.D. Leber, Jpn. J. Appl. Phys., **61**, SN0801 (2022). DOI: 10.35848/1347-4065/ac8bdc
- [2] Sh. Shrivastava, D.K. Rajak, T. Joshi, D.K. Singh, D.P. Mondal, Ceramics, **7**, 652 (2024). DOI: 10.3390/ceramics7020043
- [3] N. Horchidan, C.E. Ciomaga, R.C. Frunza, C. Capiani, C. Galassi, L. Mitoseriu, Ceram. Int., **42**, 9125 (2016). DOI: 10.1016/j.ceramint.2016.02.179
- [4] J. Wight, *Cellular ceramics - structure, manufacturing, properties and applications* (Wiley-VCH, Weinheim, 2005).
- [5] B. Zhang, Y. Yang, X. Fan, J. Mater. Sci. Technol., **168**, 1 (2024). DOI: 10.1016/j.jmst.2023.04.039
- [6] W. Ma, X. Zhou, H. Gao, Ch. Wang, H. Tan, Ch. Samart, J. Wang, T.N. An, Ch. Yan, Y. Hu, J. Wang, H. Zhang, Addit. Manuf., **93**, 104446 (2024). DOI: 10.1016/j.addma.2024.104446
- [7] M. Yan, Sh. Liu, Z. Xiao, X. Yuan, D. Zhai, K. Zhou, D. Zhang, G. Zhang, Ch. Bowen, Y. Zhang, Ceram. Int., **48**, 5017 (2022). DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.11.039
- [8] A.N. Rybyanets, IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control, **58**, 1492 (2011). DOI: 10.1109/TUFFC.2011.1968
- [9] *IEEE Standard on piezoelectricity. ANSI/IEEE Std. 176-1987* (Institute of Electrical and Electronics Engineers, N.Y., 1987).
- [10] *PRAP: Piezoelectric Resonance Analysis Program* (TASI Technical Software Inc.) [Электронный ресурс]. www.tasitechnical.com
- [11] A.N. Rybyanets, I.A. Shvetsov, N.A. Shvetsova, M.A. Marakhovsky, N.A. Kolpacheva, J. Adv. Dielectr., **15** (4), 2540001 (2025). DOI: 10.1142/S2010135X25400016
- [12] N.A. Shvetsova, I.A. Shvetsov, E.I. Petrova, D.I. Makarev, M.A. Marakhovsky, A.N. Rybyanets, Ferroelectrics, **618** (6), 1454 (2024). DOI: 10.1080/00150193.2024.2305586
- [13] A.N. Rybyanets, in *Advances in porous ceramics* (Nova Science Publ. Inc., N.Y., 2017), p. 53.