



Научная статья
2.6.17 – Материаловедение (технические науки)
УДК 67.02
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.01.019

ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОМПОЗИТА В СИСТЕМЕ «ЦИРКОНАТ–ТИТАНАТ СВИНЦА–ОРТОФОСФОРНАЯ КИСЛОТА»

Глеб Александрович Кошкин ¹, Чир Ген Пак ², Андрей Евгеньевич Розен ³, Виктор Викторович Кикот ⁴

^{1, 2, 3, 4} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

^{1, 4} Научно-исследовательский институт физических измерений, Пенза, Россия

¹ gl.koshkin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8353-7812>

² v.g.pak@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2877-7298>

³ aerozen@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3362-9617>

⁴ vkfax@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1258-2119>

Аннотация. Получен и исследован пьезоэлектрический композиционный материал системы «цирконат–титанат свинца–ортофосфорная кислота». В качестве пьезокерамического наполнителя использован материал ЦТС-19 с размером гранул от 45 до 63 мкм, от 63 до 125 мкм, от 125 до 250 мкм, от 250 до 500 мкм. Затворение материала производилось введением в пьезокерамику 85 % водного раствора ортофосфорной кислоты в количестве 10 % от массы керамики. Формообразование проведено методом одноосного холодного прессования под давлением 196 МПа. Образцы высушены при 200 °С, металлизированы при 700 °С серебряносодержащей пастой и поляризованы на воздухе в постоянном электрическом поле напряжённостью 2 кВ/мм при температуре 260 °С. Измерены значения плотности, диэлектрической проницаемости, тангенса угла диэлектрических потерь, механической добротности, продольного, поперечного и объёмного пьезомодуля полученного композита. По сравнению со спечённым керамическим материалом ЦТС-19 наблюдается снижение продольного и поперечного пьезомодуля, диэлектрической проницаемости и механической добротности, рост диэлектрических потерь. Установлено, что непропорциональное изменение продольного и поперечного пьезомодуля обусловило значительный рост объёмного пьезомодуля композита по сравнению со спечённым материалом. Выдвинуты предположения об обусловленности наблюдаемых явлений влиянием механических и электрических характеристик параэлектрических фаз (воздуха в порах и продуктов взаимодействия пьезокерамики и ортофосфорной кислоты).

Ключевые слова: композиционный материал, пьезоэлектрический материал, цирконат–титанат свинца, дисперсные частицы, фосфатные связующие, ортофосфорная кислота, пористость, пьезомодуль.

Для цитирования: Получение и исследование пьезоэлектрического композита в системе «цирконат–титанат свинца–ортофосфорная кислота» / Г. А. Кошкин [и др.]. // Ползуновский вестник. 2022. № 1. С. 139–146. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.01.019.

Original article

OBTAINING AND INVESTIGATION OF PIEZOELECTRIC COMPOSITE CONSISTING OF LEAD ZIRCONATE-TITANATE AND ORTHOPHOSPHORIC ACID

Gleb A. Koshkin ¹, Chir Gen Pak ², Andrey Ye. Rozen ³, Viktor V. Kikot ⁴

^{1,2,3,4} Penza State University, Penza, Russia

^{1,4} Science and Research Institute for Physical Measurements, Penza, Russia

¹ gl.koshkin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8353-7812>

² v.g.pak@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2877-7298>

³ aerozen@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3362-9617>

⁴ vkfax@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1258-2119>

Abstract. Piezoelectric composite material consisting of lead zirconate-titanate and orthophosphoric acid was obtained and investigated. Piezoelectric ceramic PZT-19 was used as filler with a controlled particle size distribution in ranges of 45 to 63 μm , 63 to 125 μm , 125 to 250 μm , 250 to 500 μm . Piezoelectric ceramic material was mixed with 85 % water solution of orthophosphoric acid added in the amount of 10 % of a PZT mass. Specimens were formed by uniaxial cold pressing under pressure of 196 MPa. Specimens were dried at 200 °C, metallized with silver based conductive paste at 700 °C, and then poled in air at electric field of 2 kV/mm at the temperature of 260 °C. Density, dielectric permittivity, dielectric loss factor, mechanical quality factor, and longitudinal, planar, and hydrostatic piezoelectric charge constants of obtained composite were measured. Compared to conventionally sintered PZT-19, obtained composite is characterized by decrease of longitudinal and planar piezoelectric charge constants, dielectric permittivity, mechanical quality factor and increase of dielectric loss factor. It is observed that different rate of decrease of longitudinal and planar piezoelectric charge constants lead to significant increase of hydrostatic charge constant, compared to a sintered piezoelectric material. The hypotheses are made to explain observed results with the influence of paraelectric phases (air in pores and products of a reaction between piezoelectric ceramics and orthophosphoric acid).

Keywords: composite material, piezoelectric material, lead zirconate-titanate, disperse particles, phosphate binders, orthophosphoric acid, porosity, piezoelectric charge constant.

For citation: Koshkin, G. A., Pak, Ch. G., Rozen, A. E. & Kikot, V. V. (2022). Obtaining and investigation of piezoelectric composite consisting of lead zirconate-titanate and orthophosphoric acid. *Polzunovsky vestnik*, (1). 139-146. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.01.019.

ВВЕДЕНИЕ

Пьезоэлектрические материалы находят широкое применение при изготовлении чувствительных элементов датчиков, исполнительных элементов актюаторов, частотных фильтров. Наиболее распространены пьезо-керамические материалы на основе цирконата-титаната свинца (ЦТС), сочетающие в себе высокие пьезоэлектрические характеристики, возможность их модифицирования в широких пределах и возможность применения в широком температурном интервале [1].

Важный недостаток, обуславливающий ограниченность использования ЦТС-керамики в чувствительных элементах датчиков гидростатического давления, – низкое значение гидростатического (объёмного) пьезомодуля d_h , характеризующего заряд, генериру-

емый пьезоэлементом при воздействии изостатического давления. Для керамических пьезоэлектриков значение d_h определяется соотношением [2]:

$$d_h = d_{33} + 2 \cdot d_{31}, \quad (1)$$

где d_{33} – пьезомодуль растяжения–сжатия вдоль оси поляризации; пКл/Н, d_{31} – пьезомодуль растяжения–сжатия перпендикулярно направлению поляризации, пКл/Н. При изостатическом давлении на пьезоэлемент заряды, создаваемые при сжатии параллельно и перпендикулярно направлению поляризации, имеют разные знаки, из-за чего происходит компенсация зарядов противоположного знака.

Существует несколько способов решения проблемы низкой гидростатической чувствительности ЦТС.

ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОМПОЗИТА В СИСТЕМЕ «ЦИРКОНАТ–ТИТАНАТ СВИНЦА–ОРТОФОСФОРНАЯ КИСЛОТА»

В первую очередь, возможна замена ЦТС на другие виды пьезокерамики, в частности, титанат свинца, характеризуемый высокой анизотропией характеристик [3]. При этом титанат свинца имеет низкий пьезомодуль, а получение плотных заготовок из материалов на его основе сопряжено с рядом трудно устранимых технологических трудностей [1].

Способы модифицирования ЦТС заключаются в повышении внутреннего трения в деформирующемся материале, позволяющего скомпенсировать пьезоэффект в направлении, перпендикулярном направлению поляризации керамики. Достигается это введением в фазу ЦТС большого количества сегнетомягких добавок [4] или включением в структуру материала параэлектрических фаз [5, 6]. Избыток сегнетомягких добавок приводит к значительному снижению температуры Кюри и, следовательно, ограничению температурного интервала применения пьезокерамики, поэтому получение многофазных материалов является более перспективным решением.

В качестве примесных фаз в ЦТС могут быть использованы твёрдые и газообразные вещества. В первом случае производится введение высокотемпературных керамических материалов, например, оксида алюминия [6]. Во втором – получение пористой структуры с использованием органических и неорганических порообразователей [5]. Высокая активность ЦТС при спекании (интенсивное испарение свинца наблюдается при температуре свыше 700 °С) [6] обуславливает химическое взаимодействие керамики и примесей, следствием чего может стать изменение состава и характеристик пьезокерамической фазы.

При этом хорошо известны и активно исследуются многофазные пьезоэлектрические композиционные материалы на основе параэлектрических матриц с диспергированными частицами пьезокерамики, в том числе, ЦТС, характеризующиеся пониженным относителем d_{33} значением d_{31} [8]. В наибольшей степени изучены композиты на полимерных матрицах: пьезоэлектрическом поливинилиденфториде (ПВДФ) [9] и параэлектриках: эпоксидных смолах [10–13], акриловых полимерах [14–16]. Важным преимуществом двух последних систем является возможность получения пьезоэлектрических красок. Основные недостатки полимерных матриц – низкая температура применения, обусловленная материалом матрицы, и потенциальная деградация полимеров под воздействием внешних факторов.

Известны неорганические связующие вещества на основе ортофосфорной кислоты и фосфатов металлов, характеризующиеся температурой применения свыше 1500 °С, высокой адгезией к металлам и неметаллам, отверждением без необходимости высокотемпературного обжига, возможностью получения композитов на фосфатной матрице с различными включениями [17]. Указанные особенности делают фосфатные связующие перспективными матричными материалами для получения пьезоэлектрических композитов, в том числе характеризующихся повышенными значениями объёмного пьезомодуля d_h .

Имеющиеся результаты исследований подтверждают принципиальную возможность получения композитов в системе «ЦТС–фосфатное связующее», но пьезоэлектрические характеристики полученного материала оказались неудовлетворительными [18]. В связи с этим целью настоящей работы является получение композиционного материала на основе фосфатного связующего с дисперсными частицами пьезокерамической фазы, обладающего повышенными пьезоэлектрическими характеристиками.

МЕТОДЫ

В качестве исходных материалов в настоящей работе использованы сегнетомягкий пьезокерамический материал общего назначения ЦТС-19 ОСТ 11 0444-87 и 85 % водный раствор термической ортофосфорной кислоты (ОФК) ГОСТ 10678-76.

Выбор ЦТС-19 обусловлен доступностью материала, наличием в открытой печати химического состава ЦТС-19 [19] и высокими пьезоэлектрическими характеристиками.

Чистая ОФК является самым простым с точки зрения состава фосфатным вяжущим материалом и также характеризуется высокой доступностью.

В связи с тем, что композит системы «ЦТС–фосфатное связующее», основанный на мелкодисперсном пьезоматериале, обладает низким значением пьезомодуля d_{33} (менее 10пКл/Н) [18], в настоящей работе ЦТС-19 предварительно спечён для завершения всех процессов порообразования и механически измельчён. Режим спекания подобран таким образом, чтобы обеспечить плотность спечённой заготовки не менее 7,5 г/см³. Измельчение спечённых заготовок проводилось с использованием ручного гидравлического пресса.

Порошок ЦТС-19 рассеян по фракциям 45...63 мкм, 63...125 мкм, 125...250 мкм, 250...500 мкм. В порошок каждой фракции

введён 85 % водный раствор ОФК в количестве 10 % масс. При смешивании компонентов наблюдался слабый саморазогрев и незначительное газовыделение, свидетельствующие об экзотермической реакции между ОФК и ЦТС. Смесь представляла собой влажный порошок.

Из полученных формовочных масс под давлением 196 МПа отпрессовано по пять заготовок в форме диска диаметром 12,5 мм и толщиной 2,0...2,5 мм. Заготовки высушены в сушильном шкафу при температуре 200 °С в течение 8 ч.

Высушенные заготовки отшлифованы по плоскости до толщины 1,8...2,2 мм, произведён замер плотности до поляризации ρ_z . Плоскости образцов металлизированы вжиганием серебро-содержащей пасты. Температура вжигания составила 700 °С, длительность – 1 ч.

Металлизированные заготовки поляризованы в воздушной среде при температуре 260 °С в электрическом поле напряжённостью 2 кВ/мм на установке ПВС-5 (производства НКТБ «Пьезоприбор» г. Ростов-на-Дону). Поляризованные образцы подвергнуты искусственному старению при температуре 150 °С в течение 2 ч и естественному старению в течение 3 суток. Для состаренных образцов измерена плотность после поляризации ρ_n , диэлектрические и пьезоэлектрические характеристики.

Измерение d_{33} проведено квазистатическим методом на приборе APCYE3270 (производства APC International, США).

Измерение относительной диэлектрической проницаемости K_{33}^T , тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$, пьезомодуля d_{31} , механической добротности Q_m произведено динамическим методом резонанса–антирезонанса по методике ОСТ 11 0444-87 с использованием прибора «Пьезо-П» (производства НКТБ «Пьезоприбор» г. Ростов-на-Дону).

Значение пьезомодуля d_h получено расчётным путём согласно формуле (1).

Таблица 1 – Усреднённые значения характеристик образцов

Table 1 - Mean characteristics of obtained specimens

Характеристика	Композиционный материал с дисперсным ЦТС, размер частиц наполнителя, мкм				Спечённый ЦТС-19
	45...63	63...125	125...250	250...500	
ρ_z , г/см ³	5,84±0,08	5,83±0,13	5,86±0,07	5,56±0,10	7,53±0,06
ρ_n , г/см ³	5,84±0,08	5,83±0,13	5,86±0,07	5,56±0,10	7,53±0,06
K_{33}^T	673±75	737±72	766±33	582±49	1847±127
$\text{tg}\delta$	0,405±0,070	0,414±0,071	0,357±0,023	0,369±0,098	0,021±0,006
Q_m	9,1±4,7	5,9±3,3	7,1±3,6	7,7±4,2	63,7±3,2
d_{33} , пКл/Н	237±27	264±40	281±16	162±46	475±57
$-d_{31}$, пКл/Н	51,0±3,3	57,6±3,7	63,6±2,2	57,0±6,5	194±34
d_h , пКл/Н	135±21	149±42	154±19	45±19	87±15

Значение удельного электрического сопротивления ρ_z рассчитано по результатам измерения электрического сопротивления с использованием тераомметра Е6-13А.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Значения характеристик образцов композита с наполнителями различного гранулометрического состава приведены в таблице 1. Также в таблице 1 приведены измеренные характеристики спечённого материала ЦТС-19, полученные на стандартных образцах типоразмера «диск» ОСТ 11 0444-87. Расчёт погрешностей измерения значений характеристик произведён для доверительного интервала 0,95 при допущении, что характеристики образцов подчиняются нормальному распределению.

Внешний вид образцов композита приведён на рисунке 1.



Рисунок 1 – Внешний вид образцов композита с различным размером частиц наполнителя:

- 1 – 45...63 мкм; 2 – 63...125 мкм;
- 3 – 125...250 мкм; 4 – 250...500 мкм

Figure 1 - The appearance of composite specimens with varying PZT particle size:

- 1 - 45...63 μm , 2 - 63...125 μm ,
- 3 - 125...250 μm , 250...500 μm

Удельное электрическое сопротивление ρ_z для образцов композита и спечённой керамики составило не менее $6 \cdot 10^8$ Ом·м.

ОБСУЖДЕНИЕ

Характеристики полученного композита значительно отличаются от характеристик спечённого материала, также наблюдается зависимость характеристик от гранулометрического состава пьезокерамического наполнителя.

Очевидно, что значительное снижение плотности, наблюдаемое для материалов на основе ОФК, обусловлено высокой пористостью матрицы, полученной при взаимодействии ОФК и ЦТС, увеличением вязкости формовочных масс с уменьшением размера гранул наполнителя, а также несовершенством упаковки частиц наполнителя. Первые два фактора преобладают для материалов с размером частиц от 45 до 250 мкм, в которых уменьшение размера зерна приводит к снижению плотности. В случае крупнодисперсного наполнителя с размером частиц от 250 до 500 мкм снижение плотности обусловлено третьим фактором – несовершенством упаковки частиц наполнителя.

Важно отметить, что для заготовок до вжигания электродов и после поляризации не наблюдается изменения плотности, что косвенно свидетельствует о постоянстве состава системы при температуре 700 °С и согласуется с данными по кристаллизации неорганических фосфатных полимеров [20] и испарению оксида свинца из ЦТС [7]. Тем не менее, для полного исключения влияния термообработки при вжигании электродов на характеристики композита необходимо провести тщательный рентгенофазовый анализ материала до и после воздействия температур.

Диэлектрическая проницаемость K_{33}^T композиционного материала также значительно ниже по сравнению со спечённой керамикой, что обусловлено значительно более низкой диэлектрической проницаемостью отсутствующих в спечённой керамике параэлектрических фаз – воздуха и продуктов реакции ОФК и ЦТС – расположенных электрически последовательно с пьезокерамикой.

Полученный материал характеризуется аномально высокими значениями тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ пропорционального потерям энергии при прохождении через диэлектрик переменного электрического тока. С точки зрения механизмов формирования диэлектрических характеристик сегнетоэлектриков высокие диэлектрические потери могут свидетельствовать о значительной подвижности границ доменов спонтанной поляризации, характерной для сегне-

томягких материалов [1], наличии большого числа свободных носителей заряда или высокой пористости материала. Доменная структура ЦТС-19 при получении композита не затронута в связи с тем, что размер гранул заведомо больше размера доменов спонтанной поляризации, высокое удельное электрическое сопротивление свидетельствует о небольшом количестве свободных носителей заряда, таким образом, основным фактором диэлектрических потерь является высокая пористость.

Механическая добротность Q_m обратно пропорциональна потерям энергии при прохождении через материал упругих механических колебаний. Значительное снижение добротности композита в сравнении со спечённой керамикой обусловлено как высокой пористостью, так и наличием продуктов реакции ЦТС и ОФК, значительно отличающихся от ЦТС по механическим характеристикам. Для чувствительных элементов, функционирующих в режиме изостатического давления, предпочтительна минимизация показателя добротности для скорейшего затухания уже зафиксированных механических колебаний.

Сравнение значений пьезомодулей d_{33} , d_{31} , d_h показывает, что для полученного композита характерно снижение как d_{33} , так и d_{31} , но при этом d_{31} снижается в большей степени, следствием чего становится рост d_h до двух раз относительно спечённой керамики. Причина столь значительного снижения d_{31} с наибольшей вероятностью связана с воздействием продуктов реакции ЦТС и ОФК, препятствующих в силу своих механических характеристик преобразованию нормальных направлению поляризации усилий в параллельные. Наиболее вероятная причина снижения d_{33} композита в сравнении со спечённой керамикой и максимума d_{33} для наиболее плотного состава – уменьшение доли пьезокерамического материала в поверхностном слое, взаимодействующем с электродом, т.к. прямая регистрация электрического заряда возможно только с поверхности пьезоэлектрика.

При этом нельзя исключать и того, что использованный для измерения d_{31} динамический метод резонанса–антирезонанса, разработанный для исследования характеристик спечённой пьезокерамики, не применим для композиционного материала.

Исходя из приведённых результатов, перед дальнейшими исследованиями системы «ЦТС–ОФК» стоят следующие задачи:

- определить применимость метода резонанса–антирезонанса для измерения пьезомодуля d_{31} пьезоэлектрических композитов;

- исследовать взаимодействие пьезокерамики и ОФК: определить химический и фазовый состав, микроструктуру, механические и электрические характеристики, особенности фазовых переходов;

- разработать токопроводящие композиционные материалы на основе фосфатных связующих с целью формирования электродов на поверхности пьезоэлектрического композита без вжигания;

- разработать и исследовать способы снижения пористости композита с целью снижения диэлектрических потерь;

- проверить возможность получения пьезоэлектрических композитов на основе фосфатного связующего при меньшем давлении или без использования прессования.

Решение поставленных задач позволит исчерпывающе описать фундаментальные процессы структурообразования в системе «ЦТС–фосфатное связующее», оптимизировать процесс получения объёмных высокочувствительных композиционных пьезоматериалов на основе этой системы и создать задел для получения пьезоэлектрических красок на неорганических связующих. Объёмные композиты могут быть использованы для замены пористых спечённых керамических материалов в чувствительных элементах датчиков гидростатического давления, а пьезочувствительные краски – для получения функциональных покрытий на различных конструкциях, в том числе при формировании систем структурного мониторинга работоспособности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение литературных источников показало, что одним из перспективных направлений исследования в области пьезоэлектрических композитов является получение материалов на основе матриц неорганических связующих, в том числе на фосфатной основе.

Для подтверждения возможности получения высокочувствительных композитов системы «ЦТС–ОФК» с повышенными характеристиками изготовлены и исследованы образцы композита с наполнителем ЦТС-19 различного гранулометрического состава.

Исследование характеристик полученных образцов показало, что пьезоэлектрический композит системы «ЦТС–ОФК» характеризуется повышенным до двух раз в сравне-

нии со спечённым ЦТС объёмным пьезомодулем d_h , и высокой пористостью. При этом высокая пористость и наличие продуктов взаимодействия ЦТС и ОФК приводит к снижению диэлектрической проницаемости, механической добротности продольного d_{33} и поперечного d_{31} пьезомодулей, росту диэлектрических потерь.

Таким образом, цель работы – получение композиционного материала на основе ЦТС и ОФК, обладающего повышенными пьезоэлектрическими характеристиками – успешно достигнута.

На основе анализа полученных результатов установлены направления дальнейших исследований материалов системы «ЦТС–ОФК»:

- доработка существующих методик измерения пьезоэлектрических характеристик материалов;

- изучение взаимодействия пьезокерамики и ОФК в части закономерностей формирования фазового состава и микроструктуры;

- разработка токопроводящих композитов на основе фосфатных связующих для получения электродов, не требующих вжигания;

- снижение пористости композита;

- разработка пьезокрасок на основе ЦТС и фосфатных связующих.

Решение поставленных задач позволит исчерпывающе описать фундаментальные процессы структурообразования в системе «ЦТС–фосфатное связующее», заменить пористые спечённые материалы в датчиках гидростатического давления и разработать пьезоэлектрические краски для систем структурного мониторинга работоспособности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яффе Б., Кук, У.Р. Яффе, Г. Пьезоэлектрическая керамика. Москва : Мир, 1974. 290 с.

2. Антоненко А.М., Кудзин А.Ю., Гавшин М.Г. Влияние доменной структуры на электромеханические свойства сегнетокерамики ЦТС и МНВТ // Физика твердого тела. 1997. Т. 39. № 5. С. 920–921.

3. Титов С.В., Резниченко Л.А., Разумовская О.Н. Высокоэффективные пьезоэлектрические керамические материалы на основе титаната свинца, модифицированного редкоземельными элементами (РЗЭ), для ультразвуковых приборов в медицинской практике // Известия ТРТУ. 2000. № 4 (18). С. 166–167.

4. Пьезоэлектрический керамический материал : пат. 2498958 Рос. Федерация № 2012124131/03; заявл. 08.06.2021; опубл. 20.11.2013. Бюл. № 32. 7 с.

5. Способ получения композиционного пьезоматериала : пат. 2414017 Рос. Федерация

ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОМПОЗИТА В СИСТЕМЕ «ЦИРКОНАТ–ТИТАНАТ СВИНЦА–ОРТОФOSФОРНАЯ КИСЛОТА»

№ 2010108372/28; заявл. 10.03.2010; опубл. 10.03.2011. Бюл. № 7. 9 с.

6. Способ получения композиционного пьезоматериала : пат. 2623693 Рос. Федерация № 2015151735; заявл. 03.12.2015; опубл. 08.06.2017. Бюл. № 16. 14 с.

7. Смажевская Е.Г., Фельдман Н.Б. Пьезоэлектрическая керамика. Москва : Советское радио. 1971. 200 с.

8. Пьезоэлектрический отклик и особенности микрогеометрии нового композита на основе сегнетопьезокерамики ЦТС-19 / П.А. Борзов [и др.] // Нано- и микросистемная техника. 2015. № 6. С. 22–29.

9. Dielectric and piezoelectric properties of PVDF/PZT composites: A review / A. Jain [et al.] // Polym. Eng. Sci. 2015. Vol. 55. № 7. P. 1589–1616. doi10.1002/pen.24088.

10. Egusa S., Iwasawa N. Piezoelectric paints as one approach to smart structural materials with health-monitoring capabilities // Smart Mater. Struct. 1998. Vol. 7. № 4. P. 438–445. doi 10.1088/0964-1726/7/4/002.

11. Giurgiutiu V., Lin B. In situ fabricated smart material active sensors for structural health monitoring // Smart Materials III: SPIE, 2004. Vol. 5648. P. 68–78. doi 10.1117/12.582146.

12. Kang L.-H. Vibration and impact monitoring of a composite-wing model using piezoelectric paint // Adv. Compos. Mater. 2014. Vol. 23. № 1. P. 73–84. doi 10.1080/09243046.2013.862390.

13. Han D.-H., Kang L.-H. Piezoelectric properties of paint sensor according to piezoelectric materials // Funct. Compos. Struct. 2020. Vol. 2. № 2. P. 1–11. doi 10.1088/2631-6331/ab90e1.

14. Payo I., Hale J.M. Dynamic characterization of piezoelectric paint sensors under biaxial strain // Sens. Actuators Phys. 2010. Vol. 163. № 1. P. 150–158. doi 10.1016/j.sna.2010.08.005.

15. Payo I., Hale J.M. Sensitivity analysis of piezoelectric paint sensors made up of PZT ceramic powder and water-based acrylic polymer // Sens. Actuators Phys. 2011. Vol. 168. № 1. P. 77–89. doi 10.1016/j.sna.2011.04.008.

16. Energy harvesting from piezoelectric paint films under biaxial strain / I. Payo [et al.] // Smart Mater. Struct. 2020. Vol. 29. № 5. P. 055008. doi 10.1088/1361-665X/ab79b4.

17. Судакас Л.Г. Фосфатные вяжущие системы. Санкт-Петербург : Квинтет, 2008. 254 с.

18. Кошкин Г.А., Пак Ч.Г., Розен А.Е., Кикот В.В., Андреев, В.Г. Получение композиционного материала системы «цирконат–титанат свинца – фосфатное связующее» // Международный симпозиум «Надежность и качество». Пенза : ПГУ, 2021. Т. 2.

19. Глозман И.А. Пьезокерамические материалы в электронной технике. Москва–Ленинград: Энергия, 1965. 192 с.

20. Магилат В.А. Жаростойкий газобетон на основе алюмоборфосфатного связующего и высокоглиноземистых отходов нефтехимии : автор. дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2002. 20 с.

Информация об авторах

Г. А. Кошкин – аспирант кафедры «Сварочное, литейное производство и материаловедение» Пензенского государственного университета.

Ч. Г. Пак – кандидат технических наук, доцент кафедры «Сварочное, литейное производство и материаловедение» Пензенского государственного университета.

А. Е. Розен – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Сварочное, литейное производство и материаловедение» Пензенского государственного университета.

В. В. Кикот – кандидат технических наук, доцент кафедры «Ракетно-космическое и авиационное приборостроение» Пензенского государственного университета.

REFERENCES

1. Jaffe, B., Cook, W.R. & Jaffe, H. (1974). *Piezoelectric ceramics*. Moscow: Mir. (In Russ.).

2. Antonenko, A.M., Kudzin, A.Yu. & Gavshin, M.G. (1997). Influence of domain structure on electromechanical properties of PZT and $\text{Mx}(\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5})_{1-x}\text{TiO}_3$ ferroelectric ceramics. *Physics of the Solid State*, 39 (5), 920-921. (In Russ.).

3. Titov, S.V., Reznichenko, L.A. & Razumovskaya, O.N. (2000). High performance piezoelectric ceramic materials based on lead titanate, modified with rare earth elements, for medical ultrasonic devices. *Izvestiya TSURE*, 4 (18), 166-167. (In Russ.).

4. Reznichenko, L.A., Dudkina, S.I., Talanov, M.V., Razumovskaya, O.N. & Verbenko, I.A. (2013). Piezoelectric ceramic material. *Pat.2498958. Russian Federation, published on 20.11.2013*, Bull. No. 32. (In Russ.).

5. Rybyanets, A.N. (2011). Method of producing composite piezoelectric material *Pat. 2414017. Russian Federation, published on 10.03.2011*, Bull. No. 7. (In Russ.).

6. Naumenko, A.A., Rybyanets, A.N. & Shvetsova, N.A. (2017). A method of obtaining composite piezomaterial. *Pat. 2623693. Russian Federation, published on 08.06.2017*, Bull. No. 16. (In Russ.).

7. Smazhevskaya, Ye.G. & Fel'dman, N.B. (1971). *Piezoelectric ceramics*. Moscow: Soviet Radio. (In Russ.).

8. Borzov, P.A., Topolov, V.Yu., Vorontsov, A.A., & Bryl', O.Ye. (2015). Piezoelectric Response and Microgeometric Features of a New Composite Based on ZTS-19 Ferroelectric Ceramics. *Nano- and Microsystems Technology*, 6, 22-29. (In Russ.).

9. Jain, A., Prashanth, K.J., Sharma, A.K., Jain, A. & Rashmi, P.N. (2015). Dielectric and piezoelectric properties of PVDF/PZT composites: A review. *Polymer Engineering & Science*, 55(7), 1589-1616. doi 10.1002/pen.24088.

10. Egusa, S. & Iwasawa, N. (1998). Piezoelectric paints as one approach to smart structural materi-

als with health-monitoring capabilities. *Smart Materials and Structures*, 7(4), 438-445. doi 10.1088/0964-1726/7/4/002.

11. Giurgiutiu, V. & Lin, B. (2004). In situ fabricated smart material active sensors for structural health monitoring. *Smart Materials III*, 5648, 68-78. doi10.1117/12.582146.

12. Kang, L.-H. (2014). Vibration and impact monitoring of a composite-wing model using piezoelectric paint. *Advanced Composite Materials*, 23(1), 73-84. doi 10.1080/09243046.2013.862390.

13. Han, D.-H. & Kang, L.-H. (2020). Piezoelectric properties of paint sensor according to piezoelectric materials. *Functional Composites and Structures*, 2(2), 1-11. doi 10.1088/2631-6331/ab90e1.

14. Payo, I. & Hale, J.M. (2010). Dynamic characterization of piezoelectric paint sensors under biaxial strain. *Sensors and Actuators A: Physical*, 163(1), 150-158. doi 10.1016/j.sna.2010.08.005.

15. Payo, I. & Hale, J.M. (2011). Sensitivity analysis of piezoelectric paint sensors made up of PZT ceramic powder and water-based acrylic polymer. *Sensors and Actuators A: Physical*, 168(1), 77-89. doi 10.1016/j.sna.2011.04.008.

16. Payo, I., Rodriguez, D., Oliva, J. & Valverde, D. (2020). Energy harvesting from piezoelectric paint films under biaxial strain. *Smart Materials and Structures*, 29(5), 1-13. doi 10.1088/1361-665X/ab79b4.

17. Sudakas, L.G. (2008). *Phosphate binding systems*. Saint-Petersburg: Kvintet. (In Russ.).

18. Koshkin, G.A., Pak, Ch.G., Rozen, A.Ye., Kikot, V.V. & Andreyev, V.G. (2021). Obtaining the

composite material consisting of lead zirconate-titanate and phosphate binder. *Transactions of the international symposium on reliability and quality*. Penza: PSU. (In Russ.).

19. Gluzman, I.A. (1965). *Piezoelectric ceramic materials in electronics*. Moscow : Energy. (In Russ.).

20. Magilat, V.A. (2002). Refractory porous concrete based on aluminum-boron-phosphate binder and high-alumina byproducts of petroleum chemistry. Extended abstract of candidate's thesis. Ufa. (In Russ.).

Information about the authors

G. A. Koshkin – post-graduate student of *Welding and Foundry Engineering, Materials Science Department of Penza State University*.

Ch. G. Pak – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the *Welding and Foundry Engineering, Materials Science Department of Penza State University*.

A. Ye. Rozen. – Doctor of Technical Sciences, Head of the *Welding and Foundry Engineering, Materials Science Department of Penza State University*.

V. V. Kikot – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department «Rocket-space and aviation instrumentation» of *Penza State University*.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.*

Статья поступила в редакцию 31.01.2022; одобрена после рецензирования 03.03.2022; принята к публикации 10.03.2022.

The article was received by the editorial board on 31 Jan 22; approved after reviewing on 3 Mar 22; accepted for publication on 10 Mar 22.