



## К ВОПРОСУ О ПОЛУЧЕНИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТОЛСТОПЛЁНОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ФОСФАТНЫХ СВЯЗУЮЩИХ И ПЬЕЗОКЕРАМИКЕ СИСТЕМЫ ЦТС

Глеб Александрович Кошкин <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт физических измерений, Пенза, Россия

<sup>1</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

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

**Аннотация.** В работе экспериментально подтверждена возможность получения пьезоэлектрического композиционного покрытия на основе фосфатного связующего и дисперсного пьезокерамического наполнителя на основе цирконата-титаната свинца. Дисперсный наполнитель получен предварительным спеканием пьезокерамики до плотности  $7,5 \text{ г/см}^3$  и высокоэнергетическим помолом в планетарной шаровой мельнице. В качестве фосфатного связующего использована чистая ортофосфорная кислота и ортофосфорная кислота, пассивированная алюминием. Чистая и пассивированная ортофосфорная кислота введена в количестве 1, 5, 10, 15, 20 % сверх массы наполнителя. Компоненты смешаны и разбавлены водой до получения пастообразной консистенции. Паста нанесена на нержавеющую сталь методом трафаретной печати, высушена при комнатной температуре, покрыта графитовым электродом и поляризована в поле напряжённостью  $1 \text{ кВ/мм}$  при охлаждении от температуры  $100$  и  $290 \text{ }^\circ\text{C}$  (температуры Кюри наполнителя). После каждого цикла поляризации измерены значения пьезомодуля  $d_{33}$ , электрической ёмкости  $C_0$  и тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$ . Пьезоэлектрические характеристики обнаружены только для покрытия, содержащего 10 % активной жидкой фазы: при меньшем содержании покрытие имело низкую прочность, при более высоком – не проявляло пьезоэлектрических характеристик после поляризации. Поляризация при охлаждении от температуры Кюри привела к значительному повышению  $d_{33}$ , причём покрытие на основе пассивированной кислоты характеризуется вдвое более высоким значением  $d_{33}$ . На основании полученных результатов предложены механизмы формирования структуры и характеристик пьезопокрытия рассматриваемой системы. Указаны основные способы управления характеристиками получаемого покрытия: пассивация ортофосфорной кислоты, регулирование содержания активной жидкой фазы и термическая обработка нанесённого покрытия. Предложены дальнейшие направления работ с целью получения пьезоэлектрических покрытий на основе фосфатных связующих и пьезокерамического наполнителя.

**Ключевые слова:** пьезоэлектрическое покрытие; фосфатное связующее; фосфатная краска; пьезоэлектрический композит; цирконат-титанат свинца; ортофосфорная кислота; пассивация; пьезомодуль; электрическая ёмкость; диэлектрические потери; поляризация.

---

**Для цитирования:** Кошкин Г. А. К вопросу о получении композиционных пьезоэлектрических толстоплёночных покрытий на фосфатных связующих и пьезокерамике системы ЦТС // Ползуновский вестник. 2022. № 4. Т. 2. С. 118–124. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.4.2.015. EDN: <https://elibrary.ru/QINORE>.

---

Original article

## ON THE MATTER OF OBTAINING THE COMPOSITE PIEZOELECTRIC THICK FILM COATINGS BASED OF PHOSPHATE BINDERS AND PZT PIEZO CERAMICS

Gleb A. Koshkin <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Science and Research Institute for Physical Measurements, Penza, Russia

<sup>1</sup> Penza State University, Penza, Russia

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

**Abstract.** *The possibility of producing piezoelectric composite coating based on the phosphate binder and dispersed lead zirconate-titanate based piezoelectric ceramic filler in experimentally proven in this work. Disperse filler is manufactured by sintering piezoelectric ceramics up to the density of 7.5 g/cm<sup>3</sup> and high energy milling of sintered ceramics in planetary ball mill. Pure orthophosphoric acid and orthophosphoric acid passivated by introduction of aluminum powder were used as a phosphate binder. Pure and passivated orthophosphoric acid is added to the filler in the amount of 1, 5, 10, 15, 20 % in excess of a filler weight. Components are mixed and thinned with water to a paste consistency. Paste was applied on a stainless steel surface via screen printing, dried at room temperature, coated with graphite electrode and poled in 1 kV/mm static electric field during cooling from 100 and 290 °C (the latter being Curie temperature of a filler ceramics). After each poling cycle the values of piezoelectric modulus  $d_{33}$ , electric capacitance  $C_0$ , and dielectric loss factor  $\text{tg}\delta$  were measured. Piezoelectric properties are found for coating containing 10 % of active electric phase, as coatings with lower content had insufficient mechanical strength and coatings with higher content showed no piezoelectric properties after poling. Poling under cooling from Curie temperature of a filler lead to the significant increase in  $d_{33}$ , and coating based on passivated orthophosphoric acid had double the value of  $d_{33}$  compared to one based on pure acid. Based on obtained results mechanisms of structure and properties emergence of a piezoelectric coating in described system were proposed. Main ways to control the properties of a produced coating are noted: passivation of orthophosphoric acid, controlling the active liquid phase content and thermal treatment of produced coating. Directions of the further work to obtain piezoelectric coatings based on phosphate binders and piezoelectric ceramic fillers are proposed.*

**Keywords:** *piezoelectric coating; phosphate binder; phosphate paint; piezoelectric composite; lead zirconate-titanate; orthophosphoric acid; passivation; piezoelectric modulus; electric capacitance; dielectric loss; polarization.*

---

**For citation:** Koshkin, G. A. (2022). On the matter of obtaining the composite piezoelectric thick film coatings based of phosphate binders and PZT piezo ceramics. *Polzunovskiy vestnik*, 4(2), 118-124. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.4.2.015. EDN: <https://elibrary.ru/QINORE>.

---

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших задач, стоящих сейчас перед наукой и техникой, является техническое обслуживание, т.е. поддержание в функционирующем и безаварийном состоянии сложных технических объектов: зданий, сооружений, сложного промышленного оборудования, объектов инфраструктуры. Техническое обслуживание невозможно проводить в отсутствие полной и своевременно получаемой информации о состоянии, работоспособности и оставшемся эксплуатационном ресурсе конструкции. Для сбора и обработки информации предложена концепция структурного мониторинга работоспособности (СМР), в рамках которой в конструкцию инте-

грируют массив преобразователей (датчиков), на основании сигнала которых аналитическая система определяет как текущее состояние конструкции, так и оставшийся эксплуатационный ресурс [1].

Функционирование систем СМР невозможно без разработки простого, надёжного и экономически эффективного решения для создания массивов датчиков. Одним из таких решений является использование инкорпорированных в конструкцию простых чувствительных элементов вместо полноценных датчиков, в частности, закреплённых на поверхности или погруженных в объём изделия пьезоэлементов в качестве простых параметрических датчиков [2, 3]. Основными недостат-

ками подобного решения являются, во-первых, хрупкость и ограничения на размер пьезокерамического элемента, накладываемые керамической технологией, и во-вторых, наличие между закреплённым на поверхности пьезоэлементом и конструкцией слоя связующего, учёт влияния которого сопряжён с рядом трудностей [3].

Ограничения, имманентные дискретным керамическим пьезоэлементам, могут быть сняты с использованием пьезоэлектрических композиционных плёнок и покрытий с параэлектрическими матрицами – пьезокрасок. Получению, изучению характеристик и применению пьезокрасок посвящено большое количество работ [4–13]. Во всех приведённых работах пьезоэлектрические краски состоят из порошков пьезокерамики цирконата титаната свинца (ЦТС) и органического связующего материала, в качестве которого используются преимущественно эпоксидные и акриловые полимеры.

Использование органических связующих обуславливает существенные ограничения в применении пьезокрасок. Максимальная температура применения и модуль упругости пьезоэлектрической керамики в общем случае значительно выше таковых у органических связующих материалов, что сужает температурный интервал применения пьезокрасок и уменьшает деформацию, передаваемую от конструкции частицам пьезокерамики.

Неорганические связующие лишены указанных недостатков и, как показано в работе [14], могут быть использованы для получения объёмных пьезоэлектрических композиционных материалов с повышенной объёмной чувствительностью. В связи с этим важно установить возможность использования фосфатных связующих в качестве основы для композиционных пьезочувствительных покрытий – пьезокрасок.

Согласно современным представлениям о природе фосфатных связующих и материалов на их основе, свинец и оксид свинца характеризуются как слишком активные для образования фосфатных вяжущих систем, в то время как металлические и окисленные титан и цирконий для проявления вяжущих свойств при взаимодействии с ортофосфорной кислотой (ОФК) требуют дополнительной активации (термической, механической и т.д.) [15]. Как показывает предыдущая работа, описывавшая получение объёмного композита системы ЦТС-ОФК, при использовании

крупнодисперсного наполнителя данная система обеспечивает получение прочных заготовок, имеющих выраженные пьезоэлектрические свойства [14]. Тем не менее, необходимость использования тонкомолотого наполнителя для изготовления красок может повлечь за собой изменения в характере взаимодействия компонентов смеси. Поэтому вопрос возможности получения краски в системе ЦТС-ОФК является открытым и требует экспериментальной проверки.

В связи с тем, что пригодный для получения красок мелкодисперсный наполнитель характеризуется развитой поверхностью и, следовательно, повышенной химической активностью, представляет интерес рассмотреть влияние предварительной пассивации ОФК. Самый простой способ пассивации – предварительное введение в ОФК активного компонента, частично нейтрализующего кислоту и снижающего, таким образом, скорость взаимодействия связующего с функциональным наполнителем. Предполагаемым эффектом от пассивации ОФК является повышение живучести смеси и, как следствие, замедление процессов структурообразования, гомогенизация продуктов реакции и повышение пьезоэлектрических и диэлектрических характеристик покрытия.

Таким образом, целью настоящей работы является определение возможности использования фосфатных связующих для получения пьезочувствительных покрытий и качественное выявление общих закономерностей формирования характеристик

## МЕТОДЫ

В качестве исходных материалов использованы пьезоэлектрическая керамика марки ЦТС-19 ОСТ 11 0444-87, ОФК ГОСТ 6552-80 квалификации «ч» (концентрации 85 %) и пудра алюминиевая марки ПАП-1 ГОСТ 5494-95.

Пьезоматериал ЦТС-19 был предварительно отпрессован и обожжён до плотности  $7,5 \text{ г/см}^3$ , после чего спеки были раздроблены и подвергнуты помолу в планетарной шаровой мельнице с мелющими телами из диоксида циркония в течение 3 ч в среде изопропилового спирта. Диаграмма гранулометрического состава порошка после помола приведена на рисунке 1.

Измерения проведены на установке Fritsch Analysette 22 Micro Tec Plus.

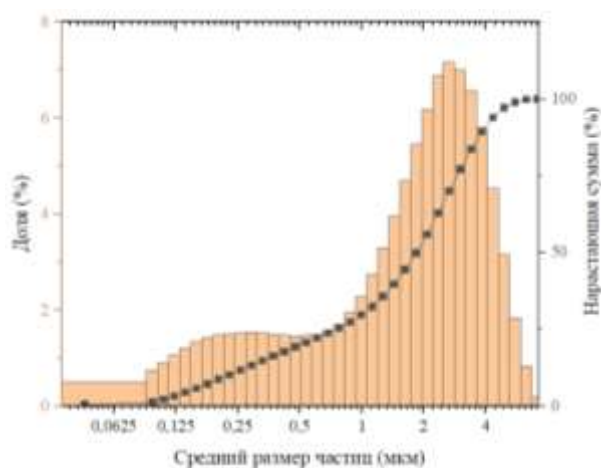


Рисунок 1 – Диаграмма размеров частиц наполнителя

Figure 1 - Diagram of a filler particles size

ОФК использована в чистом виде и пассивирована 5 мас. % алюминиевой пудры.

В качестве проводящей подложки для покрытия использованы диски диаметром 20 мм и толщиной 1 мм, изготовленные из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т. Стальные диски были протравлены в ОФК в течение 5 мин, промыты в дистиллированной воде и дополнительно очищены в изопропиловом спирте.

При изготовлении покрытия в высушенный после помола порошок ЦТС-19 введено и размолото в агатовой ступке 1, 5, 10, 15, 20 % чистой или частично затворённой ОФК. Полученная масса разведена дистиллированной водой до получения пастообразной консистенции. В связи с испарением воды измерение вязкости или количества вносимой воды не производилось.

Паста нанесена на поверхность стальных дисков методом трафаретной печати (шелкографии) через сито с толщиной полотна 40 мкм.

Полученные образцы высушены при комнатной температуре в течение суток, на покрытые поверхности нанесены вручную графитовые электроды площадью от 0,3 до 0,5 см<sup>2</sup>.

Образцы с электродами поляризованы на установке ПВС-5 (производства НКТБ «Пьезоприбор» г. Ростов-на-Дону) при охлаждении от температуры 100 °С под напряжением 1 кВ. У поляризованных образцов измерены значения пьезомодуля  $d_{33}$  на измерительной установке Piezo Meter Systems Piezotest, электрической ёмкости  $C_0$  и тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$  на частоте

1 кГц на установке «Пьезо-П» (производства НКТБ «Пьезоприбор» г. Ростов-на-Дону).

После замера характеристик проведена повторная поляризация при охлаждении от 290 °С – температуры Кюри пьезокерамического материала ЦТС-19. После повторной поляризации образцы подвергнуты естественному старению при комнатной температуре в течение суток, после чего проведено повторное измерение характеристик.

Для образцов, поляризованных от 290 °С, также проведено измерение электрического сопротивления при электрическом напряжении постоянного тока 100 В на тераомметре Е6-13А.

Ввиду невозможности точного задания и контроля толщины нанесённого покрытия, обусловленного ручным нанесением покрытия на установке трафаретной печати, пересчёт электрической ёмкости в диэлектрическую проницаемость не проводился. Также в связи с различиями в площади электродов значения электрической ёмкости не могут быть использованы для сравнения проницаемостей материалов, представленных в виде относительных величин. Тем не менее, значение электрической ёмкости после поляризации при охлаждении от различных температур позволяют выдвинуть предположения о влиянии термообработки на характеристики покрытия.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

В процессе изготовления опытных образцов установлено, что термическая обработка при 290 °С приводит к потемнению и упрочнению покрытия – росту твёрдости и адгезии к поверхности стали. Причём эффект тем значительнее, чем больше содержится жидкого компонента в системе. Для материалов, содержащих 1 и 5 % активной жидкой фазы, эффект практически не наблюдается: как до, так и после термической обработки покрытие легко удаляется графитом, т.е. является непригодным для использования.

Материал с 15 и 20 % активной жидкой фазы характеризуется значительным увеличением прочности, и при этом как до, так и после термической обработки покрытие может быть удалено только с использованием инструмента из закалённой стали, что косвенно свидетельствует о высокой износостойкости полученного покрытия. При этом для покрытий, содержащих 15 и 20 % активной жидкой фазы, пьезоэлектрические свойства не обнаружены.

Покрытие, полученное введением в ЦТС 10 % ОФК, превосходит по твёрдости покрытие, содержащее 1 и 5 % ОФК, и не разрушается при нанесении графитового электрода, но уступает в прочности покрытиям, содержащим 15 и 20 % ОФК, и легко царапается низкоуглеродистой конструкционной сталью, не имеющей термической обработки. При этом только для покрытий, содержащих 10 % активной и пассивированной ОФК, после поляризации наблюдались пьезоэлектрические свойства.

В процессе поляризации установлено, что при подаче напряжения более 1 кВ по-

крытие теряет пьезоэлектрические свойства и становится электропроводным, что свидетельствует о пробое диэлектрического покрытия.

Измеренные значения  $d_{33}$ ,  $C_0$ ,  $\text{tg}\delta$  приведены в таблице 2. Результаты указаны только для успешно поляризованных пьезоэлектрических покрытий.

В результате измерений установлено, что электрическое сопротивление покрытий, поляризованных от температуры 290 °С, составляет не менее  $10^6$  Ом.

Таблица 1 – Усреднённые значения характеристик образцов после циклов поляризации

Table 1 - Mean values of specimen characteristic safter poling cycles

Активная фаза	$d_{33}$ , пКл/Н		$C_0$ , пФ		$\text{tg}\delta$	
	100 °С	290 °С	100 °С	290 °С	100 °С	290 °С
10 % мас. чистой ОФК	15±5	20±3	6200±320	7000±400	0,95±0,1	1,2±0,4
10 % мас. пассивированной ОФК	25±3	52±5	680±50	580±40	0,91±0,3	0,85±0,13

## ОБСУЖДЕНИЕ

Из данных таблицы 2 следует, что полученное покрытие обладает выраженными пьезоэлектрическими характеристиками. Для материала на основе частично замещённой алюминия ОФК значение пьезомодуля  $d_{33}$  доходит до 50 пКл/Н, что в целом согласуется с данными, полученными для пьезоэлектрических красок на основе эпоксидных смол [8]. Тем не менее, значение пьезомодуля несколько ниже такового для материалов на полимерной основе, содержащих 70 мас. % частиц ЦТС (81,4 пКл/Н), хотя в процитированной работе не указано, какая именно марка пьезокерамического порошка была использована в качестве наполнителя.

Как показал эксперимент, даже при использовании мелкодисперсного наполнителя взаимодействие ЦТС и ОФК является достаточно управляемым для получения стабильной массы, позволяющей формировать на поверхности материала пьезоэлектрические покрытия.

При этом для материала, полученного с использованием предварительной пассивированной ОФК, значение пьезомодуля  $d_{33}$  более чем в два раза превосходит таковое для материала на чистой кислоте, что подтверждает выдвинутые предположения о благотворной роли предварительной пассивации ОФК. Данный аспект, а именно качественный и количественный состав пассивирующих агентов, обеспечивающий максимальные пьезоэлектрические характеристики, требует дальнейшего уточнения ввиду широ-

кой номенклатуры как металлических, так и оксидных порошков, которые можно использовать в этой роли.

Рост механической прочности покрытия при увеличении содержания активной жидкой фазы обусловлен формированием большего количества продуктов реакции, образующих механический каркас покрытия. При этом избыток параэлектрических продуктов реакции препятствует контакту пьезокерамического наполнителя с электродом и невозможности снятия электрического заряда, генерируемого поляризованным покрытием, следствием чего является резкое снижение пьезоэлектрических характеристик получаемого покрытия.

В силу обозначенных выше причин измеренные значения  $C_0$  пьезопокрытий не могут быть использованы для расчёта диэлектрической проницаемости материала. Тем не менее, важно, что изменение  $C_0$  при неизменной площади электрода после поляризации при разных температурах прямо противоположно для покрытий на основе чистой и частично пассивированной ОФК: в первом случае наблюдается рост, во втором – снижение значения характеристики. Хотя на данный момент гипотеза, объясняющая наблюдаемое явление, отсутствует, с наибольшей вероятностью оно обусловлено вызванным пассивацией структурным фактором в связи с тем, что доменная структура и пьезоэлектрические характеристики пьезокерамического наполнителя не отличаются в двух образцах.

Полученные в результате измерений значения  $\text{tg}\delta$  до трёх раз превосходят тако-

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЬЕЗОЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ ГИРОСКОПИИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

вые, полученные для объёмного материала того же состава на крупнодисперсном наполнителе [14]. Согласно существующим представлениям о микроскопических механизмах формирования диэлектрических потерь, за рост  $\tan\delta$  ответственны два фактора: проводимость и поляризация. Очевидно, что имеющее значительно меньшую толщину в сравнении с объёмным материалом пьезоэлектрическое покрытие будет характеризоваться значительно меньшим электрическим сопротивлением, что вносит существенный вклад в диэлектрические потери диэлектрика [16]. С другой стороны, измеренное значение сопротивления покрытий ( $10^6$  Ом) свидетельствует о низкой проводимости покрытия, следовательно, основной вклад в диэлектрические потери вносит поляризация в переменном электрическом поле.

Пониженный  $\tan\delta$  покрытия на основе пассивированной ОФК с наибольшей вероятностью связан более плотной структурой покрытия, обусловленной менее активным химическим взаимодействием исходных компонентов. Причина противоположно направленных изменений  $\tan\delta$  при поляризации от различных температур для покрытий на активной и пассивированной ОФК на данный момент не совсем ясна и требует дополнительного исследования.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Главная цель настоящей работы – проверка возможности получения пьезочувствительного покрытия на основе пьезокерамики системы ЦТС и фосфатного связующего – успешно достигнута.

Установлено, что предварительная пассивация ортофосфорной кислоты позволяет повысить пьезочувствительность по заряду  $d_{33}$  покрытия до величины, соответствующей пьезоэлектрическим покрытиям на основе органических матриц ( $52 \pm 5$  пКл/Н), чем подтверждается предположение о необходимости пассивации ОФК при использовании меоклдисперсного наполнителя в системе ЦТС–ОФК.

Определено, что использование менее 10 % активной жидкой фазы от массы наполнителя не позволяет получить прочного покрытия, а более 10 % – сформировать у материала пьезоэлектрические свойства. Первый эффект обусловлен недостаточным количеством продуктов реакции для формирования прочной матрицы композиционного материала, второй – избытком продуктов реакции, электрически изолирующим наполнитель. Из этого следует, что в основе формирования ад-

гезии покрытия и его окончательного структурообразования лежит взаимодействие ЦТС и ортофосфорной кислоты, и конечными характеристиками покрытия возможно управлять, воздействуя не этот процесс.

Экспериментально показано, что одним из методов управления процессами химического взаимодействия между связующим и наполнителем и, следовательно, структурообразования, является термическая обработка. Обжиг позволяет ускорить протекание химических реакций и, таким образом, повысить прочность и пьезочувствительность покрытия.

Таким образом, пассивация ОФК, регулирование содержания активной жидкой фазы и термическая обработка нанесённого покрытия – основные инструменты управления процессами структурообразования и формирования конечных пьезоэлектрических и диэлектрических характеристик покрытий на основе ЦТС и фосфатных связующих. Цель дальнейших работ – оптимизация указанных средств для получения пьезоэлектрических покрытий с заданными характеристиками

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Giurgiutiu, V. Structural Health Monitoring with Piezoelectric Wafer Active Sensors. Academic Press, 2014. – 1025 с.
2. Giurgiutiu, V., Lin, B. In situ fabricated smart material active sensors for structural health monitoring // Smart Materials III. SPIE. – 2004. – Т. 5648. – С. 68–78. doi: 10.1117/12.582146.
3. Bhalla, S. Piezoelectric Materials: Applications in SHM, Energy Harvesting and Biomechanics. Piezoelectric Materials. John Wiley & Sons, 2016. – 293с.
4. Newnham, R.E., Safari, A., Sa-Gong, G., Giniewicz, J. Flexible Composite Piezoelectric Sensors // 1984 IEEE Ultrasonics Symposium, IUS 1984. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 1984. – Т. 11. – С. 501–506. doi: 10.1109/ULTSYM.1984.198348.
5. White, N.M., Turner, J.D. Thick-film sensors: past, present and future // Meas. Sci. Technol. – 1997. – Т. 8. – № 1. – С. 1–20. doi: 10.1088/0957-0233/8/1/002.
6. Egusa, S.N., Iwasawa, N. Piezoelectric paints as one approach to smart structural materials with health-monitoring capabilities // Smart Mater. Struct. – 1998. – Т. 7. – № 4. – С. 438–445. doi: 10.1088/0964-1726/7/4/002.
7. Effect of exposure of piezoelectric paint to water and salt solution / P.N. Raptis, R. Stephenson, J.M. Hale, J.R. White // J. Mater. Sci. – 2004. – Т. 39. – № 19. – С. 6079–6081. doi: 10.1023/B:JMSC.0000041705.16488.85.
8. Li, X., Zhang, Y. Analytical study of piezoelectric paint sensor for acoustic emission-based fracture monitoring // Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct. – 2008. – Т. 31. – № 8. – С. 684–694. doi: 10.1111/j.1460-2695.2008.01249.x.
9. Payo, I., Hale, J.M. Dynamic characterization of piezoelectric paint sensors under biaxial strain // Sens. Actuators Phys. – 2010. – Т. 163. – № 1. – С. 150–158. doi: 10.1016/j.sna.2010.08.005.

10. Yang, C., Fritzen, C.-P. Piezoelectric paint: characterization for further applications // *Smart Mater. Struct.* – 2012. – Т. 21. – № 4. – С. 1–8. doi: 10.1088/0964-1726/21/4/045017.
11. Study on Impact Monitoring Using a Piezoelectric Paint Sensor / K. Choi, D. Kang, S.-B. Park, L.-H. Kang // *J. Korean Soc. Nondestruct. Test.* – 2015. – Т. 35. – № 5. – С. 349–357. doi: 10.7779/JKSNT.2015.35.5.349.
12. Han, D.-H., Kang, L.-H. Piezoelectric properties of paint sensor according to piezoelectric materials // *Funct. Compos. Struct.* – 2020. – Т. 2. – № 2. – С. 1–11. doi: 10.1088/2631-6331/ab90e1.
13. Energy harvesting from piezoelectric paint films under biaxial strain / I. Payo, D. Rodriguez, J. Oliva, D. Valverde // *Smart Mater. Struct.* – 2020. – Т. 29. – № 5. – С. 1–13. doi: 10.1088/1361-665X/ab79b4.
14. Получение и исследование пьезоэлектрического композита в системе «цирконат-титанатсвинцаортофосфорная кислота» / Г.А. Кошкин, Ч.Г. Пак, А.Е. Розен, В.В. Кикот // *Ползуновский Вестник.* – 2022. – № 1. – С. 139–146. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.01.019.
15. Судакас, Л.Г. Фосфатные вяжущие системы. – СПб.: Квинтет, 2008. – 254 с.
16. Рез, И.С., Поплавко, Ю.М. Диэлектрики. Основные свойства и применение в электротехнике. – Москва: Радио и связь, 1989. – 288 с.
6. Egusa, S. & Iwasawa, N. (1998). Piezoelectric paints as one approach to smart structural materials with health-monitoring capabilities. *Smart Materials and Structures*, 7(4), 438-445. doi: 10.1088/0964-1726/7/4/002.
7. Raptis, P.N., Stephenson, R., Hale, J.M. & White, J. R. (2004). Effect of exposure of piezoelectric paint to water and salt solution. *Journal of materials science*, 39(19), 6079-6081. doi: 10.1023/B:JMISC.0000041705.16488.85.
8. Li, X. & Zhang, Y. (2008). Analytical study of piezoelectric paint sensor for acoustic emission-based fracture monitoring. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 31(8), 684-694. doi: 10.1111/j.1460-2695.2008.01249.x.
9. 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.
10. Yang, C. & Fritzen, C.-P. (2012). Piezoelectric paint: Characterization for further applications. *Smart Materials and Structures*, 21(4), 1-8. doi: 10.1117/12.923429.
11. Choi, K., Kang, D., Park, S.-B. & Kang, L.-H. (2015). A Study on Impact Monitoring Using a Piezoelectric Paint Sensor. *Journal of the Korean Society for Non-destructive Testing*, 35(5), 349-357. doi: 10.7779/JKSNT.2015.35.5.349.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. Sudakas, L.G. (2008). *Phosphate binder systems*. Saint-Petersburg: Kvintet. (In Russ.).
16. Rez, I.S. & Poplavko, Yu.M. (1989). *Dielectrics. Main properties and application in electronics*. Moscow: Radio iSv'yaz. (In Russ.).

### Информация об авторах

Г. А. Кошкин – инженер-технолог 1 категории центра пьезопроизводства АО «НИИФИ», аспирант каф. «Сварочное, литейное производство материаловедение» ПГУ.

### REFERENCES

1. Giurgiutiu, V. (2014). *Structural Health Monitoring with Piezoelectric Wafer Active Sensors*. Academic Press.
2. Giurgiutiu, V. & Lin, B. (2004). In situ fabricated smart material active sensors for structural health monitoring. *Smart Materials III*, 5648, 68–78. doi: 10.1117/12.582146.
3. Bhalla, S., Moharana, S., Talakokula, V. & Kaur, N. (2016). *Piezoelectric Materials: Applications in SHM, Energy Harvesting and Biomechanics*. John Wiley & Sons.
4. Newnham, R.E., Safari, A., Sa-Gong, G. & Giniewicz, J. (1984). Flexible Composite Piezoelectric Sensors. *Proceedings - IEEE Ultrasonics Symposium*, 11, 501–506. doi: 10.1109/ULTSYM.1984.198348.
5. White, N.M. & Turner, J.D. (1997). Thick-film sensors: Past, present and future. *Measurement Science and Technology*, 8(1), 1–20. doi: 10.1088/0957-0233/8/1/002.
1. Giurgiutiu, V. (2014). *Structural Health Monitoring with Piezoelectric Wafer Active Sensors*. Academic Press.
2. Giurgiutiu, V. & Lin, B. (2004). In situ fabricated smart material active sensors for structural health monitoring. *Smart Materials III*, 5648, 68–78. doi: 10.1117/12.582146.
3. Bhalla, S., Moharana, S., Talakokula, V. & Kaur, N. (2016). *Piezoelectric Materials: Applications in SHM, Energy Harvesting and Biomechanics*. John Wiley & Sons.
4. Newnham, R.E., Safari, A., Sa-Gong, G. & Giniewicz, J. (1984). Flexible Composite Piezoelectric Sensors. *Proceedings - IEEE Ultrasonics Symposium*, 11, 501–506. doi: 10.1109/ULTSYM.1984.198348.
5. White, N.M. & Turner, J.D. (1997). Thick-film sensors: Past, present and future. *Measurement Science and Technology*, 8(1), 1–20. doi: 10.1088/0957-0233/8/1/002.

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

Статья поступила в редакцию 10.10.2022; одобрена после рецензирования 30.11.2022; принята к публикации 15.12.2022.

The article was received by the editorial board on 10 Oct 2022; approved after editing on 30 Nov 2022; accepted for publication on 15 Dec 2022.

### Information about the authors

G. A. Koshkin - engineering technologist of piezo manufacturing center, NIIFI. post-graduate student of Welding and Foundry Engineering, Materials Science Department of Penza State University.