

EDN: LEXREY

УДК 678.049

2.2.9

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРЕТНЫХ СВОЙСТВ ПОЛИЛАКТИДНЫХ ПЛАСТИНОК С ВОЗДУШНЫМИ ПОЛОСТЯМИ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ 3D-ПЕЧАТИ

М.Ф. Галиханов¹, В.К. Болдышева¹, Ю.М. Хантимерова^{1,2}, Х. Хе³, С. Ма³, С. Чжан³

¹Институт прикладных исследований Академии наук Республики Татарстан, Республика Татарстан, 420111, г. Казань, ул. Лево-Булачная, д. 36а

²Отдел аддитивных технологий ООО «Казанский агрегатный завод», Республика Татарстан, 420127, г. Казань, ул. Дементьева, д. 2в,

³Школа физических наук и инженерии, Университет Тунцзи, Китай, 200092, Шанхай, Сыпин роуд 1239

Аннотация. Полимерные электреты становятся ключевыми материалами для создания сенсоров и пьезоэлектрических устройств в электронике. Технология 3D-печати открывает новые возможности для формирования сложных электретных структур с регулируемой микроструктурой, включая создание образцов с воздушными полостями. Целью настоящей работы является изучение влияния структуры пластинок из полилактида, полученных методом послойного наплавления, с различным количеством воздушных полостей на их электретные (потенциал поверхности) и пьезоэлектрические (пьезокоэффициент d_{33}) свойства. Результаты исследования показали, что пластинки, напечатанные из цветных филаментов, демонстрируют лучшие электретные и пьезоэлектрические характеристики, чем изготовленные из натурального полилактида, вероятно, из-за образования уникальных зарядовых ловушек на границе фаз «полимер – краситель». Воздушные полости в объеме полилактидных пластинок способствуют увеличению стабильности заряда электретов за счет создания дополнительных зарядовых ловушек, что проявляется в повышении поверхностного потенциала на стадии его стабилизации, но только до определенного содержания (50 % в среднем слое пластинок), превышение которого ведет к ухудшению электретных свойств, связанное с недостаточным количеством полимерного материала и возможным нарушением целостности верхнего слоя пластинок. Работа демонстрирует перспективность использования аддитивных технологий для создания функциональных полимерных электретных материалов для устройств электроники.

Ключевые слова: аддитивные технологии, полимерные композиты, полилактид, воздушные полости, электретные свойства, поверхностный потенциал, пьезокоэффициент.

Введение

Полимерные материалы остаются основными материалами для изготовления электретов, применяемых в различных приборах и устройствах электроники. Их использование наблюдается в таких устройствах, как микрофоны, сенсоры, датчики и т.д. [1-2]. Научные исследования последних лет сосредоточены на улучшении стабильности полимерных электретов, на улучшение их физико-химических свойств и расширении их функциональности. С применением дисперсных (в т.ч. нано-) частиц, таких как оксиды металлов, технический углерод, углеродные нанотрубки и др., можно добиться значительного улучшения электретных свойств полимеров [3, 4].

В то же время 3D-печать является быстро развивающейся областью, которая открывает новые возможности для создания сложных конструкций из полимерных материалов

[5, 6]. Однако в контексте получения полимерных электретов присутствует нехватка филаментов с заданной рецептурой. Это связано с трудностями в их производстве и необходимостью оптимизации состава композиции для конкретных целей применения. В случае успешного решения этой проблемы можно ожидать значительного прогресса в области электретных материалов и их применения в высоких технологиях. Не случайно в последние 3-5 лет появляются научные работы по получению электретов из образцов, напечатанных на 3D-принтере, и их практическому применению [7-15].

Так, большое внимание уделяется вопросу получения электретов с высокими и стабильными свойствами, напечатанных из полилактида (ПЛА). Например, в работе [7] представлен метод 3D-печати и коронной зарядки, позволяющий за один шаг создать прототип электрета из ПЛА и поляризовать его. Благодаря усовершенствованию сопла 3D-принтера и использованию игольчатого электрода для подачи высокого напряжения, были сопоставлены и оптимизированы такие параметры, как расстояние между кончиками иглы и образцом и уровень приложенного напряжения. Электреты на основе ПЛА демонстрировали относительно равномерное распределение поверхностного потенциала на достаточно большой площади поверхности образца. Кроме того, стабильность поверхностного потенциала была увеличена более, чем в 10 раз по сравнению с обычными образцами, заряженными коронным разрядом [7]. В работе [8] представлен новый метод, который сочетает в себе преимущества 3D-печати с высокой производительностью многослойных материалов за счет склеивания нескольких полимерных слоев в процессе печати. В работе нить ПЛА непосредственно печаталась на пленке полилактида толщиной 20 мкм для формирования четко очерченных структур. Полученная структура термически соединялась с другой пленкой ПЛА и подвергалась обработке в коронном разряде с получением электрета. Для повышения чувствительности ПЛА-электретов (повышения пьезоэлектрического коэффициента d_{33}) использовался дополнительный эластомерный слой из вспененного термопластичного полиуретана. Увеличение толщины покрытия приводило к значительному (в 2,5 раза) увеличению пьезоэлектрического коэффициента [8].

В работе [9] был представлен пьезоэлектрический датчик, встроенный в текстильную оболочку со съемной электроникой на эластичном ремешке, изготовленный методом аддитивной технологии. Сенсор состоял из слоя мягкого полимера - полилактида, напечатанного на 3D-принтере, что создает бесшовное, механически эластичное соединение. Его долговременная стабильность заряда приводит к тому, что через 15 дней поверхностный потенциал устанавливается на уровне 300 В, а пьезоэлектрический коэффициент достигает 201 пКл/Н при механических нагрузках в 1 Н, что аналогично современным пьезоэлектрикам [9]. В работе [10] представлены исследования механических и электрических свойств вспененного ПЛА, напечатанного на 3D-принтере. Ячеистая микроструктура и степень вспенивания регулировались путем изменения температуры экструзии и скорости потока. Были определены оптимальные параметры печати для получения максимального поверхностного потенциала и стабильности заряда электретных образцов. Были проанализированы морфология ячеек и соответствующие механические свойства, и было установлено, что измеренный пьезоэлектрический коэффициент d_{33} составляет 212 пКл/Н. Эти результаты показывают важность регулирования параметров печати и термической обработки в процессе зарядки для обеспечения максимального сохранения заряда, стабильности и гибкости электрета из полилактида, который может найти применение для сенсорики и сбора энергии [10].

В работе [11] представлен многообещающий подход к изготовлению пьезополимерных преобразователей на основе полипропилена (ПП) в один этап, используя технологию 3D-печати. Были напечатаны двухслойные пленочные структуры с правильными газовыми ячейками (полостями) точно контролируемого размера и формы. Обнаружено, что образцы, напечатанные на 3D-принтере, демонстрируют пьезоэлектрические коэффициенты до

200 пКл/Н, аналогичные показателям других пьезоэлектретов из полипропилена, а их временные и термические характеристики хорошо согласуются с известными характеристиками пьезоэлектретов из полипропилена. Пьезоэлектрический отклик сильно снижается при приложенном давлении выше 20 кПа, поскольку давление в заполненных воздухом полостях сильно влияет на общий модуль упругости пьезоэлектриков [11].

Показано [12], что ячеистая структура из поливинилиденфторидтрифторэтилена (ПВДФТФЭ), изготовленная методом 3D-печати, обладает большим пьезоэлектрическим коэффициентом 1200 ПК/Н, что в 40 раз выше, чем у ее широко известного пленочного аналога. Это указывает на то, что биполярное разделение зарядов в ячеистых пустотах при коронном разряде ведет себя как макроскопические диполи. Увеличение поверхностного потенциала и диэлектрической проницаемости (с 10 до 20 при частоте 1 кГц) также связано с заряженными пустотами. В образце ПВДФТФЭ, напечатанном на 3D-принтере, наблюдается тенденция к постоянному увеличению диэлектрической проницаемости и остаточной поляризации в зависимости от температуры [12].

3D-печать расширяет возможность применения полимерных электретов в традиционных областях их применения и открывает новые возможности их использования [9, 12-15]. Например, была продемонстрирована интеграция электретного датчика, напечатанного на 3D-принтере, в спортивную повязку, при этом устройство надежно распознавало три жеста рук. Полученный недорогой, биосовместимый и очень гибкий датчик предложено использовать в различных областях применения, например, в медицинских и спортивных устройствах [9]. Устройство для сбора механической энергии, изготовленное с использованием этой пьезоэлектрической структуры, обеспечивает быструю реакцию при удельной мощности 4 Вт/м². Кроме того, преимущество гигантского пьезоэлектрического коэффициента этого устройства используется для демонстрации автономного тактильного отображения [12]. В работе [13] представлены вибрационные накопители энергии консольной конструкции с воздушным зазором, использующие в качестве электроактивного элемента пьезоэлектрики, частично полученных с помощью аддитивного производства. Установлено, что при правильном выборе расстояния генерируемая мощность может быть увеличена на один-два порядка. Соответствующее предварительное напряжение приводит к еще одному увеличению мощности в 2-10 раз. Таким образом, может быть достигнута нормализованная выходная мощность более 1000 мкВт, что значительно превышает предыдущие результаты использования консольных накопителей энергии [13]. В работе [14] продемонстрировано применение 3D-печатных пьезоэлектрических датчиков в качестве сенсора. В исследовании продемонстрировали прямую 3D-печать пьезоэлектриков с заданной структурой пор с помощью моделирования процесса наплавления. Были успешно напечатаны два типа прототипов с достижением максимального пьезоэлектрического коэффициента $d_{33} \approx 1000$ пК/Н. Отмечено, что изменяя конструкцию можно настраивать характеристики пьезоэлектриков в широком диапазоне, чего нельзя было достичь с помощью других технологий [14]. В работе [15] описан трибоэлектрический наногенератор, управляемый дыханием, который действует как датчик человеко-машинного интерфейса для выражения речи посредством дыхания человека без голосового управления или ручных операций. Трибоэлектрический наногенератор встроен в маску и изготовлен методом 3D-печати. При ношении маски наногенератор может генерировать чувствительные электрические сигналы, соответствующие потоку воздуха при дыхании, что позволяет распознавать типы дыхания человека с различной интенсивностью, продолжительностью и частотой. На основе способности распознавать дыхание была разработана система команд, основанная на дыхании, путем внедрения азбуки Морзе в качестве протокола связи. По сравнению с обычными языковыми средствами

выражения, эта система может извлекать субъективную информацию о человеке по его дыханию и выводить соответствующий языковой текст, который не зависит от голоса или физических движений. Это исследование вводит в сферу технологий человеко-машинного интерфейса метод синтеза команд, основанный на автономном дыхании, с использованием трибоэлектрического наногенератора, напечатанного на 3D-принтере, и может сделать взаимодействие с человеко-машинными интерфейсами более удобным [15].

Таким образом, исследования, направленные на получение полимерных электретных материалов с помощью аддитивных технологий, являются актуальными. При этом особенно перспективными представляются исследования, направленные на получение и применение электретных полимерных пленок с упорядоченным распределением воздушных полостей в их объеме [16].

Цель настоящей работы – изучить влияние содержания воздушных полостей на электретные и пьезоэлектрические свойства пластинок, полученных методом FDM 3D-печати из различных филаментов полилактида.

Материалы и методы

Для изготовления пластинок из полилактида с помощью послойного наплавления (FDM-печать) использовали филаменты ПЛА RSCrossbridge марок «Молочный полупрозрачный» (ПЛА-б/ц), «Черный» (ПЛА-ч) и «Желтый» (ПЛА-ж), изготовленные по ТУ 20.16.59-003-4659527-2025 Пластиковая нить (филамент) для 3D-печати.

Пластинки печатались на 3D-принтере Flashforge Adventure 5M Pro с соплом диаметром 0.4 мм. В ходе подготовки 3D-модели к печати в программном обеспечении OrcaSlicer1.8.1 применялись встроенные профили оборудования и материалов. Пластинки формировались в следующем порядке: сначала печатали нижний сплошной слой, затем, в перпендикулярном направлении, слой с определёнными характеристиками заполнения полимером - на 100% (сплошной, ПЛА-100), 90 % (ПЛА-90), 75 % (ПЛА-75), 50% (ПЛА-50) и 25% (ПЛА-25), а затем снова печатали верхний сплошной слой в том же направлении, что и первый. Таким образом в объеме всех пластинок (кроме ПЛА-100) формировались протяженные пустоты (воздушные полости).

Структуру пластинок на перпендикулярном поверхности срезе анализировали с помощью цифрового микроскопа Saike Digital SK2009HDMI-T с четырехкратным увеличением.

Пластинки переводили в электретное состояние в постоянном коронном разряде при комнатной температуре в течение 120 секунд при напряжении, подаваемом на коронирующий электрод, 10 кВ. Расстояние между верхним коронирующим электродом и поверхностью образца составляло 5 см.

Потенциал поверхности V_s определяли компенсационным методом в течение некоторого времени хранения τ_{xp} . Для определения пьезокоэффициента d_{33} на приборе Keithley (модель 6514) на обе стороны образцов с помощью токопроводящего клея прикрепляли алюминиевые электроды.

Изготавливали и изучали структуру и свойства не менее трех пластинок каждого вида. Ошибка эксперимента составляла не более 5%.

Результаты исследования

Структура пластинок, напечатанных из филамента «Черный» приведена и описана в работе [16]. Другие исследуемые пластинки имеют схожую структуру (рис. 1)

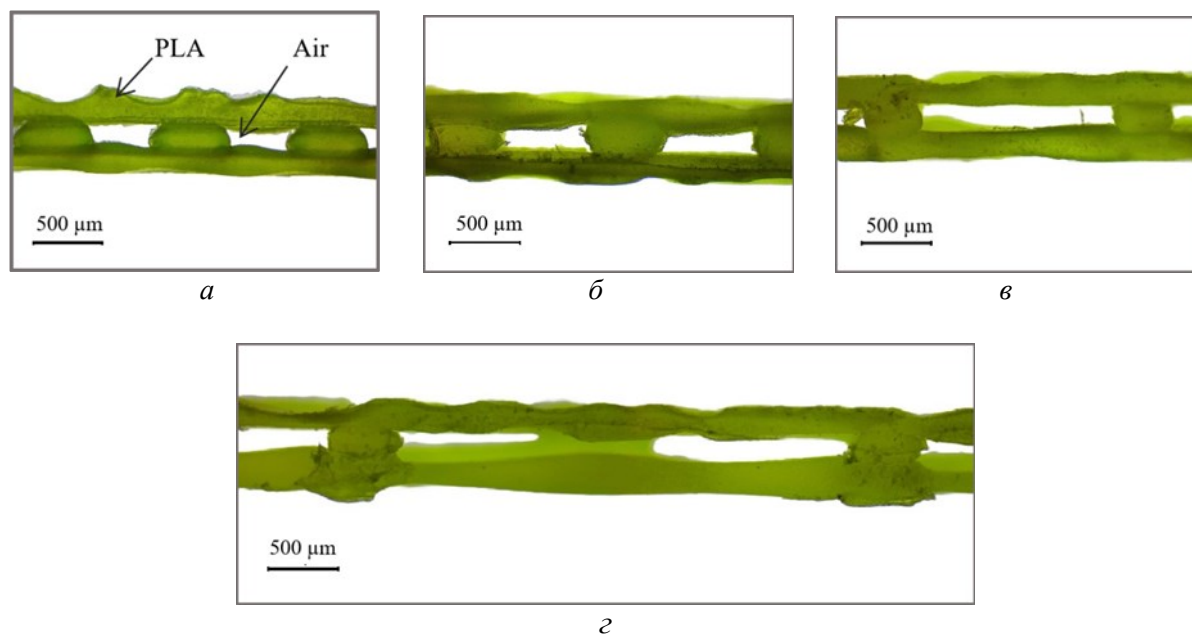


Рис. 1. Изображения среза пластинок ПЛА-ж-90 (а), ПЛА-ж-75 (б), ПЛА-ж-50 (в) и ПЛА-ж-25 (г)

На срезе пластинок можно увидеть следующую картину. Пластинки имеют толщину 615-655 мкм, их поверхности неровные, волнистые. Разнотолщинность или шероховатость (разница между выступами и впадинами поверхности) может достигать 45-95 мкм, что обусловлено методом их получения: при FDM-печати полимерный материал (в данном случае полилактид) в расплавленном состоянии подаётся через сопло диаметром 0,4 мм, образуя «жидкий цилиндр», форма сечения которого трансформируется при контакте с подложкой или предшествующим слоем полимера. Даже при 100 % заполнении слоя полимером, поверхность пластинки не может быть идеально гладкой вследствие принципиальной дискретности послойного наращивания: основным источником шероховатости выступает «ступенчатость» (layer lines), обусловленная конечной толщиной слоёв, а дополнительную волнистость в пределах одного слоя вызывает неравномерная микротопография стыков нитей.

При изменении плотности заполнения среднего слоя от 90% (рис. 1а), 75% (рис. 1б), 50 % (рис. 1в) до 25 % (рис. 1г) повышается шероховатость поверхности образцов (45, 50, 65 и 95 мкм соответственно). Причина этого заключается в следующем. Объем воздушных полостей, сверху и снизу сформированных внешними слоями пластинок, а сбоку – нитями полимера, увеличивается. Чем меньше полимера в среднем слое, тем больше количество и размер этих полостей. Если размер полости очень велик, то происходит провисание верхнего слоя над воздушными полостями, что наглядно видно на рисунке 1г.

Исследования показали, что при обработке исследуемых пластинок в постоянном коронном разряде, они переходят в электретное состояние, о чем свидетельствуют значения начального поверхностного потенциала в диапазоне от 1200 до 1600 В. С течением времени значения V_0 ожидаемо снижались. Для сравнения характера спада потенциала поверхности пластинок из различных филаментов и с различным содержанием воздушных полостей с течением времени применяли значения относительного (к начальному значению) потенциала поверхности V_0/V_{00} . На рисунке 1 приведены данные для сплошных пластинок полилактида (ПЛА-100), напечатанных из различных филаментов.

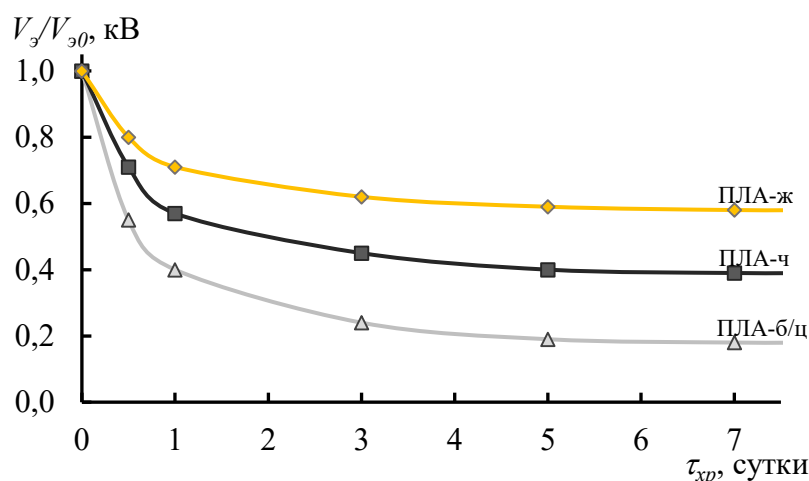


Рис. 2. Спад поверхности электретных пластинок без воздушных полостей, полученных методом аддитивной печати из филаментов «Молочный полупрозрачный», «Черный» и «Желтый», с течением времени

Скорость спада потенциала поверхности образцов по времени высока в первые 1-3 сутки хранения электретов и стабилизируется к 5-8 суткам, выходя на некоторое постоянное значение (рис. 2). Это характерно для короноэлектретов на основе полимеров и объясняется высвобождением носителей заряда, инжектированных в объем диэлектрика во время действия постоянного коронного разряда, из энергетически мелких (с большой скоростью) и глубоких (с малой скоростью, определяющей стабильность заряда электрета) ловушек. В качестве ловушек выступают различные структурные элементы полимеров (дипольные группы, граница раздела между аморфной и кристаллической фазой, свободный объем), в т.ч. и дефекты структуры (примеси, аномалии химической структуры и т.п.) [17]. Высвобождаясь из ловушек, носители заряда оказываются на поверхности образцов и «стекают» с нее по аналогии со статическим электричеством. Абсолютные значения потенциала поверхности всех исследуемых электретных образцов в начальный момент времени и в период стабилизации заряда (на 7-е сутки хранения) приведены в таблице 1.

Табл. 1. Потенциалы поверхности и пьезокоэффициенты пластинок, напечатанных на 3D-принтере из различных филаментов и с различным содержанием воздушных полостей, через 1 час после поляризации (в числителе) и на 8-е сутки хранения (в знаменателе)

Образец	$V_{\text{э}}$, кВ			d_{33} , пКл/Н		
	ПЛА-б/ц	ПЛА-ч	ПЛА-ж	ПЛА-б/ц	ПЛА-ч	ПЛА-ж
ПЛА-100	-1550/-190	-1330/-570	-1350/-500	19/0	30/4	31/24
ПЛА-90	-1290/-210	-1270/-605	-1215/-925	50/11	53/23	125/35
ПЛА-75	-1320/-440	-1290/-490	-1275/-810	43/23	35/25	24/15
ПЛА-50	-1245/-215	-1280/-485	-1265/-705	35/29	64/34	70/50
ПЛА-25	-1150/-80	-1010/-140	-1280/-640	5/2	22/12	41/35

Лучшие значения потенциала поверхности цветных полилактидных пластинок также объяснимы. Цвет придается полимерам с помощью красителей той или иной природы (органических и неорганических). Введение подобного рода химических добавок в полимер приводит к возникновению новых структурных элементов, способных выступать в качестве ловушек инжектированных зарядов, как правило, с большей энергетической глубиной

(энергией захвата) – это и сама граница раздела фаз «полимер – краситель», и дефекты полимерных цепей, возникающее на ней [3]. Производители филаментов, как правило, не раскрывают их состава. Можно предположить, что черный цвет полилактиду придается с помощью технического углерода (сажи), который является электропроводящим наполнителем. Значения электретных характеристик полимеров напрямую зависят от их удельного объемного электрического сопротивления [17], то есть пониженные значения потенциала поверхности черных пластинок по сравнению с желтыми (табл. 1) вполне объяснимы.

Влияние количества и размера воздушных полостей на электретные свойства полилактидных пластинок выражается следующим образом. Увеличение доли воздуха приводит к повышению значений потенциала поверхности на период стабилизации заряда пластинок (7-8-е сутки хранения). Объяснение видится в том, что поверхность воздушных полостей выступает в качестве источника ловушек носителей зарядов [3, 4]. При этом, если носители заряда высвобождаются из них, то они оказываются в замкнутом пространстве воздушных пустот (при условии, что эти пустоты «закрытые») и не могут стечь с поверхности, продолжая играть роль захваченных носителей заряда. Однако, если количество полимера в среднем слое 50 % и меньше, то значения V_s уменьшаются (для ПЛА-б/ц и ПЛА-ч становятся даже ниже, чем у сплошных пластинок). Это связано, во-первых, с меньшим количеством электретируемого полимера, и, во-вторых, вполне вероятно, что верхний полилактидный слой из-за провисания может терять свою целостность, что позволяет высвобожденным с поверхности воздушных пустот носителям заряда покидать объем пластинок.

Если брать электронику, то основная часть сенсорных устройств, включающих электретные элементы, работает именно на пьезоэлектриках (пьезоэлектричество – это частный случай электретного эффекта). Поэтому на дальнейшем этапе работы на разные стороны пластинок наклеивали электроды и измеряли их пьезокоэффициент. Анализируя полученные данные (табл. 1) можно увидеть закономерности, зафиксированные при оценке потенциала поверхности – более высокими коэффициентами обладают пластинки из филамента «Желтый» со степенью заполнения среднего слоя полимером 50 %.

Остается вероятность того, что пьезоэлектрический эффект проявляется не за счет воздушных полостей в объеме пластинок, а в пустотах на границе раздела «пластинка – токопроводящий клей». Для исключения (или подтверждения) этой возможности необходимы дальнейшие исследования, для которых на образцы следует напылять покрытия, играющие роль электродов.

Заключение

Таким образом, пластинки, напечатанные из цветных филаментов, демонстрируют лучшие электретные и пьезоэлектрические характеристики, чем изготовленные из натурального полилактида, вероятно, из-за образования уникальных зарядовых ловушек на границе фаз «полимер – краситель». Воздушные полости в объеме полилактидных пластинок способствуют увеличению стабильности заряда электретов за счет создания дополнительных зарядовых ловушек, что проявляется в повышении поверхностного потенциала на стадии его стабилизации, но только до определенного содержания (50 % в среднем слое пластинок), превышение которого ведет к ухудшению электретных свойств, связанное с недостаточным количеством полимерного электретируемого материала и возможным нарушением целостности верхнего слоя пластинок.

Проведенный комплекс исследований подтверждает значимость контроля микроструктуры и состава филаментов при создании полимерных электретов с заданными свойствами для применения в сенсорной и энергетической электронике.

Благодарность

Работа выполнена за счет предоставленного в 2025 году Фондом науки и технологий Республики Татарстан гранта на осуществление фундаментальных и поисковых исследований в научных и образовательных организациях, предприятиях и организациях реального сектора экономики Республики Татарстан (соглашение № 27 от 01.12.2025 г.).

Список литературы

1. Saxena P. A Review of Polymer Electrets and Their Applications / P. Saxena, P. Shukla // *Materials Performance and Characterization*. – 2020. – V. 9, №. 1. – P. 701-710.
2. Peng F. Гибкие технологии сенсоров и их применение во взаимодействии человека и машины / F. Peng // *Электроника, фотоника и киберфизические системы*. – 2025. – 5 (3). – С. 105-107.
3. Galikhanov M. Corona electrets based on filler-loaded polymers: structure, properties, and applications / M. Galokhanov // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. – 2022. – V. 29, №. 3. – P. 788-793.
4. Li X. Polymer electrets and their applications / Li X. et al. // *Journal of applied polymer science*. – 2021. – V. 138. – №. 19. – P. 50406.
5. Беседина К. С. Применение аддитивных технологий при получении изделий из полимерных материалов (обзор) / К.С. Беседина, Н.А. Лавров, В.В. Барсков // *Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета)*. – 2018. – №. 44 (70). – С. 56-63.
6. Коваленко Р. В. Современные полимерные материалы и технологии 3D печати / Р.В. Коваленко // *Вестник Казанского технологического университета*. – 2015. – Т. 18. – №. 1. – С. 263-266.
7. Wang Z. Synchronized 3D Printing and Corona Charging for One-Step Prototyping of Polarized Polylactic Acid Electrets / Z. Wang et al. // *Polymers*. – 2023. – V. 15. – №. 11. – P. 2520.
8. Sellami Y. Piezoelectret sensors from direct 3D-printing onto bulk films / Y. Sellami et al. // *IEEE SENSORS, 2023*. – IEEE, 2023. – P. 1-4.
9. Altmann A. A. Single-Step 3D Printing of Flexible Ferroelectret Sensors with Large Air Cavities / A. A. Altmann et al. // *IEEE SENSORS, 2024* – IEEE, 2024. – P. 1-4.
10. Perna G. 3D-Printed piezoelectret based on foamed polylactic acid for energy-harvesting and sensing applications / G. Perna et al. // *Nanomaterials*. – 2023. – V. 13. – №. 22. – P. 2953.
11. Assagra Y. A. O. A new route to piezo-polymer transducers: 3D printing of polypropylene ferroelectrets / Y. A. O. Assagra et al. // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. – 2020. – V. 27. – №. 5. – P. 1668-1674.
12. Kumar A. 3D printed ferroelectret with giant piezoelectric coefficient / A. Kumar, D. Saini, D. Mandal // *Applied Physics Letters*. – 2022. – V. 120. – №. 18.
13. Ben Dali O. Ferroelectret energy harvesting with 3D-printed air-spaced cantilever design / O. Ben Dali et al. // *Nano Select*. – 2022. – V. 3. – №. 3. – P. 713-722.
14. Wang X. Direct 3D printing of piezoelectrets: process feasibility, prototypes fabrication and device performance / X. Wang et al. // *Engineered Science*. – 2022. – V. 21. – №. 3. – P. 800.
15. Saini D. 3D printed electret as self-powered wearable sensor and futuristic implementation for on-spot bone injury / D. Saini, D. Mandal // *Sustainable Materials and Technologies*. – 2024. – V. 40. – e00974.
16. Болдышева В.К. Получение тонких газонаполненных пленок с помощью аддитивных технологий / В.К. Болдышева, Ю.М. Хантимерова, М.Ф. Галиханов // *Электроника, фотоника и киберфизические системы*. – 2025. – Т. 5. – №. 3. – С. 47-50.

17. Sessler G., Gerhard-Multhaupt R. (eds.) Electrets: 3rd Ed. in two volumes, Laplacian Press, Morgan Hill, California, USA, 1998/1999. 472/360 p.

INVESTIGATION OF ELECTRET PROPERTIES OF POLYLACTIDE PLATES WITH AIR CAVITIES OBTAINED BY 3D PRINTING

*M.F. Galikhanov¹, V.K. Boldysheva¹, Yu.M. Khantimerova^{1,2},
H. He³, X. Ma³, X. Zhang³*

¹Institute of Applied Research of the Tatarstan Academy of Sciences,
Republic of Tatarstan, Kazan, Levo-Bulachnaya St., 36a, 420111, Russian Federation

²Additive Technologies Department, LLC "Kazan Aggregate Plant",
Republic of Tatarstan, Kazan, Dementyeva St., 2v, 420127, Russian Federation

³School of Physics Science and Engineering, Tongji University,
1239 Siping Road, Shanghai, P.R. China, 200092

Absrtact. Polymer electrettes are becoming key materials for creating sensors and piezoelectric devices in electronics. 3D printing technology opens up new possibilities for the formation of complex electret structures with an adjustable microstructure, including the creation of samples with air cavities. The purpose of this work is to study the effect of the structure of polylactide plates obtained by layer-by-layer deposition with a different number of air cavities on their electret (surface potential) and piezoelectric (piezoelectric effect d33) properties. The results of the study showed that plates printed from colored filaments exhibit better electret and piezoelectric characteristics than those made from natural polylactide, probably due to the formation of unique charge traps at the polymer–dye phase boundary. The air cavities in the volume of polylactide plates contribute to an increase in the stability of the electret charge by creating additional charge traps, which manifests itself in an increase in the surface potential at the stage of its stabilization, but only to a certain content (50% in the middle layer of the plates), exceeding which leads to a deterioration in electret properties associated with insufficient the amount of polymer material and the possible violation of the integrity of the upper layer of the plates. The work demonstrates the prospects of using additive technologies to create functional polymer electret materials for electronic devices.

Keywords: additive technologies, polymer composites, polylactide, air cavities, electret properties, surface potential, piezoelectric effect

Статья представлена в редакцию 5 декабря 2025 г.