EDN: XRZNAO
УДК 678.049 *2.2.6*

ПОЛУЧЕНИЕ ТОНКИХ ГАЗОНАПОЛНЕННЫХ ПЛЁНОК С ПОМОЩЬЮ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В.К. Болдышева [1], Ю.М. Хантимерова [1,2], М.Ф.Галиханов [1,3]

[1]Институт прикладных исследований Академии наук Республики Татарстан, Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. Лево-Булачная, 36а

[2]Отдел аддитивных технологий ООО «Казанский агрегатный завод», Российская Федерация, 420127, г. Казань, ул. Дементьева, д. 2в

[3]Российская инженерная академия, Российская Федерация, 125009, г. Москва, Газетный переулок, д. 9, стр. 4

Аннотация. В статье представлены результаты получения тонких газонаполненных плёнок с использованием аддитивных технологий. Изучено влияние степени заполнения полимером на поверхностный потенциал и зарядовую плотность. Показано, что увеличение площади границы фаз “полимер–воздух” улучшает электрические свойства плёнок, однако при высокой разреженности снижается их целостность.

Ключевые слова: тонкие плёнки, газонаполненные, аддитивные технологии, полимерные композиты, электретные свойства, зарядовые ловушки, поверхностный потенциал

Введение

Полимерные пьезоэлектрики привлекают значительное внимание благодаря своим уникальным свойствам, таким как гибкость, легкость и способность генерировать электрический заряд при механическом воздействии [1, 2]. В последние годы особое развитие получили газонаполненные пленки, которые обладают улучшенными электрофизическими характеристиками и широким спектром потенциальных применений. В структуре вспененных полимеров газовые ячейки располагаются беспорядочно, однако, с использованием современных технологий, таких как аддитивное производство, возможно создание композитов с упорядоченным распределением воздушных пузырьков (полостей) в объеме плёнки.

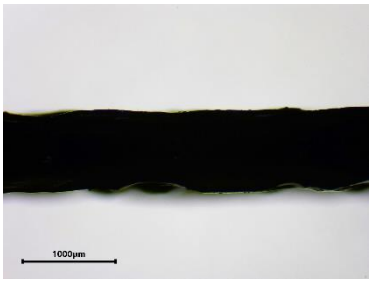
Материалы и методы

В данной работе применен процесс изготовления тонких газонаполненных плёнок из полилактида (ПЛА) с помощью аддитивных технологий. При этом пленки отпечатывали следующим образом: сначала формировался нижний сплошной слой, затем слой с определёнными характеристиками заполнения - на 100% (сплошной), 90 %, 75 %, 50% и 25%, а затем верхний сплошной (ПЛА-100, ПЛА-90, ПЛА-75, ПЛА-50 и ПЛА-25 соответственно). Плёнки были напечатаны на 3Д-принтере послойного наплавления (FDM-печать) Flashforge Adventure 5M Pro с соплом диаметром 0.4 мм. В ходе подготовки 3D-модели к печати в слайсере orcaslicer1.8.1 применялись встроенные профили оборудования и материалов. Структура пленок анализировалась с помощью цифрового микроскопа Saike Digital SK2009HDMI-T на четырехкратном увеличении. Пленки электретировались в

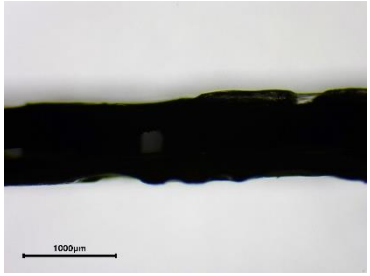
постоянном коронном разряде, электретные характеристики определялись с помощью прибора ИПЭП-1.

Результаты исследования

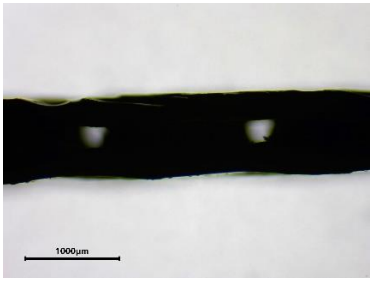
На рисунке 1 показаны фотографии полилактидных пленок в разрезе с плотностью заполнения среднего слоя полимером 100 % (сплошная пленка), 90%, 75%, 50% и 25%.



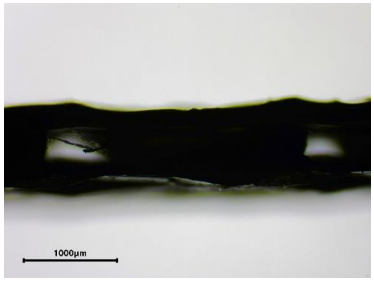
а



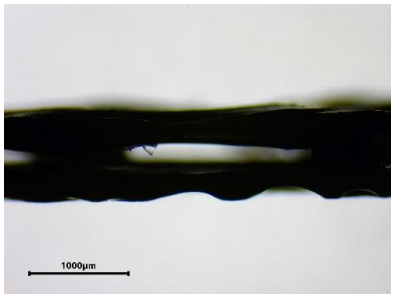
б



в



г



д

Рис. 1. Изображение газонаполненных пленок с плотностью заполнения среднего слоя 100% (а), 90% (б), 75% (в), 50% (г) и 25 %

На срезе пленки с плотностью заполнения среднего слоя полимером 100% (рис. 1 *а*) практически невозможно увидеть какие-либо пустоты. На рис. 1 *д* видно, что объем воздушных полостей пустот в пленке с плотностью заполнения среднего слоя полимером 25% больше по сравнению с другими плёнками с плотностью заполнения 50%, 75%, 90%.

Электретные свойства пленок с различным количеством воздушных полостей отличаются (табл. 1).

Табл. 1. Электретные свойства полилактидных пленок с различным заполнением среднего слоя полимером

Образец	Потенциал поверхности, кВ		Эффективная поверхностная плотность зарядов, мкКл/м^2		Напряженность электрического поля, кВ/м	
	начальные значения	значения на 30-е сутки хранения	начальные значения	значения на 30-е сутки хранения	начальные значения	значения на 30-е сутки хранения
ПЛА-100	0, 35	0,15	0,15	0,07	17,0	10,5
ПЛА-90	0,45	0,30	0,20	0,15	19,0	15,5
ПЛА-75	0,40	0,25	0,22	0,13	21,0	15,0
ПЛА-50	0,35	0,10	0,17	0,05	20,0	7,5
ПЛА-25	0,30	0,05	0,13	0,03	19,0	2,5

При уменьшении степени заполнения среднего слоя полимером увеличивается протяженность площади границы раздела фаз «полимер – воздух», которая может выступать в качестве источников глубоких ловушек носителей зарядов [3, 4], поэтому элетретные свойства пленок увеличиваются. Однако, при слишком большой «разряженности» среднего слоя, верхний полилактидный слой, по-видимому, теряет свою целостность, то облегчает высвобождение носителей заряда из объема пленок (табл. 1).

Заключение

Таким образом, структурой и, следовательно, электретными характеристиками пленок, получаемых на 3D-принтере можно управлять и тем самым создавать электреты (впоследствии — и пьезоэлектрики) с заранее заданными характеристиками. Из изученных пленок наилучшими электретными свойствами обладает пленка с 50 %-ным заполнением среднего слоя полимером.

Список литературы

1. Лущейкин Г.А. Новые полимерсодержащие пьезоэлектрические материалы // Физика твердого тела, 2006. Т. 48, Вып. 6. С. 963-964.
2. Neugschwandtner G.S. Piezo- and pyroelectricity of a polymer-foam space-charge electret / G.S.Neugschwandtner et al //J. Appl. Phys. 89, 4503–4511 (2001).
3. Гильманов И.Р. Взаимосвязь электретных свойств пенополиэтилена и коэффициента их вспенивания / И.Р. Гильманов, М.Ф. Галиханов, А.Р. Гильманова, М.А. Дымова // Вестник технологического университета. - 2018. - Т. 21, № 9. - С. 42-45.
4. Дымова М.А. О связи электретных свойств вспененных полимеров с их структурными параметрами / М.А. Дымова, М.Ф. Галиханов, Р.Я. Дебердеев // Вестник технол. ун-та.- 2016. - Т. 19, № 1. - С. 88-91

FABRICATION OF THIN GAS-FILLED FILMS USING ADDITIVE MANUFACTURING

V.K. Boldysheva [1], Yu.M. Khantimerova [1,2], M.F. Galikhanov [1,3]

[1]Institute of Applied Research of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan
36a, Levobulachnaya St., Kazan, 420111, Russian Federation

[2]Additive Technologies Department, LLC "Kazan Aggregate Plant"
2v, Dementyeva St., Kazan, 420127, Russian Federation

[3]Russian Engineering Academy
bldg. 4, 9, Gazetny Pereulok, Moscow, 125009, Russian Federation

Absrtact. The paper presents the fabrication of thin gas-filled films using additive manufacturing. The effect of polymer filling ratio on surface potential and charge density was studied. Increased polymer–air interface area enhances electret properties; however, excessive porosity reduces film integrity, affecting charge retention and electrical performance.

Keywords: thin films, gas-filled, additive manufacturing, polymer composites, electret properties, charge traps, surface potential.

Материалы представлены на Международной научно-практической конференции «Современные подходы и практические инициативы в инженерных науках» (г. Казань, 2-3 октября 2025 года).

Статья представлена в редакцию 15 августа 2025 г.