

**МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛИМЕРОВ НА ОСНОВЕ ЗОНДОВОГО  
КАРТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА**

<sup>1</sup>Пантелеев К.В., <sup>2</sup>Кравцевич А.В., <sup>2</sup>Ровба И.А., <sup>1</sup>Свистун А.И.,  
<sup>1</sup>Тявловский К.Л., <sup>1</sup>Самарина А.В., <sup>1</sup>Жарин А.Л.

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь,

<sup>2</sup>Гродненский филиал «НИЦ проблем ресурсосбережения» ГНУ «Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси», г. Гродно, Беларусь, E-mail: nilpt@tut.by

**Введение**

Полимеры и композиты в процессе производства, технологической обработки и эксплуатации способны приобретать и хранить длительное время электростатический потенциал (заряд). Наличие в объеме и на поверхности собственного и/или приобретенного в результате внешних воздействий электростатического заряда и, следовательно, электрического поля, оказывают существенное влияние на свойства полимера, а также на кинетику физико-химических процессов. В настоящее время широкое распространение получают различные модификации сканирующего зонда Кельвина, позволяющие получить карты пространственного распределения электростатического потенциала материалов с микрометровым разрешением [1].

В работе приводятся результаты экспериментальных исследований композитов на основе термопластов по пространственному распределению поверхностного электростатического потенциала. Результаты получены с помощью сканирующего зонда Кельвина, разработанного в НИЛ ПТ БНТУ (г. Минск) [2, 3]. Показано, что анализ карт пространственного распределения электростатического потенциала позволяет характеризовать не только неоднородность электрофизических свойств полимерных образцов, но и выявлять скрытые дефекты в объеме полимерного образца.

**Материалы и методы исследований**

В качестве опытных образцов использованы многослойные материалы-конструкции на основе термопластов. Образцы изготовлены в ГНУ НИЦПР НАН Беларуси (г. Гродно). Характеристика образцов и их условные обозначения приведены в таблице 1.

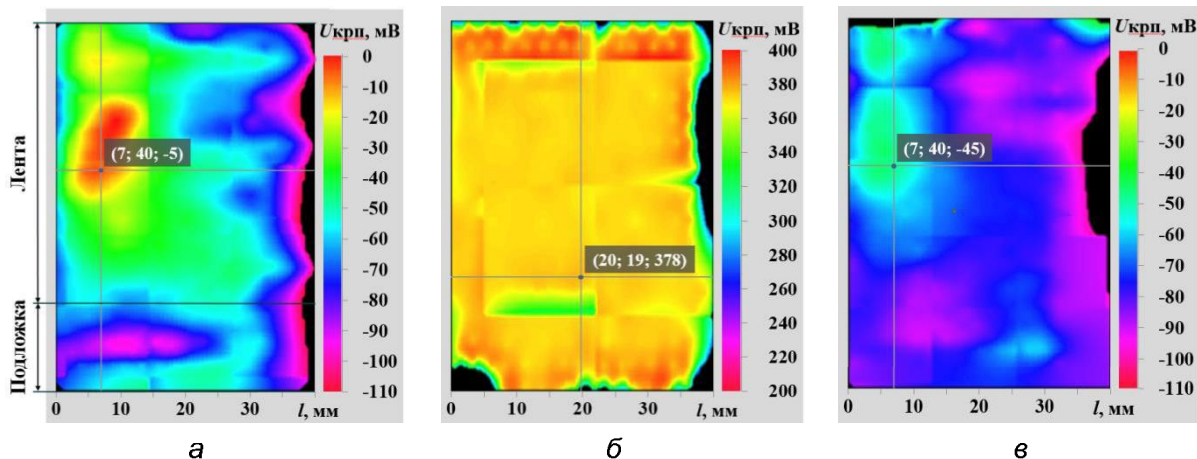
Таблица 1 – Условные обозначения и характеристика опытных образцов

№ пп.	Характеристика образцов материалов-конструкций	Условное обозначение
1	Вторичный ПЭВД (ТУ РБ 500055085.016-2015) и лента сигнальная ЛС (ТУ РБ 101333870.003-2010, ООО «ИНТЕРБЕЛТРЕЙД»)	a1
2	Вторичный ПЭВД и лента сигнальная серии ЛС (НИЦПР НАНБ.)	a2
3	Вторичный ПЭВД и армирующая стеклосетка ССШ-160 (ТУ РБ 05780349.017-97, ОАО «Полоцк-Стекловолокно»)	b1
4	ПЭВД и армирующая стеклосетка ССШ-160 (ТУ РБ 05780349.017-97, ОАО «Полоцк-Стекловолокно»)	c1

В процессе производства, транспортирования и хранения образцов возможна статическая электризация. Поэтому перед измерением требуется стабилизация электрофизических свойств образцов, т.е. дополнительная подготовка, обеспечивающая удаление статического заряда, приобретенного в процессе неконтролируемой электризации. Подготовку образцов к измерению выполняли в соответствии с методикой МИ. ЦМОП 424115.013.023-2016 «Программа и методика измерения пространственного распределения собственного и/или приобретенного в результате внешних воздействий электростатического потенциала полимеров». Методика базируется на стандартизованном методе определения поверхностных потенциалов по ГОСТ 25209-82 и позволяет получать сопоставимую информацию.

На рисунке 1 представлены визуализированные карты пространственного распределения электростатического потенциала для образца a2. Одной из задач

исследования являлось определение закономерностей формирования электропотенциального рельефа образцов до и после отслаивания ленты от материала основания. При этом на рисунке 1,а и в приведены результаты измерений после нормализации и кондиционирования образца (в соответствии с МИ. ЦМОП 424115.013.023-2016). На рисунке 1,б кондиционирование и нормализация не проводились.



а – до отслаивания ленты, после нормализации образца; б – после отслаивания ленты, без нормализации подложки; в – после отслаивания ленты и нормализации подложки  
Рисунок 1 – Карты пространственного распределения электростатического потенциала образца-конструкции а2 (подложка из вторичного ПЭВД и лента сигнальная серии ЛС)

После отслаивания ленты (рис.1,б) наблюдается практически равномерное распределение электропотенциала на уровне 370–390 мВ. После последующего кондиционирования и нормализации (рис.1,в), неоднородность пространственного распределения электростатического потенциала подложки повторяет неоднородности образца-конструкции (рис.1,а). Из визуализированных изображений можно сделать вывод, что выявленные экстремумы, характеризуют скрытые дефекты в материале подложки. При этом вклад в суммарный электропотенциал образца-конструкции от ленты относительно стабилен и связан с перераспределением электронов второго электрического слоя на границе раздела.

Обработка результатов измерений включает построение гистограмм распределения относительных значений электростатического потенциала образца до и после отслаивания ленты, определение математического ожидания значений электростатического потенциала и полуширины гистограммы распределения. Гистограммы распределения электростатического потенциала для образца а2 представлены на рисунке 2. Ширина столбца гистограммы принята равной 2 мВ, что соответствует погрешности измерительной установки. Из результатов построения гистограмм следует, что распределение относительных значений электростатического потенциала поверхности образца имеет трехмодальный характер, причем первый максимум ( $n_1$ ) относится к подложке образца-конструкции, второй ( $n_2$ ) – к материалу ленты, а третий ( $n_3$ ) – к области с дефектами (рис.2,а,б).

Закон распределения в каждой из трех областей близок к нормальному. Третья область (с центром распределения -25 мВ (рис.2,а) и -55 мВ (рис.2,б)), наиболее вероятно, указывает на наличие дефекта в объеме образца-конструкции.

Количественные результаты определения статистических характеристик распределения значений электропотенциала серии экспериментальных образцов (табл.1) сведены в таблицу 2.

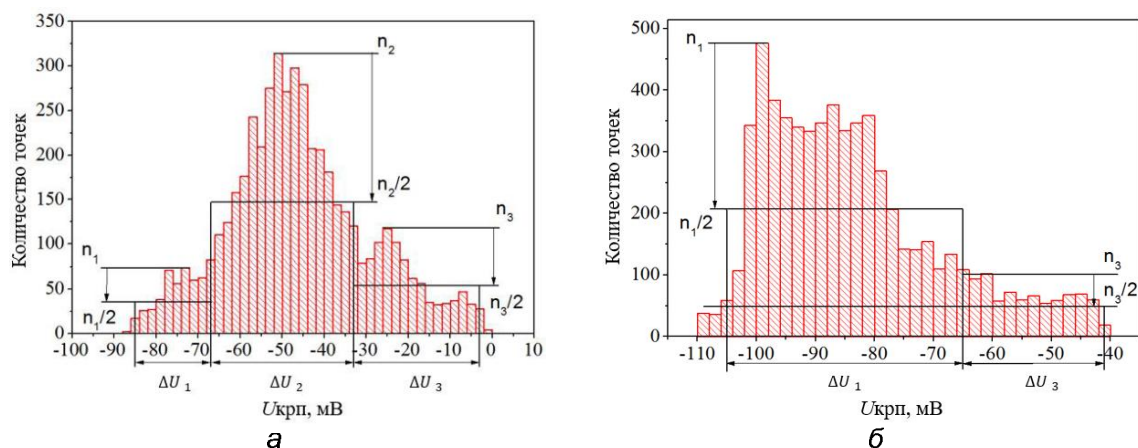


Рисунок 2 – Гистограммы пространственного распределения электростатического потенциала образца-конструкции а2

Таблица 2 – Статистические параметры распределения значений электростатического потенциала поверхности

Область	Образец							
	a1	a2	b1	b2	a1	a2	b1	b2
	Математическое ожидание значений электростатического потенциала $U$ , мВ				Полуширина гистограммы распределения $\Delta U$ , мВ			
Образец-конструкция	-36	-52	-24	60	42	50	56	80
Материал подложки	-72	-76	-68	-8	20	98	48	75
Дефект	25	-34	30	30	30	50	54	20

Результаты аналогичных экспериментальных исследований показали, что для объектов такого рода визуализированные изображения электростатического потенциала позволяют выявить области скопления дефектов с характерными размерами последних вплоть до единиц нанометров. Количественная характеристика однородности электрофизических свойств многослойных материалов-конструкций может быть получена на основе построения и обработки гистограмм распределения электростатического потенциала исследуемого образца.

#### Список литературы:

1. Ebrahimi, G. Investigation on corrosion protection mechanism of polyaniline nanoparticles doped with phosphoric acid by scanning Kelvin probe and other electrochemical methods / G. Ebrahimi, F. Rezaei, J. Neshati // Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers.–2016.– P.1–10; <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtice.2016.11.007>.
2. Пантелеев, К. В. Построение измерителей контактной разности потенциалов / К.В.Пантелеев, В. А. Микитевич, А.Л. Жарин //Приборы и методы измерений. – 2016. – Т. 7, № 1. – С. 7–15.
3. Пантелеев, К. В. Цифровой измеритель контактной разности потенциалов / К. В. Пантелеев, А. И. Свистун, А. К. Тявловский, А. Л. Жарин // Приборы и методы измерений. – 2016. – Т. 7, № 2. – С. 136–144.