

ботки на изменение емкости накладного измерительного конденсатора, расположенного на поверхности древесины обработанной огнезащитной композицией, а, следовательно, и на изменение ее диэлектрической проницаемости уменьшается. На частоте 200 кГц емкость изменяется в интервале от 54 % до 68%, на частоте 500 кГц – от 37 % до 45 %, на частоте 1000 кГц – на 37 %.

Обнаружено влияние продолжительности сушки после нанесения слоев огнезащитного состава на изменение диэлектрической проницаемости обработанной древесины. При продолжительной сушке (интервал между нанесением слоев огнезащиты 24 часа) изменения диэлектрической проницаемости при малом расходе огнезащиты меньше, а при большом ее расходе больше по сравнению с интервалом продолжительностью 60 минут.

#### Литература

1. Корольченко, А.Я., Петрова, Е.А. Современные средства огнезащиты древесины // Рос. хим. ж. – 2003. – Т. 47. – №. 4. – С. 49–54.

2. Собурь, С.В. Огнезащита материалов и конструкций: Учебно-справочное пособие. – 5 изд., перераб. – М.: ПожКнига, 2004. – 256 с., ил.

3. Филиппович, Г.А., Кудряшов, А.Н., Яцукевич, А.Г., Денисевич, А.П. Влияние огнезащитной обработки древесины на ее электрофизические параметры // Пожаровзрывобезопасность. 2010. – Т. 19. – №. 11. – С. 12–16.

4. Джежора, А.А. Электроемкостные преобразователи и методы их расчета / А.А.Джежора. – Минск: РУП «Издательский дом «Белорусская наука», 2008. – 305 с.

5. Науменко, А.М. Измерение диэлектрической проницаемости хлопкового и льняного волокна с помощью многосекционных накладных конденсаторов / А.М. Науменко, А.А. Джежора // Вестник Витебского государственного технологического университета. – 2011. – Вып. 20. – С. 64–71. - Библиогр.: с. 70 (3 назв.).

6. Антошин А.А., Нератова В.В., Филиппович Г.А., Яцукевич А.Г. Влияние структуры обработанной огнезащитными пропитками древесины на ее диэлектрическую проницаемость // Приборостроение-2016. Материалы 9-й Международной научно-технической конференции. - Минск: БНТУ, 2016. – С. 17–19.

УДК 681

## ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА КОМПОЗИТНЫХ ПОЛИМЕРОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВНУТРЕННИХ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Пантелеев К.В., Гусев О.К., Свистун А.И., Воробей Р.И., Тьяловский К.Л., Жарин И.А., Самарина А.В.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

**Введение.** Зонд Кельвина традиционно применяют к электропроводящим материалам, таким как металлы и полуметаллы. Для данных групп хорошо определены носители заряда, т.е. квазисвободные электроны проводимости, обладающие высокой подвижностью. Основной вклад в формирование потенциального рельефа проводников вносит работа выхода электрона (РВЭ) поверхности. РВЭ поверхности – это минимальная энергия, необходимая для выхода электрона поверхности материала в вакуум. РВЭ зависит от широкого ряда факторов как физико-химического, так и деформационного характера, что позволяет использовать этот фундаментальный параметр для исследований деформаций и внутренних напряжений в металле [1, 2]. В полимерных материалах проводимость по сравнению с металлами ничтожно мала, а носителями заряда являются преимущественно ионы. Зарядами могут быть также обладающие полярными свойствами носители, смещенные в пределах изолированных молекулярных или доменных структур. В общем случае суммарный заряд равен или близок к нулю, а создаваемое в окружающем пространстве электростатическое поле связано с пространственным

разнесением различных по знаку и величине зарядов в объеме и на поверхности, границах раздела. В этом случае измеряемым зондом Кельвина параметром будет являться собственный или приобретенный в результате внешних воздействий потенциал (заряд) диэлектрика, который также, как и работа выхода электрона для металлов, содержит в себе комплексную информацию, в том числе, и о напряженном состоянии в объеме диэлектрика [3]. Результаты, полученные в работе [3] на образцах из полиэтилена высокого давления (ПЭВД) показали, что отклик электростатического потенциала на внешнее механическое воздействие наблюдался только у матричного материала, в случае образцов с гибридным наполнением данный эффект отсутствовал. Целью настоящей работы является определение степени влияния отдельных наполнителей в составе матрицы ПЭВД на отклик электростатического потенциала к механическим напряжениям.

**Материалы и методы экспериментальных исследований.** В качестве образцов экспериментальных исследований служили композиты на основе полиэтилена высокого давления (ПЭВД) марки 12203-250, производимого заводом

«Полимир» ОАО «Нафтан», наполненные углеволокном, углеродным наноматериалом (УНМ, представляет собой сильно переплетенные между собой многостенные углеродные нанотрубки диаметром 10–20 нм (95 %) и примеси металлических частиц катализатора (до 5 %), получен в ГНУ «Институт тепло- и массообмена НАН Беларуси») и наноразмерным порошком диоксида кремния средним диаметром 25 нм (получен в Институте теоретической и прикладной механики им. С.С. Христиановича СО РАН). Образцы композиционных материалов для исследований изготовлены в Гродненском филиале «Научно-исследовательский центр проблем ресурсосбережения» ИТМО НАН Беларуси. Условные обозначения и характеристика образцов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Условные обозначения и состав образцов

Условное обозначение	Компонентный состав
1	ПЭВД (94 % мас.) и углеволокно (6 % мас.)
2	ПЭВД (94 % мас.) и углеродный наноматериал (6 % мас.)
3	ПЭВД (97 % мас.) и наночастицы диоксида кремния (3 % мас.)

В качестве средств зондового картирования параметров распределения статического потенциала использована сканирующая модификация зарядочувствительного зонда по методу Кельвина-Зисмана [4], разработанного в БНТУ.

**Результаты и их обсуждение.** Изменение электропотенциального профиля под действием внутренних механических напряжений в материале наблюдался ранее при исследовании матричных материалов (ПЭВД и вторичного ПЭВД) [3]. В этом случае механические напряжения были связаны с действием вакуумного прижима, фиксирующего образец на предметном столике экспериментальной установки. В рамках данной работы условия механического воздействия сохранились теми же.

Результаты картирования распределения поверхностного электрического потенциала при действии механических напряжений приведены на рисунке 1. Статистическая обработка результатов измерений включает построение гистограмм распределения из которых определяется математическое ожидание и полуширина гистограмм распределения электрического потенциала по основной площади поверхности образца и локального максимума, соответствующего области действия вакуумного прижима. Результаты обработки сведены в таблицу 2.

Из результатов картирования (рисунок 1) и статистической обработки (таблица 2) видно, что отклик электрического потенциала на механическое воздействие наблюдается у образцов 2 и 3

(рисунок 1, б и в), в то время как образец 1 (рисунок 1, а), наполненный углеволокном, имеет относительно равномерное распределение потенциала, при этом регистрируется один точечный максимум вне области действия вакуумного прижима. Последнее может быть связано с наличием дефекта в объеме материала поверхностно слоя, участвующего в измерении.

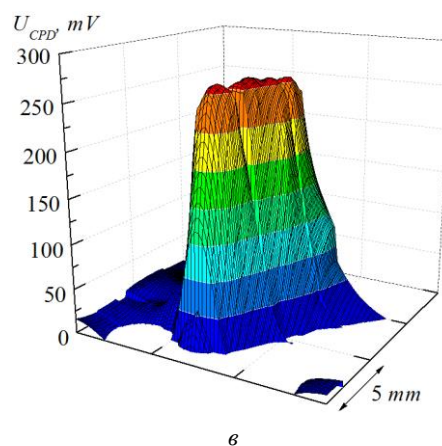
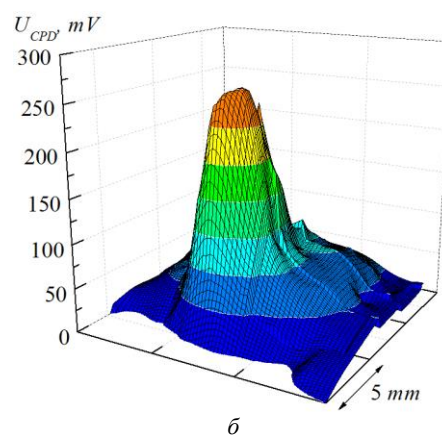
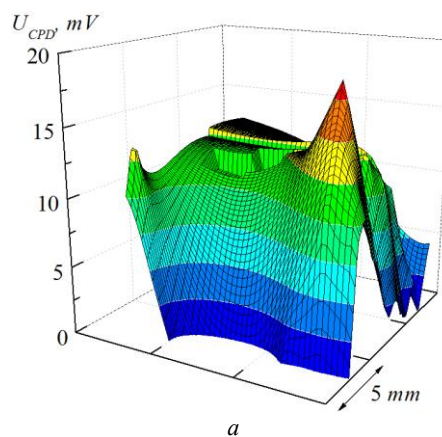


Рисунок 1 – Карты пространственного распределения поверхностного электрического потенциала при действии внутренних механических напряжений в материале:

а – ПЭВД (94 % мас.) и углеволокно (6 % мас.);  
 б – ПЭВД (94 % мас.) и углеродный наноматериал (6 % мас.);  
 в – ПЭВД (97 % мас.) и наночастицы диоксида кремния (3 % мас.)

Таблица 2 – Результаты статистической обработки

Обозначение образца	Математическое ожидание		Полуширина гистограммы распределения	
	$\bar{U}_{CPD}$ , мВ	$U_{CPDmax}$ , мВ	$\bar{U}_{CPD}$ , мВ	$U_{CPDmax}$ , мВ
1	3	16	5	1
2	12	250	3	2
3	1	265	2	6

Примечание:  $\bar{U}_{CPD}$  – среднее значение потенциала, без учета локализованного максимума;  $U_{CPDmax}$  – значение экстремума

**Заключение.** В общем случае, механическое сжатие или растяжение приводит к изменению компактности структуры материала и, следовательно, к изменению объема, занимаемого свободными электронами, что приводит к перераспределению зарядов в область действия механических напряжений (рисунок 1, б и в). Отсутствие наблюдаемого эффекта у образца 1 (рисунок 1, а) может быть связано с рядом факторов, например, с армирующим свойством углеволокна или др.

УДК 535-3, 535.314

## ПОЛУЧЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ В РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧАХ МЕТОДОМ СТЕРЕОФОТОГРАФИИ

Дудчик Ю.И.

*Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» Белорусского государственного университета  
Минск, Республика Беларусь*

Рентгеновские лучи широко используются в технической диагностике для просвечивания изделий с целью определения внутренних неоднородностей. Некоторые из известных методик позволяют получать изображения объектов с разрешением на уровне в несколько микрометров. Например, для этих целей используются проекционные рентгеновские микроскопы, состоящие из микрофокусной рентгеновской трубки и двумерной цифровой рентгеновской камеры. Метод рентгеновской микроскопии имеет свои ограничения, связанные с особенностями взаимодействия рентгеновских лучей с материалом объекта: для получения контрастного изображения объекта необходимо, чтобы его различные участки по-разному поглощали излучение. Это условие, как правило, не выполняется для материалов с небольшим порядковым номером – полимеров, пластиков, полимерных композитов, которые слабо поглощают рентгеновские лучи. Такие материалы широко используются в технике и медицине, например, из них состоят изделия, полученные методом 3-D печати. Поэтому получение изображения объектов, выполненных из материалов с малым порядковым номером, и которые слабо поглощают рентгеновские лучи, является актуальной задачей.

## Литература

1. Жарин, А.Л. Исследование локальных деформаций материалов методами зондовой электрометрии при различных видах нагружения / А.Л. Жарин, К.В. Пантелеев, А.И. Свистун // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сборн. научн. трудов: в 3 кн., Минск, 16–18 сентября 2015 г.; Физ. техн. ин-т НАН Беларуси; ред. кол. С. А. Астапчик (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2015. – Кн. 1. – С. 39–46.
2. Pansialeu, K. Charge sensitive techniques in tribology studies / K. Pansialeu, A. Zharin, M. Opielak, P. Rogalski // Przegląd Elektrotechniczny. – 2016. – R. 92, № 11. – P. 239 – 243.
3. Анализ распределения электрофизических и фотоэлектрических свойств нанокompозитных полимеров модернизированным зондом Кельвина / К.В. Пантелеев, А.В. Кравцевич, И.А. Ровба, В.И. Лысенко, Р.И. Воробей, О.К. Гусев, А.Л. Жарин // Приборы и методы измерений. – 2017. – Т. 8, № 4. – С. 386–397.
4. 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.

Изображения объектов, слабо поглощающих рентгеновское излучение, получают методом фазового контраста [1]. В таких материалах показатель преломления рентгеновского излучения, как правило, больше, чем показатель ослабления. Поэтому задача состоит в том, чтобы выделить из общего потока излучения, формирующего изображение объекта, ту часть, которая получается в результате преломления излучения на границах раздела неоднородностей объекта. Известны несколько методов практической реализации метода фазового контраста: с использованием микрофокусных рентгеновских аппаратов, с использованием квазипараллельного рентгеновского пучка, с использованием кодирующей диафрагмы. Практическая реализация указанных методов представляет определенную проблему, что связано с использованием дорогостоящих интенсивных источников излучения и прецизионных элементов для формирования рентгеновского пучка.

В данной работе показано, что применение известного из оптики метода стереофотографии [2] в рентгеновском диапазоне длин волн позволяет получать относительно просто, по сравнению с методом фазового контраста, изображения