

различных приборах Нанофор 05, указывают на нелинейный характер этой зависимости.

На основе вышеизложенного можно сделать вывод, что невозможно вывести теоретические зависимости между отношением сигнал/шум и степенью разведения. Поэтому необходимо провести последовательный ряд экспериментов с разными степенями разбавления раствора SynbDye и провести статистический анализ данных, чтобы определить аналитическую чувствительность и динамический диапазон для прибора Нанофор 05.

Анализ статистических данных может оказать значительное воздействие на улучшение эффективности алгоритма автоматического обнаружения пиков. Усовершенствованный алгоритм, в свою очередь, будет способствовать повышению конкурентоспособности данного прибора на рынке по сравнению с аналогичными устройствами.

УДК 621.38

### МИГРАЦИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ЗАРЯДА ПОЛИЭТИЛЕНА ПОСЛЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Борбат М.С., Самарина А.В., Пантелеев К.В., Тьявловский А.К., Гусев О., Жарин А.Л.

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

**Аннотация.** В работе на примере полиэтилена высокого давления рассмотрены некоторые эффекты миграции (перераспределения) поверхностного электростатического потенциала в диэлектрическом материале под действием механических напряжений и при релаксации. В качестве метода и средств исследования изменения распределения поверхностного электростатического потенциала под действием механических напряжений использован сканирующий зарядочувствительный зонд в сканирующей модификации (аналог метода Scanning Kelvin Probe), разработанный и изготовленный в Белорусском национальном техническом университете. Последовательные сканирования поверхности зарядочувствительным зондом в процессе релаксации показывают изменения в распределении поверхностного электростатического потенциала, что дает представление о характере заряда и о кинетике, и направлении его миграции.

**Ключевые слова:** поверхность, диэлектрик, поверхностный электростатический заряд, миграция заряда, микропроцессорный зарядочувствительный зонд.

### MIGRATION OF SURFACE ELECTROSTATIC CHARGE OF POLYETHYLENE AFTER DEFORMATION

Borbat M., Samarina A., Pantišalejeu K., Tyavlovsky A., Gusev O., Zharin A.

*Belarusian National Technical University  
Minsk, Republic of Belarus*

**Abstract.** The paper examines some effects of migration (redistribution) of surface electrostatic potential in a dielectric material, using high-density polyethylene as an example, during elastic mechanical deformation and during the relaxation process. As a method and means for studying changes in the distribution of surface electrostatic potential under the influence of mechanical stress, a scanning charge-sensitive microprocessor probe (analogue of the Scanning Kelvin Probe), developed at the Belarusian National Technical University, was used. Successive scans of the surface with a charge-sensitive probe during relaxation show changes in the distribution of the surface electrostatic potential, which gives an idea of the nature of the charge and the kinetics and direction of migration.

**Key words:** surface, dielectric, surface electrostatic charge, charge migration, microprocessor charge-sensitive probe.

*Адрес для переписки: Пантелеев К.В., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь  
e-mail: k.pantišalejeu@bntu.by*

Избыточный заряд в твердых диэлектриках имеет тенденцию мигрировать как относительно материала объема и поверхности, так и в окружающую среду. В литературных источниках механизм миграции заряда практически исключительно рассматривается, как электрическая проводимость

через окружающие тела [1]. Однако, с использованием метода сканирующего зонда Кельвина (Scanning Kelvin Probe), проведенные исследования распределения поверхностного электростатического потенциала диэлектриков на примере полиэтилена, подвергнутых различного вида внешнему

### Литература

1. Определение максимальной длины ДНК с точностью 99 % в полимере на основе линейного N,N-полидиметилакриламида методом капиллярного гель-электрофореза с лазер-индуцируемой флуоресценцией / Д.В. Бочарова [и др.] // Журнал аналитической химии. – 2021. – Т. 76, № 10. – С. 1–7.
2. Генетический анализатор Нанофор 05 в качестве средства измерений при секвенировании ДНК / А.А. Волков [и др.] // Измерительная техника. – 2021. – № 1. – С. 60–65.
3. Требования к качеству клинических лабораторных исследований : ГОСТ Р 53022.2-2008. – Введен РФ 01.01.2010. – М. : Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 2010. – 31 с.
4. Метод поиска пиков размерного стандарта при фрагментном анализе ДНК / И.В. Заруцкий [и др.] // Журнал технической физики. – 2018. – Т. 88, № 9. – С. 1407–1412.

воздействию (осаждения заряда в поле коронного разряда [2], трибоэлектризация [3], облучение оптическим излучением [4] и др.), позволили расширить представления о механизмах миграции и (или) перераспределения поверхностного заряда.

В работе приводятся результаты экспериментальных исследований эффекта миграции поверхностного электростатического потенциала на образце полиэтилена высокого давления (ПЭВД), подвергнутого механическому воздействию путем деформирования в области упругих деформаций, а также в процессе релаксации. В качестве метода и средств исследования изменения распределения поверхностного электростатического потенциала при деформировании и релаксации использован сканирующий зарядочувствительный микропроцессорный зонд (аналог метода сканирующего зонда Кельвина), разработанный и изготовленный в Белорусском национальном техническом университете [5–7]. Полученные с помощью зарядочувствительного зонда измерительные данные представляют собой карты распределения поверхностного электростатического потенциала, а последовательные сканирования поверхности образца после приложения нагрузки и в процессе релаксации показывают изменения в распределении поверхностного электростатического потенциала, что дает представление о характере заряда и о кинетике, и направлении его миграции.

В результате исследований установлено, что локальные механические напряжения, возникающие при деформировании образца, приводят к миграции поверхностного потенциала вдоль поверхности и его перераспределению в область деформирования (рисунок 1, а). Такой механизм можно объяснить, учитывая наличие глубоких ловушек заряда на поверхности и их увеличение в области деформирования и мелких ловушек в объеме, что затрудняет перемещение заряженных частиц в объеме.

В процессе релаксации (рисунок 1, б) поверхностный электростатический потенциал следует экспоненциальному спаду в области деформирования и перераспределению потенциала по поверхности образца. Следует отметить, что характер распределения потенциала в конце релаксации (рисунок 1, в) схож с характером распределения до деформирования образца. Из этого следует, что в случае упругого характера деформирования заряженные частицы мигрируют преимущественно вдоль поверхности.

В процессе экспериментальных исследований также установлено, что скорость диссипации поверхностного заряда при релаксации значительно ниже при более низких значениях относительной влажности (60 %), чем при более высоких значениях (90 %). Зависимость скорости диссипации поверхностного потенциала от влажности окружающей среды хорошо согласуется с результатами, полученными в работе [2] при исследовании

процессов миграции поверхностного заряда в зависимости от относительной влажности окружающей среды на образцах полиэтилена при зарядке их поверхности в поле коронного разряда.

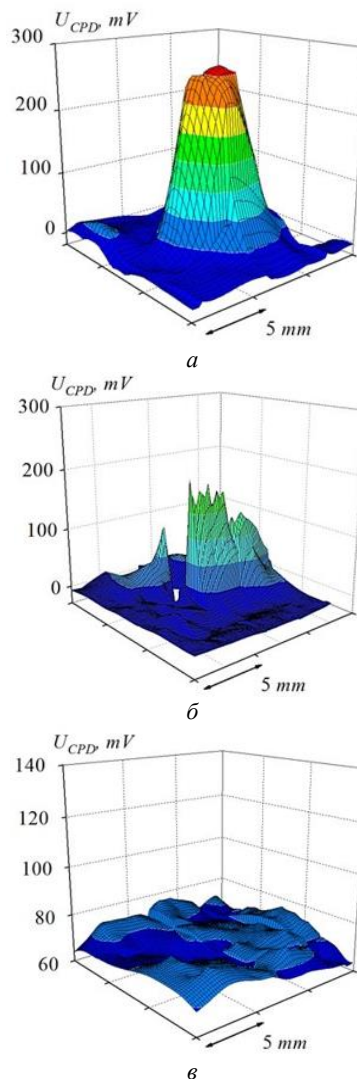


Рисунок 1 – Карты распределения поверхностного электростатического потенциала образца полиэтилена высокого давления после упругого деформирования (а) и в процессе релаксации (б, в) [5]

#### Литература

1. Patterns of Electrostatic Charge and Discharge in Contact Electrification / S.W. Thomas [et al.] // *Angewandte Chemie*. – 2008. – Vol. 120, iss. 35. – P. 6756–6758.
2. Burgo, T.A.L. Electric potential decay on polyethylene: role of atmospheric water on electric charge build-up and dissipation / T.A.L. Burgo, C.A. Rezende // *J. Electrostat.*, 2011. – Vol. 69. – P. 401–409.
3. Burgo, T.A.L. Triboelectricity: macroscopic charge patterns formed by self-arranging ions on polymer surfaces / T.A.L. Burgo, T.R.D. Ducati // *Langmuir*, 2012. – Vol. 28. – P. 7407–7416.
4. Анализ распределения электрофизических и фотоэлектрических свойств нанокompозитных полиме-

ров модернизированным зондом Кельвина / К.В. Пантелеев [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2017. – Т. 8, № 4. – С. 386–397.

5. Digital contact potential probe in studying the deformation of dielectric materials. Informatics / K. Pansialeyeu [et al.] // Control, Measurement in Economy and Environmental Protection. – 2020. – № 10, vol. 4. – P. 57–60.

6. Интеллектуальный сенсор для измерительных систем, работающих по схеме синусоидальное возбуждение – отклик / В.А. Микитевич [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2023. – Т. 14, № 1. – С. 18–26.

7. Универсальный цифровой зондовый электродметр для контроля полупроводниковых пластин / А.Л. Жарин [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2023. – Т. 14, № 3. – С. 161–172.

УДК 620.179.14/15

## МЕТОДИКА И УСТРОЙСТВО ДЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ОБРАЗЦОВ НА УСТАЛОСТЬ С ЗАДАНЫМ АЛГОРИТМОМ НАГРУЖЕНИЯ

Бусько В.Н.

*ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»  
Минск, Республика Беларусь*

**Аннотация.** Разработана эффективная методика и создано устройство для проведения циклических механических усталостных испытаний при изгибе стальных образцов одно- или двухчастотным нагружением. Показаны схема устройства и описан принцип работы. Эффективность механических испытаний достигается за счет применения дополнительных силовых элементов в виде подшипников качения с разным их количеством и разными диаметрами. Использование предлагаемой методики и устройства позволяет осуществлять нагружение испытываемых образцов по заданному алгоритму с повышенной производительностью испытаний.

**Ключевые слова:** механические испытания, машины, стенды и устройства для циклических испытаний на усталость, стальные образцы.

## METHODOLOGY AND DEVICE FOR MECHANICAL FATIGUE TESTING OF FERROMAGNETIC SPECIMENS WITH A GIVEN LOADING ALGORITHM

Busko V.N.

*Institute of Applied Physics of Belarus National Academy of Sciences  
Minsk, Republic of Belarus*

**Abstract.** An effective methodology is developed and a device for cyclic mechanical fatigue bending tests of steel specimens by single- or dual-frequency loading is created. The scheme of the device is shown and the principle of operation is described. The efficiency of mechanical testing is achieved by using additional force elements in the form of rolling bearings with different numbers and diameters. The use of the proposed methodology and device allows to carry out loading of test specimens according to a given algorithm with increased productivity of tests.

**Key words:** mechanical testing, machines, benches and devices for cyclic fatigue testing, steel specimens.

*Адрес для переписки: Бусько В.Н., ул. Академическая, 16, г. Минск, 220072, Республика Беларусь  
e-mail: busko@iaph.bas-net.by*

Для механических усталостных испытаний образцов стальных материалов применяют различные типы испытательных машин, установок, стендов и устройств одно- или двухчастотным нагружением [1]. Большинство из них основано на использовании кинематической схемы, консольного или чистого изгиба с применением различных кривошипных механизмов, шатунов, вибраторов, гидроцилиндров, пружин, рычагов и других узлов и вспомогательных устройств [1; 2]. Такая схема имеет недостатки из-за сложности регулирования амплитуды нагружения, необходимости иметь множество разноразмерных элементов, усложняющих установку уровня напряжений, снижающих функциональные возможности и производительность механических испытаний. Сложность реализации данного

принципа усугубляется дороговизной и громоздкостью оборудования, большими временными и трудозатратами при переналадке устройства под задачу испытаний и низкая производительность механических испытаний. К тому же большинство такого оборудования основано на одночастотном нагружении испытываемого образца.

При испытании образца на усталость с помощью двухчастотного нагружения увеличивается информативность получаемой информации, а на практике, в основном встречаются случаи, когда на образец или изделие одновременно воздействуют две частоты нагружения (низкочастотная и высокочастотная компоненты) [3].

Цель работы – повышение эффективности, производительности испытаний и расширение функциональных возможностей испытательного