

УДК 620.172:620.18

КОНТРОЛЬ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ КОНТАКТНОЙ РАЗНОСТИ ПОТЕНЦИАЛОВ

К. В. ПАНТЕЛЕЕВ, А. И. СВИСТУН, В. А. МИКИТЕВИЧ, А. Л. ЖАРИН

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

UDC 620.172:620.18

CONTROL OF THE STRESS-DEFORMED STATE OF POLYMERS BY THE CONTACT POTENTIAL DIFFERENCE TECHNIQUE

K. U. PANTSIALEYEU, A. I. SVISTUN, U. A. MIKITSEVICH, A. L. ZHARIN

Аннотация. В работе приводятся результаты исследований напряженно-деформированного состояния полимерных материалов с помощью сканирующего зонда Кельвина (метод контактной разности потенциалов). Распределение электростатического потенциала измерялось при механическом растяжении полимерных образцов. Показана зависимость распределения и относительного значения электростатического потенциала поверхности от распределения механических напряжений в объеме материала. Метод может быть применен для бесконтактного неразрушающего выявления локализации деформации, контроля остаточных напряжений, релаксации и других параметров материала в напряженно-деформированном состоянии.

Ключевые слова: электростатический потенциал поверхности, напряженно-деформированное состояние, полимерные материалы, контактная разность потенциалов, сканирующий зонд Кельвина.

Abstract. In this paper we report on the stress-deformed state of polymers investigated by means of Scanning Kelvin Probe (Contact Potential Difference Technique). The potential distribution was measured under the influence mechanical strain at the polymer. The dependence of the surface potential distribution and relative quantitative value on the mechanical stress distribution in the volume of material were shown. The method can be applied for non-contact non-destructive detection of deformation localization, control of residual stresses, relaxation and other parameters of the material in the stress-strain state.

Key words: surface potential, stress-deformed state, polymers, Contact Potential Difference, Scanning Kelvin Probe.

Введение

В работе приводятся результаты исследований особенностей изменения пространственного распределения поверхностного электростатического потенциала образцов из полимеров при механическом растяжении с использованием метода контактной разности потенциалов (КРП) в режиме сканирования поверхности (сканирующий зонд Кельвина).

Электростатический потенциал поверхности материалов является универсальным параметром, характеризующим физико-механические,

физико-химические, структурные и другие характеристики поверхности [1]. Наиболее перспективный метод для бесконтактного измерения поверхностного электростатического потенциала – это метод КРП. Существуют модификации метода КРП, позволяющие проводить измерения непосредственно на воздухе, т. е. без создания каких-либо специфических условий окружающей среды [2]. При этом практическая реализация данных методов относительно проста [3, 4], что позволяет использовать их в совокупности с каким-либо внешним воздействием на материал (например, механическим, температурным, световым и др. [5–7]), в том числе *in situ* [8]. Применение метода КРП для исследования состояния поверхности материалов в литературных источниках встречается в большинстве для металлов и сплавов, в этом случае контролируемым параметром является работа выхода электрона поверхности металла. Проведенные ранее исследования [9, 10] показали, что методы КРП применимы и для исследования полимерных материалов и композитов на их основе. В этом случае контролируемым параметром будет являться собственный и/или приобретенный в результате внешних воздействий электростатический потенциал (заряд) диэлектрика.

Приборы и методы экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования проводили с использованием системы сканирования электростатических потенциалов, основанной на измерении контактной разности потенциалов вибрирующим зондом [11], разработанной в Белорусском национальном техническом университете. Для механического нагружения образцов система сканирования электростатических потенциалов была оснащена устройством для растяжения полимерных образцов.

Результаты исследований и их обсуждение

Отклик электростатического потенциала поверхности полимерных материалов на внешнее механическое воздействие был обнаружен ранее в работе [10]. В качестве образцов были использованы матричный полиэтилен высокого давления (ПЭВД) марки 12203-250 и многокомпонентные композиты на его основе, наполненные углеродным волокном, углеродным наноматериалом (многостенные углеродные нанотрубки диаметром 10...20 нм и примеси металлических частиц катализатора до 5 %), а также наноразмерными частицами диоксида кремния или алюминия (средним диаметром 25 нм). Детектируемые отклонения электростатического потенциала поверхности (аналогично рис. 1, б) были вызваны действием вакуумного прижима, фиксирующего образец на предметном столике сканирующей установки. Для изучения наблюдаемого эффекта

были проведены измерения электростатического потенциала поверхности ПЭВД без фиксации (рис. 1, *a*) и после фиксации к предметному столику через некоторые промежутки времени (рис. 1, *в*).

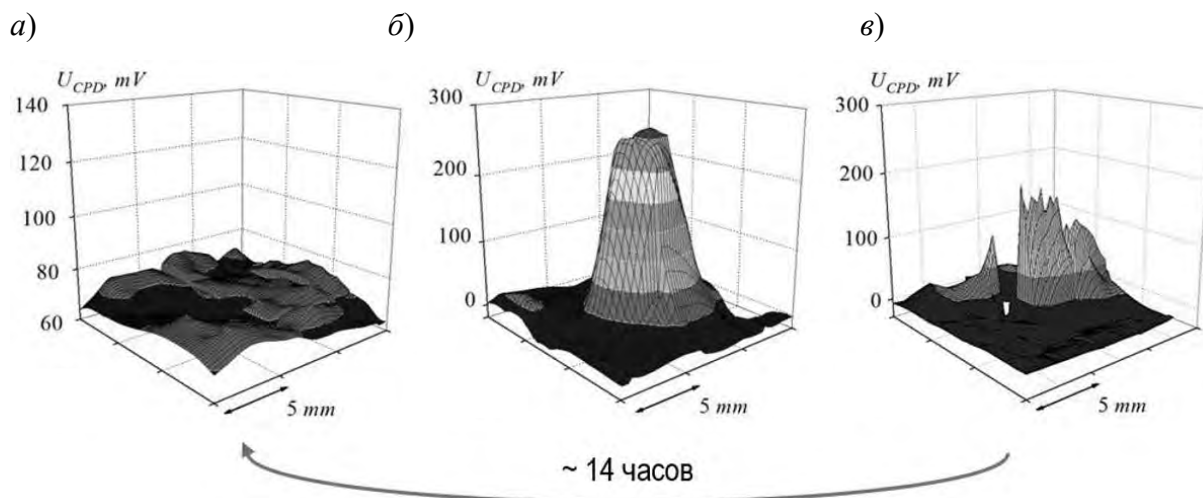


Рис. 1. Карты распределения электростатического потенциала поверхности образца полиэтилена высокого давления: *a* – без механического воздействия; *б* – при механическом воздействии; *в* – через 4 ч после воздействия

Из результатов измерений видно, что воздействие вакуумным прижимом вызывает перераспределение электростатических потенциалов поверхности и их локализацию в области действия механических нагрузок. При этом по большей области образца распределение потенциала однородно в пределах относительных значений от минус 8 до 2 мВ, когда без фиксации образца (см. рис. 1, *a*) относительные значения потенциала составили около 60...70 мВ. Результаты сканирования образца через 4 ч после воздействия показали снижение относительных значений потенциала в области локализации, а через 14 ч – возврат к состоянию образца, близкому к исходному, как по распределению, так и по относительному значению электростатического потенциала поверхности. Таким образом, контроль параметров распределения электростатического потенциала поверхности позволяет не только выявить области локализации механических напряжений, но и проследить за релаксационными процессами в объеме материала.

Согласно результатам, описанным в [10], для многокомпонентных композитов отклик электростатического потенциала на механическое воздействие вакуумным прижимом не детектировался. Однако дополнительные измерения на образцах композиционного ПЭВД, наполненного только одним из компонентов (углеволокном, углеродным наноматериалом или наноразмерным порошком диоксида кремния), показали локализацию электростатических потенциалов в области действия прижима (рис. 2).

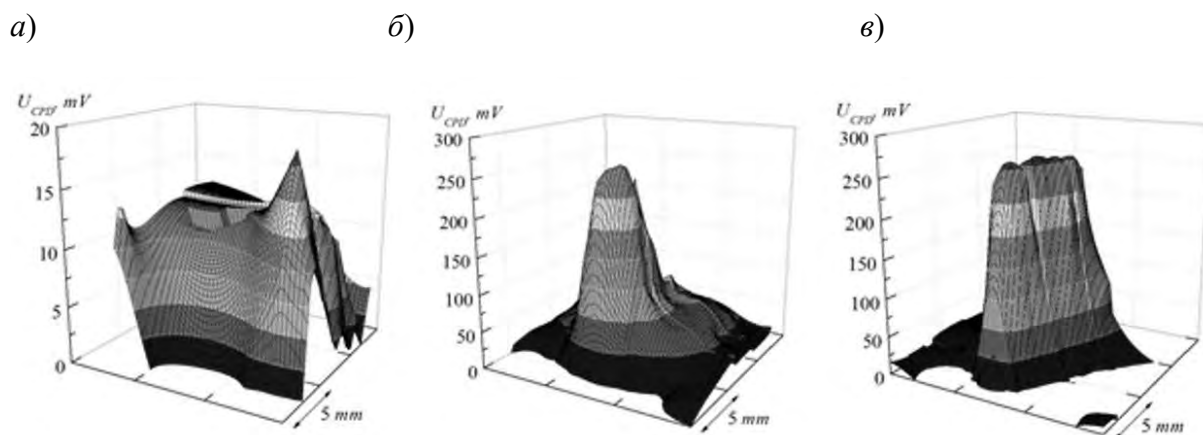


Рис. 2. Карты распределения электростатического потенциала поверхности композитов при внутренних механических напряжениях: *а* – ПЭВД, наполненный и углеродным (6 % мас.); *б* – ПЭВД, наполненный углеродным наноматериалом (6 % мас.); *в* – ПЭВД, наполненный наночастицами диоксида кремния (3 % мас.)

Из результатов исследования можно сделать вывод о влиянии комбинированного наполнителя на механические свойства материала.

Для изучения потенциальных возможностей метода, а также особенностей изменения параметров распределения электростатического потенциала поверхности полимеров под действием механических нагрузок изготовлена система для растяжения образцов (рис. 3) и проведены экспериментальные исследования изменения параметров пространственного распределения электростатического потенциала при растяжении полимерных образцов.

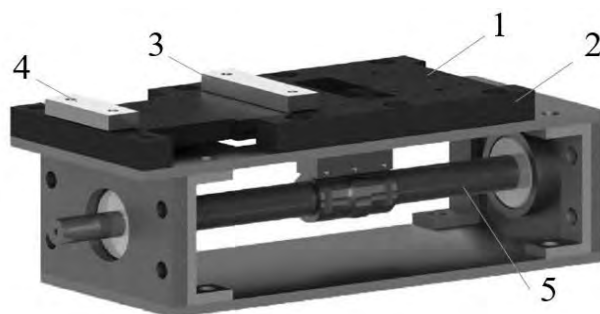


Рис. 3. Система для растяжения полимерных образцов: 1 – подвижное основание; 2 – неподвижное основание; 3, 4 – зажимы, фиксирующие образец; 5 – нагружающий винт

В качестве образцов использован листовой фторопласт-4 толщиной 1 мм. Образцы изготавливались в форме лопаток с узкой областью 5 мм. Они устанавливались в систему растяжения, сопряженную с установкой сканирования электростатических потенциалов, и прикладывалась минимальная нагрузка для выпрямления образца. Затем в режиме сканирования поверхности измеряли электростатический потенциал поверхности образца

под нагрузкой. Описанные действия повторялись с постоянно увеличивающейся нагрузкой с шагом 1 кгс, что позволило получить зависимость изменения распределения электростатического потенциала поверхности образца от приложенной нагрузки (рис. 4). Регистрация нагружения осуществлялась с помощью тензодатчика, сопряженного с нагружающим винтом.

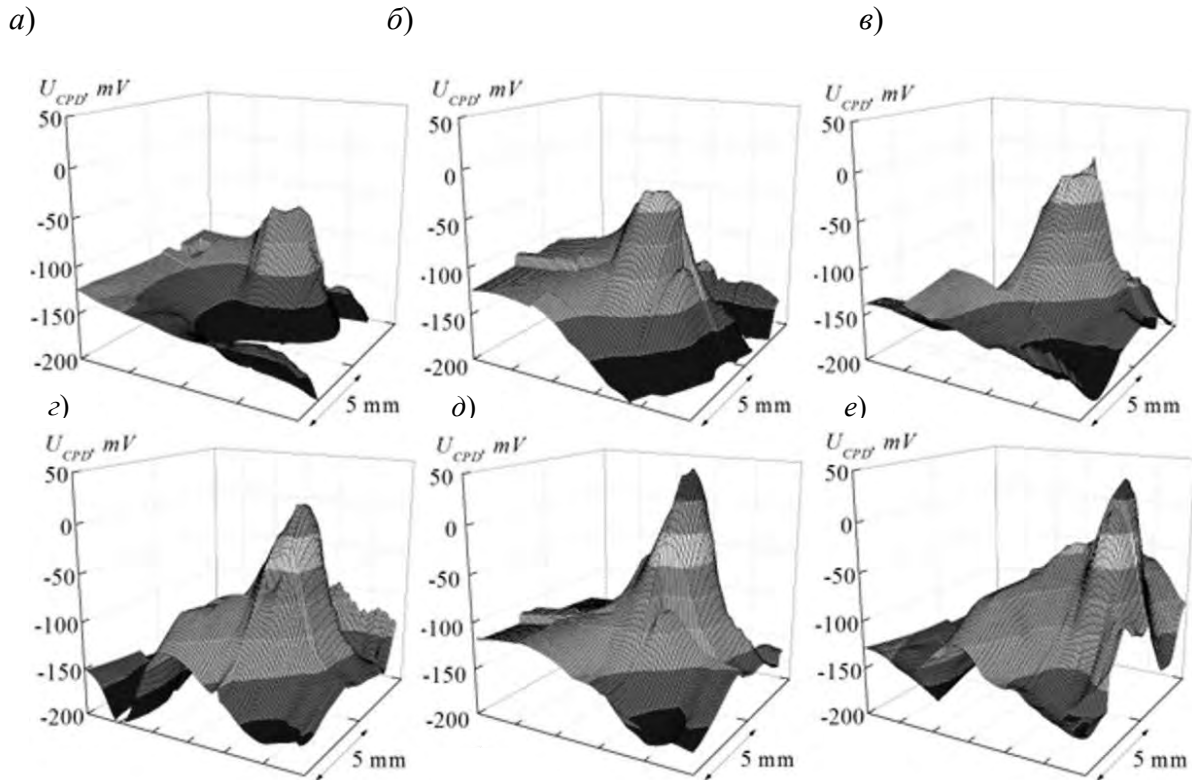


Рис. 4. Карты пространственного распределения поверхностного электростатического потенциала образца фторопласт-4 при действии внутренних механических напряжений при растяжении: *a* – около 0 кгс; *б* – 1 кгс; *в* – 2 кгс; *г* – 3 кгс; *д* – 4 кгс; *е* – 5 кгс

Как показали исследования, характеры изменения потенциала поверхности и его распределения при растяжении и под действием вакуумного прижима подобны, т. е. в обоих случаях наблюдается локализация потенциала в области действия механических напряжений. Из рис. 4, *a* видно, что перераспределение электростатического потенциала происходит при минимально возможных удельных нагрузках. С дальнейшим увеличением нагрузки относительное значение электростатического потенциала пропорционально увеличивается, также увеличивается и область локализации.

При удельной нагрузке 4 кгс (см. рис. 4, *д*) электростатический потенциал поверхности насыщается, т. е. достигает максимального относительного численного значения (около 50 мВ). Последующее увеличение нагрузки приводит к увеличению области и относительного

значения электростатического потенциала поверхности вблизи экстремума, что связано с ростом и распространением внутренних механических напряжений в объеме материала. Следует отметить, что разрушение образца не было достигнуто из-за ограничений хода нагружающего винта.

Заключение

Результаты проведенных исследований показывают, что метод контактной разности потенциалов может быть применен для бесконтактного неразрушающего выявления локализации деформации, контроля остаточных напряжений, релаксации, например, от времени, скорости и/или значения удельного напряжения и других характеристик полимерных материалов в напряженно-деформированном состоянии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Zharin, A. L.** Contact Potential Difference Techniques as Probing Tools in Tribology and Surface Mapping. In book: Scanning Probe Microscopy in Nanoscience and Nanotechnology / A. L. Zharin. – Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. – P. 687–720.
2. **Жарин, А. Л.** Метод контактной разности потенциалов и его применение в трибологии / А. Л. Жарин. – Минск: Бестпринт, 1996. – 235 с.
3. **Pantsialeu, K. U.** Design of the contact potentials difference probes [Electronic resource] / K. U. Pantsialeu, U. A. Mikitsevich, A. L. Zharin // Devices and Methods of Measurements. – 2016. – Mode of access: <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2016-7-1-7-15>.
4. Digital contact potential difference probe [Electronic resource] / K. U. Pantsialeu [et al.] // Devices and Methods of Measurements. – 2016. – Mode of access: <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2016-7-2-136-144>.
5. Charge sensitive techniques in tribology studies [Electronic resource] / K. U. Pantsialeu [et al.] // Przegląd Elektrotechniczny. 2016. – R. 92. – № 11. – P. 239–243. – Mode of access: <https://doi.org/10.15199/48.2016.11.58/>
6. Influence of rapid thermal treatment of initial silicon wafers on the electrophysical properties of silicon dioxide obtained by pyrogenous oxidation / V. Pilipenko [et al.] // High Temperature Material Processes: An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes. – 2019. – Vol. 23, iss. 3. – P. 283–290.
7. Scanning Kelvin probe and surface photovoltage analysis of multicrystalline silicon [Electronic resource] / A. Castaldini [et al.] // Materials Science and Engineering. – 2002. – Vol. 91–92. – P. 234–238. – Mode of access: [https://doi.org/10.1016/S0921-5107\(01\)01018-2](https://doi.org/10.1016/S0921-5107(01)01018-2).
8. On the use of scanning Kelvin probe for assessing in situ the delamination of adhesively bonded joints [Electronic resource] / B. Andreon

[et al.] // Corrosion Science. – 2019. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.03.001>.

9. **Вершина, Г. А.** Исследование накопления заряда статического электричества на поверхности изделий из фторопласта-4 методом вибрирующего конденсатора / Г. А. Вершина, А. Л. Жарин, А. К. Тявловский // Наука и техника. – 2012. – № 1. – С. 26–32.

10. Анализ распределения электрофизических и фотоэлектрических свойств нанокompозитных полимеров модифицированным зондом Кельвина [Электронный ресурс] / К. В. Пантелеев. – 2017. – № 8 (4). – С. 386–397. – Режим доступа: <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2017-8-4-55-62>.

11. Установка для бесконтактного контроля однородности распределения параметров ионно-легированных и диффузионных слоев на полупроводниковых пластинах диаметром до 200 мм / А. И. Свистун // Приборостроение: материалы 12 Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 13–15 нояб. 2019 г. – Минск, 2019. – С. 98–100.

E-mail: nil_pt@bntu.by.