

Зарядочувствительный метод исследования деформационных процессов

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

Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь

Поступила 01.11.2022

Принята к печати 12.12.2022

В качестве информационного параметра об изменении состояния материала под действием механических напряжений может быть использован поверхностный электростатический потенциал (заряд). Целью работы являлась отработка методик исследования деформационных процессов в металлических и полимерных материалах с использованием зарядочувствительного метода.

Проведены экспериментальные исследования деформационных процессов при растягивающих, сжимающих и ударных нагрузках на образцах различных материалов: алюминиевый сплав марки АМг2, сталь марки 08Пс, полиэтилен высокого давления марки 12203-250 и образцы композиционных материалов на его основе, фторопласт-4. В качестве метода исследований использовался анализ изменений относительных значений работы выхода электрона поверхности в случае металлов и поверхностного электростатического потенциала в случае матричных и композиционных полимерных материалов. В качестве средств измерений использовалась сканирующая модификация зарядочувствительного зонда.

Результаты экспериментальных исследований материалов в напряжённо-деформированном состоянии демонстрируют высокую эффективность предложенного метода. Методика исследований позволяет обнаруживать локальные изменения поверхностного потенциала материала в области действия деформаций, которые не обнаруживаются в макроскопическом масштабе с использованием стандартных методов. Полученные результаты могут служить базой для разработки новых методов и методик исследования механических свойств как металлов, так и диэлектрических материалов.

Ключевые слова: поверхность, деформация, поверхностный электростатический потенциал, зарядочувствительный метод, зонд Кельвина.

DOI: 10.21122/2220-9506-2022-13-4-291-301

Адрес для переписки:

Пантелеев К.В.
Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь
e-mail: nil_pt@bntu.by

Address for correspondence:

Pantsialeyeu K.U.
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: nil_pt@bntu.by

Для цитирования:

К.В. Пантелеев, В.А. Микитевич, А.И. Свистун, Р.И. Воробей,
О.К. Гусев, А.Л. Жарин.
Зарядочувствительный метод исследования деформационных процессов.
Приборы и методы измерений.
2022. – Т. 13, № 4. – С. 291–301.
DOI: 10.21122/2220-9506-2022-13-4-291-301

For citation:

K.U. Pantsialeyeu, U.A. Mikitsevich, A.I. Svistun, R.I. Vorobey,
O.K. Gusev, A.L. Zharin.
[Charge-Sensitive Technique for Studying Deformation Processes].
Devices and Methods of Measurements.
2022, vol. 13, no. 4, pp. 291–301 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2022-13-4-291-301

Charge-Sensitive Technique for Deformation Processes' Study

K.U. Pantsialeveu, U.A. Mikitsevich, A.I. Svistun, R.I. Vorobey, O.K. Gusev, A.L. Zharin

Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus

Received 01.11.2022

Accepted for publication 12.12.2022

Abstract

Surface charge can be used as an information parameter about the change in the state of the material under the action of mechanical stresses. The aim of the work was to develop methods for studying deformation processes in metallic and polymeric materials using a charge-sensitive method.

Experimental studies of deformation processes under tensile, compressive and impact loads were carried out on samples of various materials: aluminum alloy of AMg2 grade, steel of grade 08PS, high-pressure polyethylene of grade 12203-250 and samples of composite materials based on it, F4 polytetrafluoroethylene. As a research method, the analysis of changes in the relative values of the surface electron work function in the case of metals and the surface electrostatic potential in the case of polymers and composite materials is used. A scanning modification of a charge-sensitive probe is used as a measuring instrument.

The results of experimental studies of materials in a stress-strain state demonstrate the high efficiency of the proposed method. The research methodology makes it possible to detect local changes in the surface potential of the material in the area of deformations, which are not detected on a macroscopic scale using standard methods. The results obtained can serve as a basis for the development of new methods and techniques for studying the mechanical properties of both metals and dielectric materials.

Keywords: surface, deformation, surface electrostatic potential, charge-sensitive method, Kelvin probe.

DOI: 10.21122/2220-9506-2022-13-4-291-301

Адрес для переписки:

Пантелеев К.В.
Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь
e-mail: nil_pt@bntu.by

Address for correspondence:

Pantsialeveu K.U.
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: nil_pt@bntu.by

Для цитирования:

К.В. Пантелеев, В.А. Микитевич, А.И. Свистун, Р.И. Воробей,
О.К. Гусев, А.Л. Жарин.
Зарядочувствительный метод исследования
деформационных процессов.
Приборы и методы измерений.
2022. – Т. 13, № 4. – С. 291–301.
DOI: 10.21122/2220-9506-2022-13-4-291-301

For citation:

K.U. Pantsialeveu, U.A. Mikitsevich, A.I. Svistun, R.I. Vorobey,
O.K. Gusev, A.L. Zharin.
[Charge-Sensitive Technique for Studying Deformation Processes].
Devices and Methods of Measurements.
2022, vol. 13, no. 4, pp. 291–301 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2022-13-4-291-301

Введение

В настоящее время значительные усилия направлены на поиск путей определения механических напряжений при контактном взаимодействии твёрдых тел [1–3]. Одним из наиболее актуальных вопросов в данном направлении является изучение процессов и установление механизмов зарождения, развития и аннигиляции сдвиговых неустойчивостей, которые протекают в материале под действием механических напряжений на всех его масштабных уровнях [4–6]. Большинство стандартных методов исследования контактных деформаций основаны на определении геометрических параметров поверхности вблизи области контакта с использованием тензодатчиков и оптических устройств. При этом для определения 10%-ой деформации поверхностного слоя толщиной 1 мкм необходимо измерять линейные размеры с точностью менее 0,1 нм, что трудно осуществить на практике [7]. В этой связи важной задачей в области физики прочности является разработка новых и совершенствование существующих методов и средств исследования материалов в напряжённо-деформированном состоянии.

В качестве информационного параметра об изменении состояния материала под действием механических напряжений может быть использован поверхностный электростатический потенциал (заряд). В случае металлов и сплавов основной вклад в формирование поверхностного электростатического потенциала вносит такая фундаментальная величина кристаллического твёрдого тела, как работа выхода электрона (РВЭ) поверхности [8]. Высокая чувствительность работы выхода электрона к изменению компактности и скоплению дефектов кристаллической решётки, дислокациям, деформационным дефектам и внутренним напряжениям обусловила широкое использование этого параметра для исследования деформационных процессов в металлах и сплавах [9, 10]. В случае диэлектриков поверхностный потенциал обусловлен собственными и/или приобретёнными в результате внешнего воздействия электростатическими зарядами [11–13]. Наличие электрического потенциала в объёме и на поверхности твёрдого диэлектрика также оказывает существенное влияние на его механические, оптические и электрические параметры, а также на кинетику физико-химических процессов, имеющих место

при воздействии на материал внешних факторов, например, температуры, оптического излучения, механических напряжений и др. [14–17].

Для определения поверхностного потенциала материалов наиболее удобны конденсаторные методы, основанные на измерении контактной разности потенциалов (КРП). Конденсаторные методы измерения КРП представлены большим числом модификаций [7, 15, 18,], известных под общим названием – зонд Кельвина. В общем случае, в зонде Кельвина реализована компенсационная схема определения КРП между обкладками конденсатора, образованного измеряемой поверхностью и поверхностью измерительного зонда [7]. В случае высокоомных материалов (диэлектриков) необходимость в компенсации КРП накладывала значительные методические трудности, связанные с необходимостью компенсации поверхностного электростатического потенциала диэлектрика, который может достигать значений порядка десятков и сотен вольт. Ранее нами предложен некомпенсационный метод определения КРП и реализующий его цифровой измеритель [15], обеспечивающие измерение поверхностного электростатического потенциала диэлектрических материалов косвенным методом в диапазоне измеряемых потенциалов до ± 100 В и более при соответствующих алгоритмах обработки измерительного сигнала. Новые методики анализа и оценки функциональных свойств перспективных материалов на основе полимеров, керамик, биоматериалов с использованием зарядочувствительного метода будут представлять большое практическое значение для физического материаловедения.

Целью работы являлась отработка методик исследования деформационных процессов в металлических и полимерных материалах с использованием зарядочувствительного метода.

Методы и приборы исследования

В качестве метода исследований использовался анализ изменений относительных значений РВЭ (для случая металлов) и поверхностного потенциала (для случая полимерных композиционных материалов), распределённых по измеряемой поверхности. В качестве средств измерений применялась сканирующая модификация зарядочувствительного зонда, аналог сканирующего зонда Кельвина (*Scanning Kelvin Probe*). На рисунке 1 приведён внешний вид разработанной

специализированной измерительной установки заводского исполнения СКАН-2015. Основное назначение СКАН-2015 – бесконтактный неразрушающий контроль субмикронных слоёв полупроводниковой пластины (диаметром до 200 мм) по параметрам распределения времени жизни неравновесных носителей заряда и концентрации примеси железа в кремнии *p*-типа путём анализа разностных распределений электрического потенциала поверхности до и после кратковременного отжига поверхности пластины при температуре

около 200 °С [19]. Технические характеристики СКАН-2015 приведены в таблице 1. Следует отметить, что измерительная установка СКАН-2015 также применима для исследования металлических и диэлектрических поверхностей. В случае металлов и сплавов контролируемым параметром будет являться распределение относительных значений РВЭ поверхности, а в случае диэлектриков – распределение собственных и/или приобретённых в результате внешнего воздействия электростатических потенциалов (зарядов).

Таблица 1/ Table 1

Основные технические характеристики измерительной установки СКАН-2015

Main technical characteristics of the measuring device SCAN-2015

Параметр / Parameter	Характеристика / Characteristics
Основной контролируемый параметр Main controlled parameter	поверхностный электростатический потенциал / surface electrostatic potential – контроль распределения диффузионной длины/diffusion length distribution control
Реализуемые методики Implemented Methods	– контроль концентрации примеси железа/control of iron impurity concentration
Диаметр контролируемых образцов не более, мм Diameter of controlled samples no more than, mm	200
Тип измерителя Probe type	цифровой зонд Кельвина/ Digital Kelvin Probe
Диаметр зонда, мм Diameter of the probe, mm	1.0
Пространственное разрешение не менее, мм Spatial resolution not less than, mm	0.5
Диапазон измерения электрического потенциала поверхности полупроводниковой пластины*, мВ Measurement range of electric potential of semiconductor wafer surface*, mV	± (2...2500)
Погрешность измерения поверхностного электрического потенциала не более, мВ Error in measuring the electric potential of the surface, no more than, mV	2.0
Дополнительное воздействие при измерении распределения диффузионной длины Additional Influence in Measuring Diffusion Length Distribution	световое излучение видимого диапазона/visible light radiation
Дополнительное воздействие при определении концентрации примеси железа Additional influence in determining the concentration of iron impurities	отжиг/annealing
Температура отжига, номинальная, °С Annealing temperature, nominal, °С	200
Диапазон регулировки температуры отжига, °С Annealing temperature adjustment range, °С	60–300

* – в случае образцов диэлектрических материалов диапазон контроля электростатического потенциала поверхности может быть расширен алгоритмически до ±100 В / in the case of studying samples of dielectric materials, the range of control of the electrostatic potential of the surface can be extended algorithmically up to ±100 V

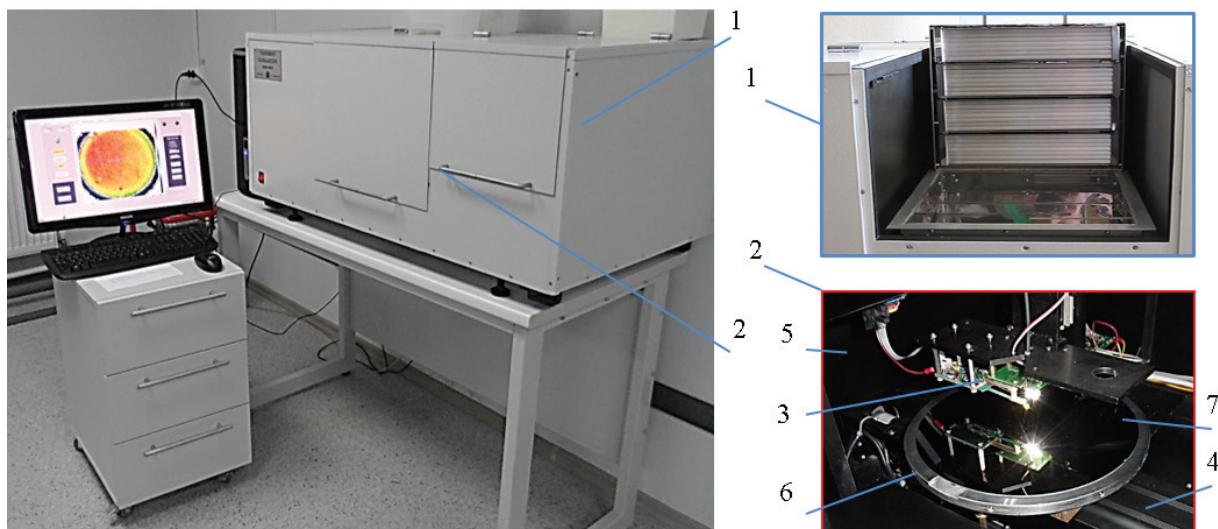


Рисунок 1 – Общий вид установки СКАН-2015: 1 – камера отжига (применяется в методике определения концентрации примеси железа в кремниевых пластинах); 2 – рабочая камера; 3 – измерительная головка (зонд) и электронный блок драйверов управления; 4 – приводы двухкоординатного сканирования; 5 – привод вертикального перемещения измерительной головки; 6 – предметный столик; 7 – контролируемый образец [19]

Figure 1 – General view of the SCAN-2015: 1 – annealing chamber (used in the method for determining the concentration of iron impurities in silicon wafers); 2 – working chamber; 3 – measuring head (probe) and electronic block of control drivers; 4 – drives of two-coordinate scanning; 5 – drive for vertical movement of the measuring head; 6 – object table; 7 – controlled sample [19]

Для повышения быстродействия и точности измерений в СКАН-2015 используется разработанный уникальный метод и устройство (цифровой зонд Кельвина) регистрации поверхностного электрического потенциала в режиме неполной компенсации измерительного сигнала (некомпенсационный метод [15]). Некомпенсационный метод реализуется на основе алгоритмов анализа параметров компенсационной зависимости измерительного сигнала в области с высоким соотношением сигнал/шум и поиска потенциала компенсации, соответствующего по модулю значению измеряемой величины.

Результаты исследований и их обсуждение

На рисунке 2 представлены экспериментальные исследования поля пластической деформации по неоднородности распределения РВЭ на образце алюминиевого сплава марки АМг2 после одноосного статического нагружения через жёсткий сферический индентор – стальной шарик диаметром 12 мм.

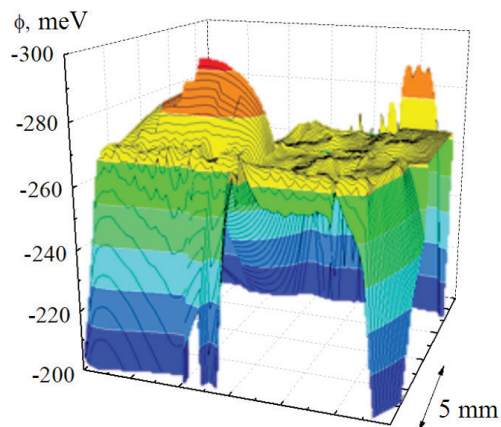


Рисунок 2 – Карта распределения работы выхода электрона поверхности алюминиевого сплава АМг2 после статического деформирования через жёсткий сферический индентор нагрузкой до 7,5 кН

Figure 2 – Distribution map of the work function of aluminum alloy АМг2 after local loading with a rigid spherical indenter up to 7.5 kN

Нагрузка составила около 7–7,5 кН. Из карты распределения РВЭ (рисунок 2) видно, что градиент распределения РВЭ относительно оси нагружения немонотонен. Наблюдается

значительный разброс значений и формирование достаточно выраженной области с низким значением РВЭ (минус 290 мВ). Данная область характеризует поле пластической деформации и, следовательно, по мере роста относительных значений РВЭ – переход от упругой (вблизи контакта) к пластической (в зоне контакта) деформации. Исследования зависимости РВЭ металлов и сплавов от деформаций при различных видах нагружения авторами работы проводились ранее [7, 9]. В общем случае, в области упругих деформаций наблюдается

незначительное увеличение относительных значений РВЭ и последующий спад при преобладании пластической составляющей деформации.

На образце стали марки 08ПС проведены экспериментальные исследования остаточных напряжений (рисунок 3). Нагружение осуществлялось ударным способом через стальной шарик диаметром 12 мм и через четырёхгранную правильную пирамиду. Сканирование распределения РВЭ осуществляли непосредственно после деформирования и через 24 ч.

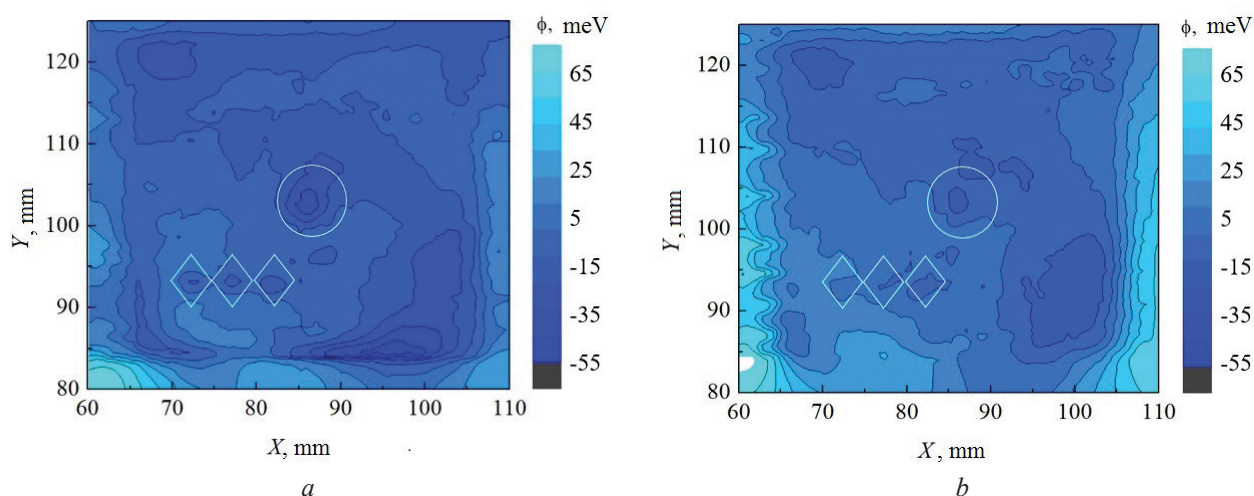


Рисунок 3 – Карты распределения работы выхода электрона поверхности образца стали марки 08ПС непосредственно после деформирования (а) и через 24 часа (б): \circ – деформирование через сферический индентор; \diamond – деформирование через правильную пирамиду

Figure 3 – Distribution maps of the work function of a sample of steel 08PS immediately after deformation (а) and after 24 hours (б): \circ – deformation through a spherical indenter; \diamond – deformation through a regular pyramid

В целом распределение РВЭ образца стали 08ПС неоднородно, что связано с неоднородностью самой технической поверхности, так как предварительная подготовка поверхности образца не проводилась. При этом выявлены области с более низким относительным значением РВЭ, соответствующие областям деформирования (рисунок 3а). Результаты повторного сканирования через 24 ч после деформирования (рисунок 3б) показали выравнивание градиента распределения РВЭ в области действия деформации, что согласуется с уменьшением внутренних механических напряжений в материале.

Характерные неоднородности распределения электростатического потенциала, соответст-

вующие полю упругой деформации, получили на образце полиэтилена высокого давления (ПЭВД) марки 12203-250 листового толщиной 2 мм. В результате исследований зарегистрировано перераспределение поверхностного электростатического потенциала в области фиксации образца к предметному столику (рисунок 4а). Фиксация образца осуществлялась с помощью вакуумного прижима. Под действием относительно малых нагрузок в области фиксации образца значение поверхностного электростатического потенциала составило около минус 240 мВ при математическом ожидании распределения по всей поверхности минус 4 мВ (рисунок 4б).

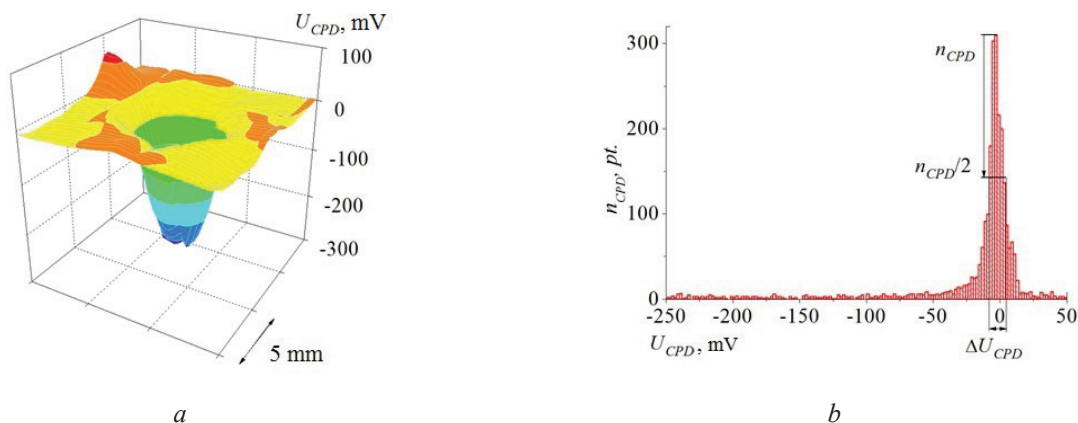


Рисунок 4 – Карта (а) и гистограмма (b) распределения поверхностного электростатического потенциала образца полиэтилена высокого давления при действии малых нагрузок

Figure 4 – Distribution map (a) and histogram (b) of the surface electrostatic potential of a sample of low density polyethylene under the action of small loads

С целью уточнения наблюдаемого эффекта проведены повторные измерения без использования вакуумного фиксатора и затем с включенным вакуумным фиксатором. Результаты повторных измерений без использования вакуумного фиксатора (рисунок 5а) показали относительно однородное распределение поверхностного электростатического потенциала на уровне 48 ± 5 мВ по всей измеряемой поверхности. На рисунке 5b приведены результаты сканирования образца, прижатого с помощью вакуумного фиксатора. При этом наблюдается аналогичное перераспределение потенциала в область действия фиксатора. Экстремум потенциала в этом случае составил 236 мВ при среднем значении потенциала

по поверхности на уровне от минус 1 до 1 мВ. Результаты экспериментальных исследований распределения электростатического потенциала через 4 ч после действия вакуумного фиксатора (рисунок 5с) показали растекание потенциала по поверхности от области действия вакуумного фиксатора, а значение экстремума значительно уменьшилось. Таким образом, наблюдаемый эффект хорошо согласуется с уменьшением со временем остаточных напряжений в материале и описывает релаксационные процессы. Следует отметить, что равномерность распределения электростатического потенциала полностью восстанавливалась (к состоянию, приведённому на рисунке 5а) через 14 ч.

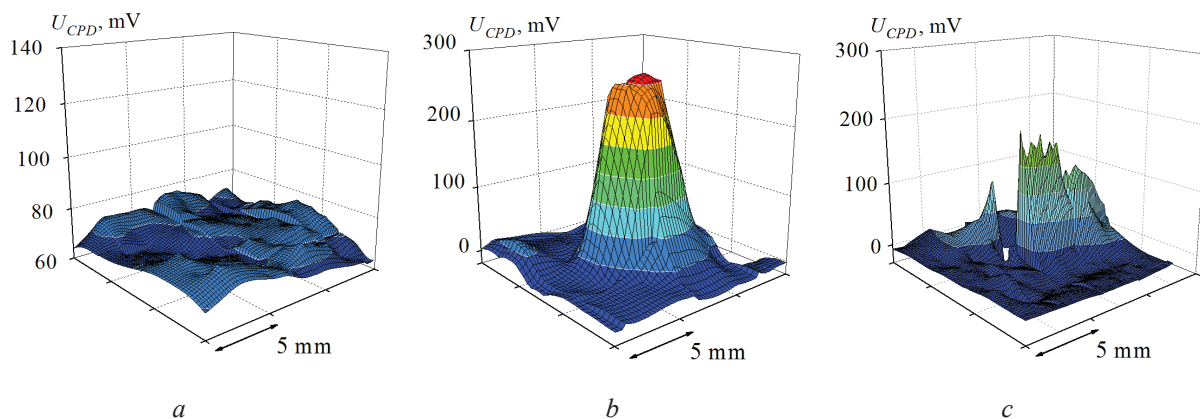


Рисунок 5 – Карты распределения поверхностного электростатического потенциала образца полиэтилена высокого давления: а – исходном состоянии; b – механическое воздействие; c – через 4 ч после снятия нагрузки

Figure 5 – Distribution maps of the surface electrostatic potential of a sample of low density polyethylene: a – without loading; b – loading; c – 4 h after unloading

Аналогичные исследования проведены на образцах полимерных композиционных материалов на основе ПЭВД (образцы предоставлены

Гродненским филиалом НИЦ ПР ИТМО НАН Беларуси). В таблице 2 приведены компонентный состав и условные обозначения образцов.

Таблица 2/Table 2

Компонентный состав и условное обозначение образцов
Component composition and designation of samples

Обозначение/ Designation	Состав/Composition
A1	ПЭВД, наполненный 6 мас. % углеволокном / LDPE filled with 6 wt. % carbon fiber
A2	ПЭВД, наполненный 6 мас. % углеродными нанотрубками диаметром 10–20 нм / LDPE filled with 6 wt. % carbon nanotubes 10–20 nm in diameter
A3	ПЭВД, наполненный 3 мас. % наночастицами диоксида кремния средним диаметром 25 нм / LDPE filled with 3 wt. % silicon dioxide nanoparticles with an average diameter of 25 nm

Результаты исследований образцов A2 (рисунок 6b) и A3 (рисунок 6c) также показали перераспределение электростатического потенциала в области действия вакуумного фиксатора, однако с некоторыми специфическими особенностями: в случае образца A3 (рисунок 6c) область экстремума имеет не куполообразную форму, как ожидалось, а вытянутую в виде дорожки. Уровень относительных значений

поверхностного электростатического потенциала в области экстремума составил 252 ± 5 мВ, что близко к результатам, полученным на матричном ПЭВД. В случае образца A1 (рисунок 6a) распределение потенциала однородно по всей поверхности, включая область фиксации. Полученный результат позволяет сделать вывод об армирующем влиянии углеродного волокна и снижении внутренних механических напряжений.

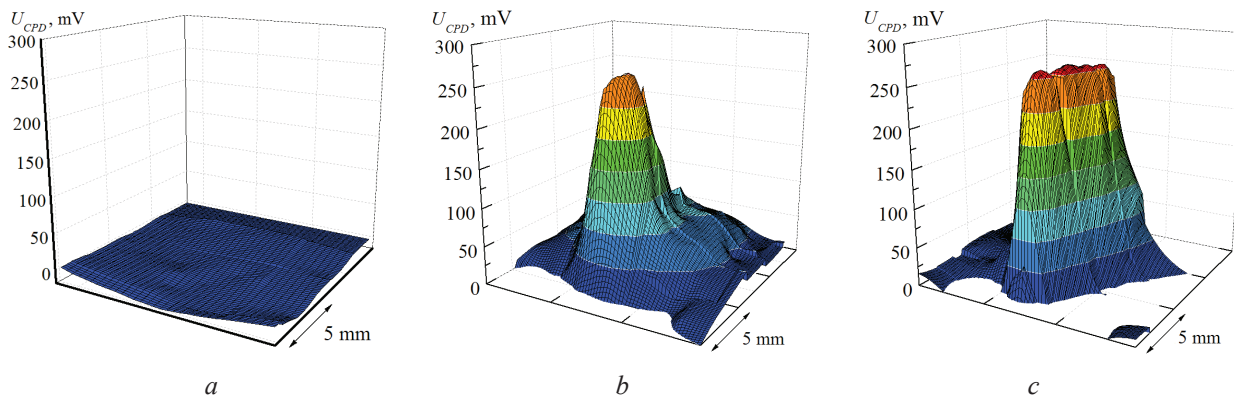


Рисунок 6 – Карты распределения поверхностного потенциала образцов полимерных композиционных материалов на основе полиэтилена высокого давления, наполненного углеродным волокном (a), углеродными нанотрубками (b), частицами диоксида кремния (c)

Figure 6 – Distribution maps of the surface potential of a samples of polymer composite materials based on high-pressure polyethylene filled with carbon fiber (a), carbon nanotubes (b) and silicon dioxide particles (c)

На примере образца фторопласт-4 проведены исследования распределения электростатического потенциала (рисунок 7), характеризующие переход от упругой к упруго-пластической деформации и к состоянию

полной пластичности. Образец изготавливали в форме лопатки из листового материала толщиной 0,5 мм, ширина в узкой области составляла 1 см. Растяжение осуществлялось с помощью макетного устройства, работающего

по следующему принципу. Образец закрепляется на подвижном столике с помощью зажимов, нагрузка на образец задаётся нагружающим винтом через приводной механизм. Шаг нагружения в 1 кгс контролировали тензомет-

рическим датчиком. После каждого шага нагружения проводили сканирование распределения поверхностного электростатического потенциала не изымая образец из нагружающего устройства.

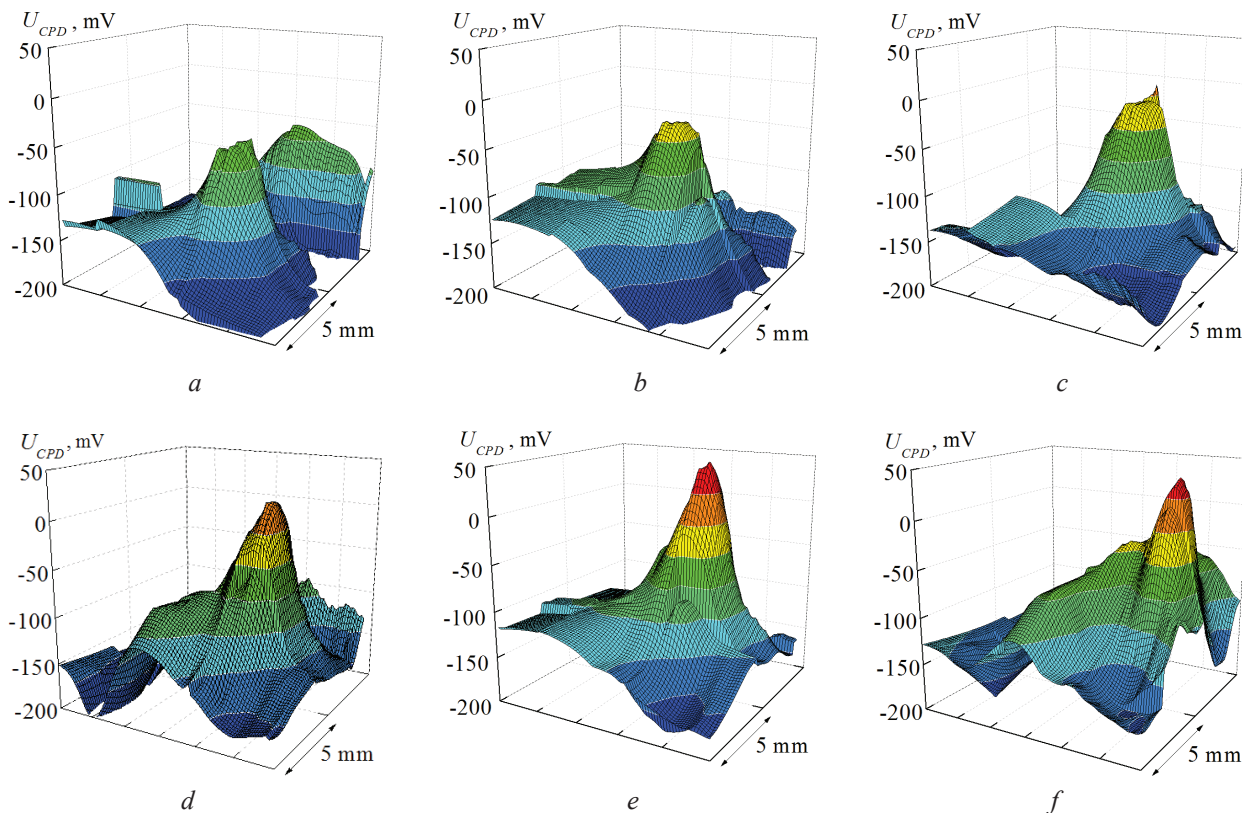


Рисунок 7 – Карты распределения поверхностного потенциала образца фторопласт-4 при растяжении нагрузкой: *a* – 0,1 кгс; *b* – 1 кгс; *c* – 2 кгс; *d* – 3 кгс; *e* – 4 кгс; *f* – 5 кгс

Figure 7 – Maps of the distribution of the surface potential of a sample polytetrafluoroethylene thick in tension: *a* – 0.1 kgf; *b* – 1 kgf; *c* – 2 kgf; *d* – 3 kgf; *e* – 4 kgf; *f* – 5 kgf

Из результатов исследований видно, что область с возрастающим относительным значением электростатического потенциала формируется при минимально возможной нагрузке в 0,1 кгс, созданной при натяжении образца в процессе его фиксации. Данная область характеризует возникающие напряжения и формирование деформационных центров в объёме материала. Последующее нагружение приводит к увеличению, как численного значения, так и площади с повышенным значением поверхностного электростатического потенциала. При натяжении образца нагрузкой около 4 кгс увеличение относительного значения поверхностного электростатического потенциала прекращается, т.е. достигается некоторое насыщение, при этом увеличение

в относительные значения электростатического потенциала наблюдается в окрестности области деформирования (рисунок 7*f*), что в общем случае может характеризовать образование новых деформационных центров.

Заключение

Экспериментальные исследования поля деформации по неоднородности распределения работы выхода электрона поверхности алюминиевого сплава АМг2 после статического нагружения через жёсткий сферический индентор показали, что в области упругих деформаций наблюдается незначительное увеличение относительных значений работы выхода электрона и последующее увеличение

градиента распределения в поле преобладания пластической составляющей деформации. В случае ударного нагружения образца стали 08Пс, результаты исследований сопоставимы с результатами, полученными при статическом нагружении алюминиевого сплава АМг2. Однако дополнительные исследования, проведённые через 24 ч после деформирования, показали частичное выравнивание градиента распределения работы выхода электрона в области действия деформации, что характеризует уменьшение внутренних механических напряжений в области деформирования.

Результаты экспериментальных исследований на матричных полимерных и композиционных материалах также показали, что поверхностный электростатический потенциал может характеризовать механические воздействия на поверхность полимера как в упругой, так и в пластической области. При этом отклик электростатического потенциала регистрируется даже при незначительных механических воздействиях.

Таким образом, результаты экспериментальных исследований материалов в напряжённо-деформированном состоянии по параметрам распределения работы выхода электрона металла и поверхностного электростатического потенциала диэлектрика демонстрируют эффективность зарядочувствительных методов для исследования деформационных процессов. Полученные результаты могут служить базой для разработки новых методов и методик исследования механических свойств как металлов, так и диэлектрических материалов.

References

1. Di C., Blundo E., Pettinari G., Felici M., Bobba F., Polimeni A. Mechanical, Elastic, and Adhesive Properties of Two-Dimensional Materials: From Straining Techniques to State-of-the-Art Local Probe Measurements. *Adv. Mater. Interfaces*, 2022, vol. 9, no. 13, p. 2102220. DOI: 10.1002/admi.202102220
2. Lianhui Li, Wenhong Liu, Fugang Qi, Di Wu, Zhiqiang Zhang. Effects of deformation twins on microstructure evolution, mechanical properties and corrosion behaviors in magnesium alloys. A review. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2022, vol. 10, iss. 9, pp. 2334–2353. DOI: 10.1016/j.jma.2022.09.003
3. Ponomarenko A.T., Tameev A.R., Shevchenko V.G. Action of Mechanical Forces on Polymerization and Polymers. *Polymers*, 2022, vol. 14, no. 3, p. 604. DOI: 10.3390/polym14030604
4. Wang Y., Meng Z. Mechanical and viscoelastic properties of wrinkled graphene reinforced polymer nanocomposites – Effect of interlayer sliding within graphene sheets. *Carbon*, 2021, vol. 177, pp. 128–137. DOI: 10.1016/j.carbon.2021.02.071
5. Pratasenia T.A., Kren' A.P., Dyakova H.N. Application of the Dynamic Indentation Method for Evaluation of the Hardness and Elastic Modulus of the Material of Products Obtained by Extrusion Method of Additive Production from Carbon-Filled Composite Materials. *Mechanics of Composite Materials*, 2022, vol. 58, no. 3, pp. 383–394. DOI: 10.1007/s11029-022-10036-z
6. Sujith R., Jothi S., Zimmermann A., Aldinger F., Kumar R. Mechanical behaviour of polymer derived ceramics – a review. *International Materials Reviews*, 2021, vol. 66, no. 6, pp. 426–449. DOI: 10.1080/09506608.2020.1784616
7. Zharin A.L. *Metod kontaktnoj raznosti potentsialov i yego primeneniye v tribologii* [Method of contact potential difference and its application in tribology. Minsk, Bestprint Publ., 1996, 235 p.
8. Lang N.D., Kohn W. Theory of Metal Surfaces: Work Function. *Phys. Rev. B*, 1971, vol. 3, no. 4, p. 1215. DOI: 10.1103/PhysRevB.3.1215
9. Pantišaleyeu K., Zharin A., Opielak M., Rogalski P. Charge sensitive techniques in tribology studies. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2016, vol. 92, no. 11, pp. 239–243.
10. Craig P.P. Direct observation of stress – induced shifts in contact potentials. *Phys. Rev. Letters*, 1969, vol. 22, no. 14, pp. 700–703.
11. Thiago A.L. Burgo. Chemical Electrostatics. New Ideas on Electrostatic Charging: Mechanisms and Consequences. *Springer*, 2017, 237 p.
12. Galebeck F., Burgo T. Chemical Electrostatics: New Ideas on Electrostatic Charging: Mechanisms and Consequences. *Springer*, 2017, 248 p.
13. Davies D.K. Charge generation on dielectric surfaces. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1969, vol. 2, no. 11, pp. 1533–1537. DOI: 10.1088/0022-3727/2/11/307.
14. Pilipenko V.A., Solodukha V.A., Zharin A., Gusev O., Vorobey R., Pantišaleyeu K., Tyavlovsky A., Tyavlovsky K., Bondariev V.A. Influence of rapid thermal treatment of initial silicon wafers on the electrophysical properties of silicon dioxide obtained by pyrogenous oxidation. *High Temperature Material Processes: An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes*, 2019, vol. 23, iss. 3, pp. 283–290. DOI: 10.1615/HighTempMatProc.2019031122

15. Pantsialeveu K., Zharin A., Gusev O., Vorobey R., Tyavlovsky A., Tyavlovsky K., Svistun A. Digital contact potential probe in studying the deformation of dielectric materials. *Informatics, Control, Measurement in Economy and Environmental Protection*, 2020, vol. 4, no. 10, pp. 57–60.

DOI: 10.35784/iapgos.2374

16. Broadhurst M.G., Malmberg C.G., Mopsik F.I., Harris W.P. Piezo- and pyro-electricity in polymer electrets. Conference on Electrical Insulation & Dielectric Phenomena. Annual Report, 1972.

DOI: 10.1109/ceidp.1972.7734193

17. Sow M., Lacks D.J., Mohan Sankaran R. Dependence of contact electrification on the magnitude of strain in polymeric materials. *Journal of Applied Physics*, 2012, vol. 112, no. 8, p. 084909. **DOI:** 10.1063/1.4761967

18. Subrahmanyam A., Kumar S. The Kelvin Probe for Surface Engineering: Fundamentals and Design. USA, CRC Press 2, 2010, 200 p.

19. Zharin A., Pantsialeveu K., Svistun A., Tyavlovsky K. Determining the lifetime of minority charge carriers and iron impurity concentration in semiconductor structures with submicron layers. *Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering*, 2020, vol. 2, iss. 4, Article 3, pp. 17–21.