

УДК 544.653.2, 678.073

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ ТАНТАЛОВЫХ НАНОСТРУКТУР В ПОРИСТЫХ МАТРИЦАХ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ ПОЛИМЕРАМИ**

**Горох Г.Г.<sup>1</sup>, Тураходжаев Н.Д.<sup>2</sup>, Лозовенко А.А.<sup>1</sup>, Федосенко В.С.<sup>1</sup>, Худойкулов Ш.У.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Минск, Республика Беларусь*

<sup>2</sup>*Ташкентский государственный технический университет им. И.Каримова  
Ташкент, Узбекистан*

**Аннотация.** Разработаны методики формирования столбиковых танталовых наноструктур в пористых матрицах анодного оксида алюминия, модифицированных полимерными пленками поливинилиденфторида. Представлены результаты исследований трибологических характеристик методами наноиндентирования и скретч-тестирования поверхностного слоя полученных материалов. Наноструктурированные композитные пленки использованы при создании исполнительного элемента типа «микросдвиг».

**Ключевые слова:** нанокompозит, пористые матрицы, полимерные пленки, трибопреобразователь

**INTELLIGENT MATERIALS FOR CONVERTING DIFFERENT TYPES OF ENERGY BASED ON TANTALUM NANOSTRUCTURES IN POROUS MATRIXES MODIFIED WITH FUNCTIONAL POLYMERS**

**Gorokh G.<sup>1</sup>, Turakhodjaev N.<sup>2</sup>, Lazavenka A.<sup>1</sup>, Fedosenko V.<sup>1</sup>, Khydaykulov Sh.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics  
Minsk, Republic of Belarus*

<sup>2</sup>*Tashkent State Technical University named after Islam Karimov  
Tashkent, Uzbekistan*

**Abstract.** Methods for the formation of columnar tantalum nanostructures in porous matrices of anodic alumina modified with polyvinylidene fluoride polymer films have been developed. The results of studies of tribological characteristics by nanoindentation and scratch testing of the surface layer of the obtained materials are presented. Nanostructured composite films were used to create an actuating element of the microshear type.

**Key words:** nanocomposite, porous matrices, polymer films, triboconverter.

*Адрес для переписки: Горох Г.Г., ул. П.Бровки, 6, Минск 220013, Республика Беларусь  
e-mail: gorokh@bsuir.by*

Одним из путей повышения эксплуатационных характеристик микроэлектромеханических преобразователей сенсорного и актуаторного типа является разработка новых функциональных и интеллектуальных материалов, с использованием основы (подложки), структурированной на наномасштабном уровне. Это открывает перспективы управления физико-механическими свойствами материалов путем создания упорядоченных микро- и наномасштабных поверхностных и объемных кластеров.

В настоящей работе предложен оригинальный подход создания интеллектуальных материалов для исполнительных элементов (актуаторов) систем управления нанообъектами на основе наноструктурированных пленок, представляющих собой пористые диэлектрические матрицы, поры которых заполнены танталовыми столбиками и покрытые сверху металлосодержащим полимером [1]. Такие материалы способны реагировать на изменения окружающей среды, информировать о том, в каком состоянии находится объект, каковы предельно допустимые деформации, в зависимости от условий эксплуатации менять пространственное расположение объекта.

В качестве матриц для нанесения функциональных покрытий использовали анодированные в 0,4 М растворе винной кислоты при  $j = 6 \text{ mA/cm}^2$  тонкопленочные системы Ta/Al. Электрохимическое анодирование образцов осуществляли в две стадии в гальваностатическом режиме. Напряжения стационарного роста пор составляло 210 В, напряжение реанодирования 410 В. В результате в порах сформировались металлоксидные столбики Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Верхняя часть матрицы АОА, незаполненная столбиками, была удалена в селективном травителе. В результате была сформирована планарная композитная система из пористой матрицы АОА, поры которой заполнены наноструктурами Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, частично выходящими из матрицы. Толщина всей структуры составляла около 900 нм (см. рис. 1, а).

В качестве импрегнирующего наполнителя использовали пленки поливинилиденфторида (ПВДФ), нанесенные методом ПХО на поверхность подготовленной структуры. Процесс формирования полимерного покрытия проводили при давлении остаточного газа в камере 8 Па; напуск газовой смеси осуществляли при давлении 90 Па; для создания плазмы использовали СВЧ-разряд 5,47 МГц. За 12 минут на поверхности выросла

пленка полимерная пленка толщиной 1,5 мкм. На рис. 1,б представлено изображение поверхности металлполимерного покрытия на матрице АОА/ $\text{Ta}_2\text{O}_5$ .

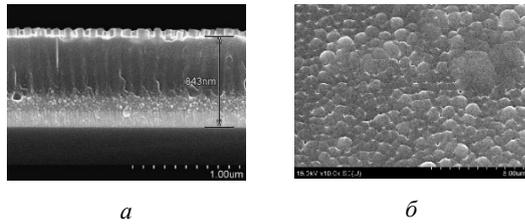


Рисунок 1 – СЭМ изображения скола матрицы АОА со столбиками  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  и поверхность структуры после нанесения ПВДФ

Трибологические и механические свойства полимерсодержащих анодных оксидных композитных пленок проводили с использованием Nano Scratch Tester (NST) и Ultra Nano Hardness Tester (UNHT) CSM Instruments. Скретч-тестером путем линейного царапания кантилевером ST-322 с алмазным наконечником радиусом 2 мкм, двигающимся вдоль поверхности структуры со скоростью 0,01 мм/с, при возрастающей нагрузке на конце кантилевера от 0,1 до 50 мН со скоростью 1 мН/с проводили измерения силы трения, коэффициента трения, устойчивости поверхности, глубины проникновения кантилевера относительно исходной толщины пленки от нагрузки.

Полученные зависимости силы трения, коэффициента трения и глубины проникновения кантилевера от приложенной нагрузки приведены на рис. 2.

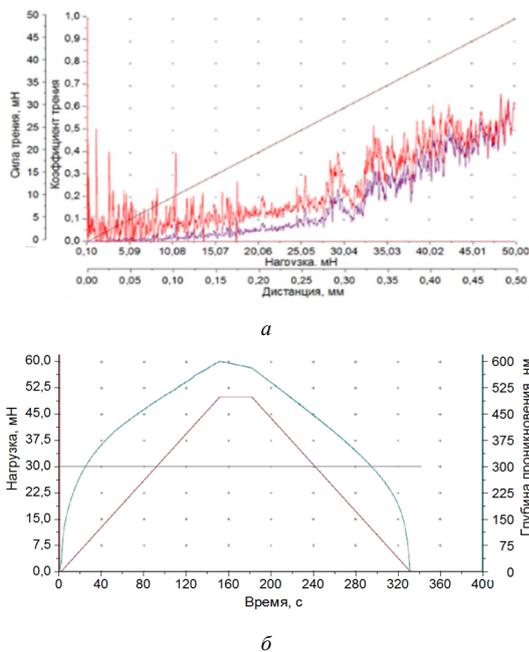


Рисунок 2 – Зависимости силы трения, коэффициента трения (а) и глубины проникновения кантилевера (б) от приложенной нагрузки

Результаты исследований показали высокую механическую прочность композитных матрично-столбиковых анодных оксидных пленок: при максимальной нагрузке 50 мН глубина проникновения алмазной иглы диаметром 2 мкм не превысила 20 % от 1,5 мкм пленки после первого прохода и 50 % после шестого прохода. Показана нелинейная зависимость силы трения, коэффициента трения, глубины проникновения кантилевера от прикладываемой нагрузки, при этом коэффициент трения слабо изменяется при нагрузках до 20 мН.

Наноиндентирование осуществлялось с применением трехгранных алмазных инденторов Берковича. Опыты проводились при максимальных нагрузках  $P_{max}$  – 10, 30 и 50 мН. Процедура заключалась в нагружении индентора до  $P_{max}$  со скоростью 20 мН/мин и выдержке в течение 30 с и последующей разгрузке. Для каждого значения  $P_{max}$  для исследуемого образца выполнялось по 5 уколов для определения среднего значения микротвердости и модуля упругости. Анализ диаграмм наноиндентирования проводили по методике Оливера-Фарра. Данные по средним значениям микротвердости и модуля упругости представлены в табл. 1.

Таблица 1. Микротвердость ( $H$ ) и модуль упругости ( $E_p$ )

$P_{max}$	Глубина, $h$	$H$ , МПа	$E_p$ , ГПа
50 мН	610 нм	7056,2	93,5
30 мН	460 нм	4983,2	84,9
10 мН	330 нм	4630,7	87,0

Из приведенных данных видно, что средние значения модуля упругости и микротвердости практически не менялись при нагрузках 10 и 30 мН, но при нагрузке 50 мН значительно выросло.

На основе созданных композитных пленок был создан пьезопреобразователь, как исполнительный элемент типа «микродвиг», представляющий собой кремниевую подложку с двойной диэлектрической мембраной, на которой была сформирована каркасная матрица с пьезоэлектрическим слоем и системой управления в виде встречно-штыревых электродов. В результате был получен исполнительный элемент на основе пьезокомпозита, обладающего структурой со связностью 1–3. В конструкции пьезопреобразователя, содержащей множество электродов и чередующихся слоев «электрод – ПВДФ – электрод», слои пьезоэлектрика электрически соединяются в параллельную цепь, а механически – в последовательную. Это позволяет увеличить действующую силу и снизить напряжение, подаваемое на электроды. Достоинствами таких актуаторов является низкий уровень электромагнитных помех, высокая плотность энергии и возможность управления при помощи напряжения, что позволит

реализовать совместное решение измерительных и исполнительных задач в подобных системах.

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского фонда фундаментальных исследований (договор № Ф21УЗБГ-003).

УДК 617.57-77+674

## ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЛЕСОМАТЕРИАЛОВ В ПРОТЕЗОСТРОЕНИИ

Грузд Н.А., Филонова М.И.

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

**Аннотация.** С появлением новых средств и способов обработки лесоматериалов, значительно упростился процесс получения сложных геометрических форм и размеров, что обеспечивает возможность внедрения деталей из древесины в конструкции современных бионических протезов.

**Ключевые слова:** лесоматериалы, протезостроение, бионические протезы.

## POSSIBILITIES OF APPLICATION OF WOOD MATERIALS IN PROSTHESIS

Gruzd N., Filonova M.

*Belarusian National Technical University  
Minsk, Republic of Belarus*

**Annotation.** With the advent of new means and methods of processing timber, the process of obtaining complex geometric shapes and sizes has been greatly simplified, which makes it possible to introduce wood parts into the designs of modern bionic prostheses.

**Key words:** timber, prosthetics, bionic prostheses.

*Адрес для переписки: Филонова М.И., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь  
e-mail: filonovami@bntu.by*

Развитие технологий послойного наращивания и синтеза изделий из пластмасс во многом способствовало популяризации полимеров в качестве основного материала корпусных деталей бионических и тяговых протезов. Приемлемая себестоимость и отсутствие необходимости в дальнейшей обработке изделия являются решающими факторами при выборе 3D-печати, вместе с тем низкая производительность аддитивного производства наряду с отрицательными свойствами пластмасс заставляет задуматься о рентабельности существующих решений.

Пластмассы обладают относительной легкостью, устойчивостью к механическим и химическим воздействиям. К неоспоримым преимуществам пластмасс также следует отнести низкую теплопроводность и водопоглощение. Несмотря на это, все больше всемирно известных брендов и производителей отдают предпочтение деревообрабатывающей и целлюлозно-бумажной промышленности. Мероприятия по урегулированию производства пластиковой продукции направлены прежде всего на минимизацию негативного влияния токсичных химических веществ, выделяемых из фрагментированного пластика, на естественные экосистемы и здоровье человека в частности [1].

Древнейший известный протез, обнаруженный в фиванском некрополе на западном берегу Нила, представлял собой большой палец ноги, из-

## Литература

1. Полимерсодержащие нанокompозитные покрытия для изделий машиностроения / Г. Г. Горох [и др.] // Труды междунар. научн.-технич. конфер. «Машиностроение и техносфера XXI века». – 2020. – Р. 45–49.

готовленный из древесины [2]. Образец дотирован 950–710 гг. до нашей эры, тем не менее, найдшийся в составе мумии, сохранился до наших дней практически в первозданном виде.

Известны и другие задокументированные прототипы деревянных протезов конечностей, пользовавшиеся популярностью вплоть до распространения бронзовых, а затем и пластмассовых моделей. В первую очередь, выбор материала определялся развитием технической составляющей устройств, функциональность которых в последующем уже не ограничивалась сугубо косметическим назначением. Металлические элементы конструкции протеза отвечали требованиям прочности, в то время как корпусные детали дешевле и удобнее оказалось изготавливать из синтетических полимеров.

С появлением новых средств и способов обработки лесоматериалов, значительно упростился процесс получения сложных геометрических форм и размеров, что обеспечивает возможность внедрения деталей из древесины в конструкции современных бионических протезов.

Древесина состоит из органических полимеров (лигнин) с длинными цепными молекулами. Изучение механических свойств полимеров осуществляется в соответствии с общими законами деформирования материалов под нагрузкой с учетом времени действия.