

УДК 544.653.2, 678.073

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ
ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ ПЛЕНКАМИ ПОРИСТЫХ МАТРИЦ**

Горох Г.Г.¹, Тураходжаев Н.Д.², Худойкулов Ш.У.², Федосенко В.С.¹, Таратын И.А.³

¹*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Республика Беларусь*

²*Ташкентский Государственный Технический Университет, Ташкент, Узбекистан*

³*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Разработаны методики формирования интеллектуальных материалов на основе пористых матриц анодного оксида алюминия, модифицированных полимерными пленками поливинилденфторида. Представлены результаты комплексных исследований механических и трибологических характеристик сформированных пленок разными физическими методами.

Ключевые слова: наноккомпозит, пористые матрицы, полимерные пленки, трибопреобразователь.

**INTELLIGENT MATERIALS BASED ON POROUS MATRIXES MODIFIED
BY FUNCTIONAL FILMS**

Gorokh G.G.¹, Turakhodjaev N.D.², Khydaykulov Sh.U.², Fedosenko V.S.¹, Taratyn I.A.³

¹*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus*

²*Tashkent State Technical University
Tashkent, Uzbekistan*

³*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. Methods for the formation of smart materials based on porous matrices of anodic aluminum oxide modified with polymer films of polyvinylidene fluoride have been developed. The results of complex studies of the mechanical and tribological characteristics of the films formed using various physical methods are presented.

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

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

В основе исследования лежит идея создания интеллектуальных материалов путем синергетического использования упорядоченных нанопористых матриц и функциональных материалов в виде полимеров и пьезоэлектриков, способных к регистрации и трансформации физических воздействий. Реализация этой идеи связана с поиском конкретных соединений и способов их введения в нанопоры для получения интеллектуальных композитов, обладающих термо-, опто-, тензо- и другими видами чувствительности. Ранее проведенные исследования [1] показали зависимость модуля Юнга, коэффициента теплопроводности и других физико-механических характеристик нанопористого анодного оксида алюминия (АОА) от его объемной пористости. Использование указанного наноструктурированного материала в качестве связующего звена между монолитной (например, алюминиевой) подложкой и осаждаемым на него функциональным материалом (полимером, полупроводником и т. д.) обеспечит решение нескольких проблем. За счет уменьшения градиента коэффициентов термического расширения подложки и функционального слоя снижается концентрация межфазных термомеханических напряжений и вероятность адгезионного разрушения.

В качестве образцов использовали алюминиевую фольгу (99,99 %) толщиной 100 мкм и размером 20×40 мм, на которой формировали методом двухстадийного анодирования в 0,4 М растворе винной кислоты слой АОА толщиной 1,5 мкм. Процесс анодирования проводили в гальваностатическом режиме, плотность тока анодирования составляла $j = 6 \text{ мА/см}^2$. Напряжения стационарного роста пор составило 210 В. В качестве наполнителя использовали раствор поливинилденфторида (ПВДФ) марки Ф2М Д в диметилформамиде в пропорции 1:3. Раствор наносили на матрицу дозатором с объемом капли 0,1 мл от одной до пяти капель. После центрифугирования при $v \approx 3000 \text{ об/мин}$ в течение 20 сек. образцы подвергали многостадийной сушке и термообработке. На рисунке 1 представлены СЭМ изображения сечения матрицы АОА с пленкой ПВДФ объемом 0,1 мл (рисунок 1, а) и 0,5 мл (рисунок 1, б). При нанесении 0,1 мл раствора центрифугованием при $v \approx 3000 \text{ об/мин}$ в течение 20 с образуется тонкая равномерная пленка ПВДФ толщиной порядка 180–450 нм, заполняющая поры АОА. При нанесении раствора объемом 0,5 мл на поверхности АОА формируется пленкой ПВДФ толщиной около

2 мкм, наблюдается вытягивание полимера над порами. Поры заполнены равномерно.

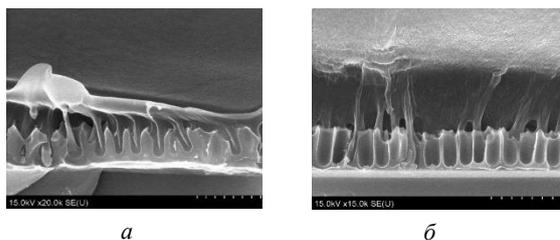


Рисунок 1 – СЭМ изображения матриц АОА с пленкой ПВДФ объемом 0,1 мл (а) и 0,5 мл (б)

Морфологию поверхности образцов, шероховатость Ra и силу адгезии Fa образцов исследовали на атомно-силовом микроскопе *Dimension FastScan (Bruker, США)* в режиме *PeakForce QNM (Quantitative Nanoscale Mechanical Mapping)* с использованием стандартного кремниевого кантилевера типа *NSC-11* (производство *Mikromash, Эстония*) с радиусом закругления острия 10 нм, с жесткостью консоли 5,93 Н/м.

Коэффициент и силу трения исследовали в режиме *Contact Mode Lateral Force* с использованием стандартного кремниевого кантилевера типа *NSC-11* (производство *Mikromash, Эстония*) с начальным радиусом закругления острия 200 нм, с жесткостью консоли 5,93 Н/м. В процессе испытаний нормальная нагрузка на зонд составила 0,623 мкН, остальные параметры поддерживались постоянными: поле износа 1×1 мкм, 50 циклов при каждой нагрузке, 128×128 точек, скорость 1,99 мкм/с.

На рисунке 2, а представлены зависимости коэффициента трения покрытия ПВДФ на матрицах АОА для разной толщины покрытия (0,1 мл и 0,5 мл) при измерении кантилевером с радиусом закругления 200 нм и 10–80 нм.

В таблице 1 приведены средние значения рассчитанных из зависимостей силы и коэффициента трения для исследуемых пленок.

Исследование механических свойств пленок ПВДФ разного объема на пористых матрицах проводили методом наноиндентирования. Для получения зависимостей использовался наноиндентор модели *750 Ubi (Hysitron, США)* с наконечником Берковича с радиусом закругления 100 нм. На каждом образце было выполнено по 9 индентирований.

На рисунке 2, б показана зависимость сила адгезионного взаимодействия между наконечником зонда и поверхностью пленки ПВДФ на пористых матрицах АОА от приложенной нагрузки. Из приведенных зависимостей на рисунке 2, б можно заметить, что адгезия к матрице АОА выше у более толстой пленки ПВДФ. Результаты расчета приведенной удельной энергии исследуемых пленок ПВДФ на пористых матрицах к площади контакта показали, что более высокие значения удельной энергии у толстых пленок. Результаты определения модуля упругости и микротвердости исследуемых пленок приведены в таблице 2.

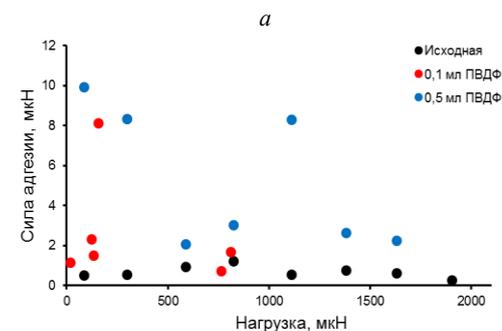
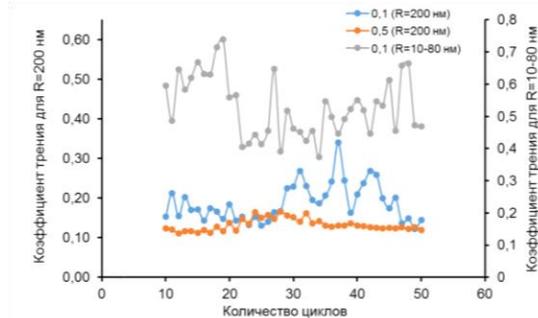


Рисунок 2 – Зависимости коэффициента силы трения покрытия ПВДФ на матрицах АОА (а) и зависимости силы адгезионного взаимодействия между наконечником зонда и поверхностью пленки ПВДФ на пористой матрице АОА от приложенной нагрузки (б)

Таблица 1. Средние значения силы и коэффициента трения

Образец	$k_{тр}$	$F_{тр}, \text{нН}$
0,1 мл ПВДФ (при $R = 200 \text{ нм}$)	$0,187 \pm 0,047$	$117,9 \pm 29,7$
0,5 мл ПВДФ (при $R = 200 \text{ нм}$)	$0,132 \pm 0,015$	$82,2 \pm 9,2$
0,1 мл ПВДФ (при $R = 10-80 \text{ нм}$)	$0,533 \pm 0,093$	$330,4 \pm 58,5$

Таблица 2. Средние значения модуля упругости и микротвердости матрицы АОА с пленкой ПВДФ

Образец	$E, \text{ГПа}$	$H, \text{ГПа}$
Исходная матрица АОА	$32,59 \pm 12,51$	$0,44 \pm 0,29$
АОА с 0,1 мл ПВДФ	$38,76 \pm 4,75$	$0,77 \pm 0,09$
АОА с 0,5 мл ПВДФ	$24,54 \pm 12,39$	$0,30 \pm 0,15$

Из приведенных данных видно, что средние значения модуля упругости и микротвердости возрастают на тонких пленках ПВДФ по сравнению и исходной матрицей АОА, и, наоборот, снижаются на толстых пленках ПВДФ.

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

Литература

1. Полимерсодержащие нанокompозитные покрытия для изделий машиностроения / Г.Г. Горох [и др.] // Труды международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века». – 2020. – Р. 45–49.