

В. С. Антонюк (м. Київ)

М. О. Бондаренко, Ю. Ю. Бондаренко (м. Черкаси)

Дослідження тонких зносостійких вуглецевих покриттів і структур, сформованих термічним випаровуванням у вакуумі на п'єзокерамічних матеріалах

Досліджено функціональні особливості отримання тонких зносостійких покриттів через вивчення умов їхнього формування термовакуумним осадженням на поверхнях п'єзокерамічних матеріалів. Виявлено вплив низькоенергетичного стрічкового електронного потоку на фізико-експлуатаційні характеристики поверхонь п'єзокерамічних елементів, що експлуатуються в умовах агресивних середовищ. Встановлено, що модифікація низькоенергетичним електронним потоком ($E \leq 6 \text{ кеВ}$) поверхонь п'єзоелементів з кераміки ЦТС-19 покращує мікрогеометрію цих поверхонь, сприяє формуванню на них вуглецевих структур, що підвищує на 8–12 % їхню мікротвердість.

Ключові слова: вуглецеві покриття, п'єзокерамічні матеріали, термічне випаровування у вакуумі.

ВСТУП

На сучасному етапі розвитку таких галузей науки та техніки, як точне приладобудування, медицина, гідроакустика, аерокосмічне та суднобудування набули популярності елементи з п'єзокерамічних матеріалів та датчики на їх основі [1], поширеність використання яких зумовлено високою точністю, надійністю, чутливістю та широким діапазоном вимірювань. Мініатюрність таких датчиків дозволяє використовувати їх в умовах високих тиску, температури, у вакуумі, в агресивних середовищах тощо [2].

В [3] встановлено, що в процесі експлуатації та при довготривалому зберіганні фізико-експлуатаційні характеристики таких п'єзоелементів значно погіршуються. Це пов'язано з утворенням і розвитком мікро- та нанодефектів (тріщин, пор, локальних відшаровувань покриття від матеріалу основи), а також з ерозією поверхонь п'єзоелементів від дії зовнішніх силових навантажень та вібрацій. Це, в свою чергу, призводить до зменшення добротності та амплітуди основного резонансу радіальних коливань, а також збільшення значення поверхневого опору п'єзоелемента.

Значного уповільнення процесу розвитку мікродефектів на поверхні п'єзокерамічних елементів можна досягти за рахунок створення на їх поверхнях тонких функціональних покриттів. Перспективним методом формування таких покриттів є метод термічного випаровування у вакуумі [4]. Такі тонкі покриття широко використовують у мікроелектроніці, електронно-обчислювальній та криогенній техніці, оптиці та оптоелектроніці, у космічній та атомній промисловості [5]. Серед перспективних покриттів, застосування яких може усунути вищезазначені недоліки, слід виокремити вуглецеві покриття (ВП) та структури на їх основі, такі, наприклад, як метастабільні

вуглецеві покриття, що за властивостями (твердістю, густиною, хімічною стійкістю, оптичними та електричними) близькі до алмазу, проте за структурою відрізняються від алмазної. Вуглецеві покриття використовують для утворення принципово нових активних елементів на основі п'єзокерамічних матеріалів для мікроелектроніки та оптоелектроніки в якості зносостійких, маскуючих, пасивуючих покриттів тощо [6].

Більшість областей практичного застосування таких покриттів оснований на їх специфічних властивостях, які істотно відрізняються від характеристик тих же матеріалів у звичайному (масивному) стані. Це створює можливість значно покращити фізико-експлуатаційні характеристики п'єзокерамічних матеріалів та датчиків на їх основі. Проте особливості фазових та структурних станів речовини в тонких плівках створюють великі технологічні та експлуатаційні труднощі, що пов'язані з нестабільністю властивостей в процесі експлуатації, недостатньою їх відтворністю, підвищенням браку виробу тощо [5].

Вивчення початкових стадій зародження покриття є обов'язковим етапом дослідження всієї проблеми, але не є достатнім для визначення структури та властивостей суцільних, порівняно товстих плівок, оскільки кінцеві структури можуть суттєво відрізнитися від вихідних, особливо за досконалістю кристалічної будови [7]. Це питання, окрім прикладного значення, має і загальний інтерес як у зв'язку із специфікою самого п'єзокерамічного матеріалу, так і з особливостями формування ВП [6].

Також важливо з'ясувати причини появи унікальних властивостей конденсованих покриттів, яким чином ці властивості пов'язані з особливостями структури і субструктури покриттів, а також визначити їх вплив на фізико-експлуатаційні властивості п'єзокерамічного матеріалу, на який осаджується таке покриття. Актуальною залишається й проблема зв'язку між структурою ВП і функціональними особливостями самих п'єзокерамічних матеріалів.

Як показано в [8], найперспективнішими серед неруйнуючих методів вивчення структури та процесів росту тонких покриттів є методи електронної та атомно-силової мікроскопії, що мають високу (до 1 нм) точність, чутливість ($\sim 10^{-12}$ Н) та продуктивність.

Тому перспективними і актуальними є проблеми отримання на п'єзокерамічних функціональних матеріалах термічним осадженням у вакуумі тонких (до 5 нм) зносостійких вуглецевих покриттів та структур на їх основі, а також вивчення умов формування таких структур.

Метою роботи є отримання та дослідження тонких зносостійких покриттів та структур на п'єзокерамічних матеріалах шляхом вивчення умов їх формування термічним випаровуванням у вакуумі.

Проведені в [9] дослідження показали можливість формування тонких (до 50 нм) покриттів (у тому числі, вуглецевих) з впорядкованою структурою, сформованою на поверхні діелектрика (оптичного скла К8) при використанні технології термовакуумного осадження. Подальша оптимізація режимів цієї технології дозволила значно удосконалити процес формування і підвищити міру впорядкованості отримуваних структур.

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТА

В основі розробленої технології отримання тонких зносостійких структур лежить процес пошарового формування на основі з діелектрика (п'єзоелектрична кераміка ЦТС-19) бінарних покриттів Cu-C, Cu-C-Cu-C в процесі їхнього термічного осадження у вакуумі порядку $(5-6) \cdot 10^{-3}$ Па. Попередні

дослідження, проведені в [10], показали, що такі бінарні покриття мають високу міцність, зносостійкість, а вуглецеві формоутворення на таких покриттях мають впорядковану структуру.

Для проведення експерименту використовувалися дві групи зразків:

– 1 група – зразки з двошаровим покриттям на основі з ЦТС-19 за схемою $85\text{Cu}-15\text{C}^*$;

– 2 група – зразки з чотирьохшаровим покриттям на основі з ЦТС-19 за схемою $55\text{Cu}^{\text{I}}-15\text{C}^{\text{I}}-15\text{Cu}^{\text{II}}-15\text{C}^{\text{II}}$ **.

Вихідною речовиною для отримання ВП на зразках був прокалібрований за розмірами частинок порошок Cu (“хч”, дисперсність – 2,6–3,0 мкм) та C (графіт, “хч”, дисперсність – 0,8–1,2 мкм). Виробник порошку – ТОВ “Порошкові нанотехнології” (м. Черкаси).

Попередньо порошок зважували на електронних вагах ВЛА-200г-М. Кожен з порошоків з обраного матеріалу завантажували у дві ванночки, які розташовували у спеціальному вольфрамовому випарнику, температура якого підтримували на рівні 2300–2800 К.

Зразки отримані методом дискретного термічного випаровування у вакуумі в навчально-науковому Центрі “Мікронанотехнології та обладнання” Черкаського державного технологічного університету на модифікованій технологічній вакуумній установці УВН-71 за режимами [10]: сила струму випаровування для міді $I_{\text{Cu}} = 45-60$ А, для вуглецю – $I_{\text{C}} = 140-155$ А; час осадження у вакуумі для міді $t_{\text{Cu}} = 90-110$ с, для вуглецю – $t_{\text{C}} = 280-330$ с; маса наважок для міді $m_{\text{Cu}} = 40$ мг, для вуглецю – $m_{\text{C}} = 18$ мг.

Товщину отримуваних покриттів вимірювали двома методами: в процесі осадження – методом кварцового резонатора, що дозволило підібрати необхідну швидкість осадження ($\sim 0,1-1$ нм/с); отримане покриття – методом оптичної інтерферометрії Лінніка на приладі МІІ-4. Товщина отриманого покриття становила для зразків 1 групи – 95–110 (Cu) та 15–20 (C) нм; для зразків 2 групи – 65–75 (Cu^{I}), 25–30 (C^{I}), 25–30 (Cu^{II}), 25–30 (C^{II}) нм.

Дослідження зовнішнього вигляду зразків та елементного складу покриттів проводили на растровому електронному мікроскопі ULTRA-55 фірми “Карл Цейсс” (Німеччина), а нанорельєфу та мікротвердості отриманих покриттів – на атомно-силовому мікроскопі NT-206 (ТДВ “Микротестмашины”, Білорусь). Вимірювання мікрорельєфу поверхні зразків проводили в статичному режимі на ділянках поверхні максимальним розміром 13×13 мкм згідно з розробленими методиками та рекомендаціями [11].

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТУ

В результаті експериментів проводили всебічні дослідження мікрорельєфу, елементного складу та фізико-експлуатаційних властивостей зразків з п’єзокерамічного матеріалу зі сформованими на них ВП.

Дослідження мікрорельєфу сформованих зносостійких покриттів на п’єзоелектричній кераміці

Утворення зародків та однорідного суцільного покриття полікристалічної або аморфної структури контролювали методом атомно-силової мікроскопії та растрової мікроскопії.

* Тут і надалі в тексті склад елементів приведено в % (за масою).

** Індекс I – нижній шар, II – верхній шар покриття.

Отримані експериментальні результати дозволили з'ясувати наступне – критична температура зразка (тобто така температура, вище за яку відбуваються необоротні структурні перетворення в покритті), на якому формувалося покриття, складає 780 К (рис. 1).

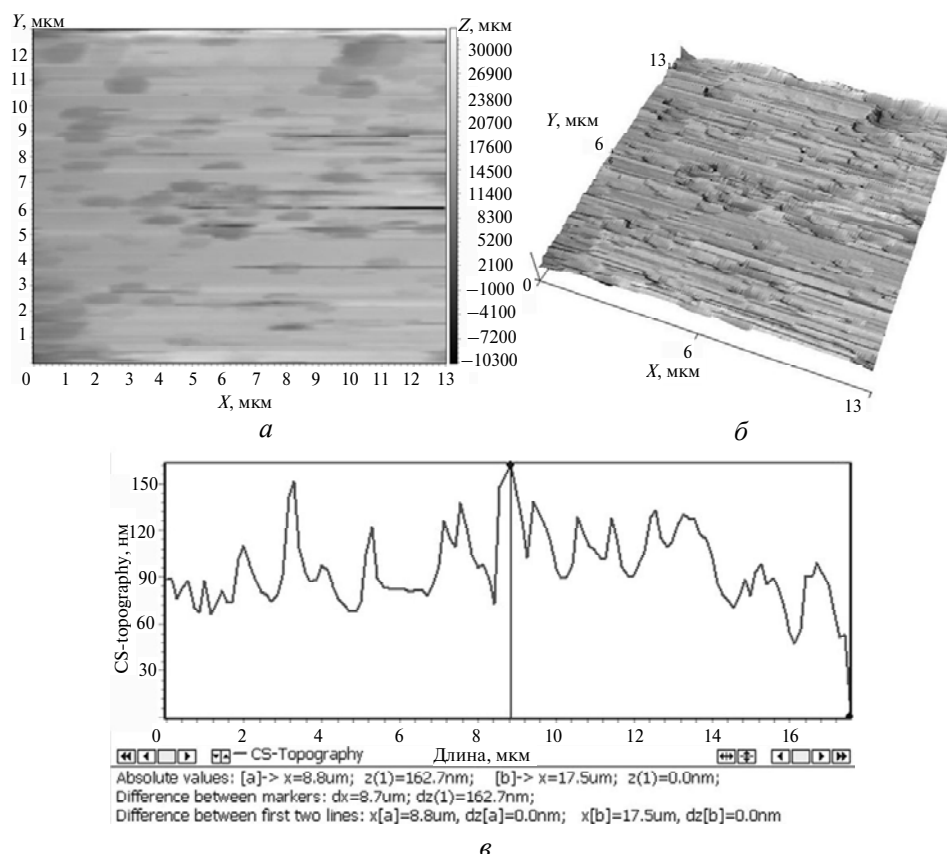


Рис. 1. Зовнішній вигляд (а), мікрорельєф ділянки поверхні ВП (б) та мікропрофіль шару ВП-п'єзокерамічний матеріал (в); атомно-силовий мікроскоп NT-206 V.

Як видно на рис. 1, утворене за умов дотримання критичної температури бінарне покриття Cu-C на п'єзокерамічній основі є розвиненим (відношення фактичної площі покриття до площі досліджуваної ділянки 2,8:1) та має відносну поруватість $\sim 0,203$ (відносна поруватість поверхні вихідних зразків з п'єзокераміки ЦТС-19 складає 0,414). При цьому середньоарифметичне значення мікронерівностей поверхні утвореної ВП складає 162,7 нм, що перевищує значення мікронерівностей вихідної п'єзокерамічної поверхні (~ 680 нм), а саме покриття може служити основою для нанесення на нього матеріалу електроду.

Дослідження методами електронної та атомно-силової мікроскопії поверхонь зразків як групи 1, так і групи 2, формування покриттів на яких відбувалося за температури вище 780 К, показало утворення вуглецевих структур на осадженій ВП (рис. 2).

Утворення та зростання таких структур носило невпорядкований характер. Це підтверджує той факт, що температура не є основним фактором утворення та зростання цих структур, а лише виступає умовою їхнього виникнення на вуглецевому покритті.

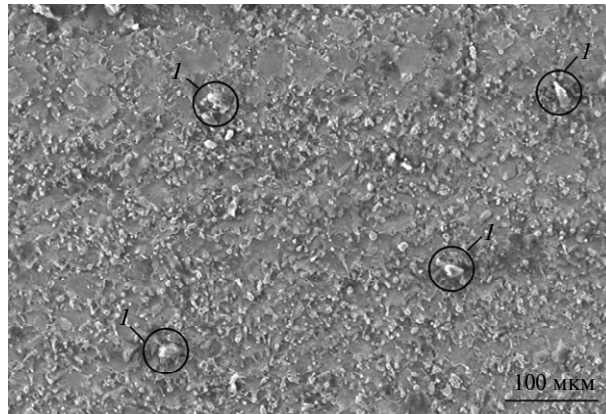


Рис. 2. Поверхня зразка з п'єзоелектричної кераміки ЦТС-19 з покриттям Cu-C зі сформованими вуглецевими структурами (I); растровий електронний мікроскоп ULTRA-55.

В той же час, осадження ВП за температури зразка меншої за 780 К відбувається з утворенням мідно-графітової суміші, яка має адгезійну міцність ~ 16 МПа (адгезійна міцність ВП Cu-C в середньому становить 46 МПа). Подальше зниження температури зразка до значень менших 550 К в процесі термовакуумного осадження призводить до формування на ньому аморфної фази Cu-C, що перешкоджає утворенню зерен основної фази ВП (рис. 3).

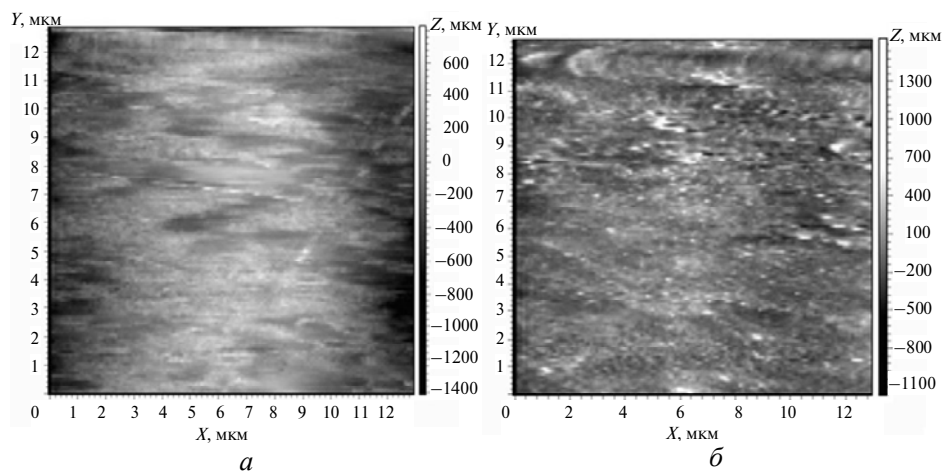


Рис. 3. Поверхня зразка з п'єзоелектричної кераміки ЦТС-19 зі сформованими на ній аморфними покриттями Cu-C (a) та Cu-C-Cu-C (б); атомно-силовий мікроскоп NT-206 V.

Як видно на зображенні поверхні зразків групи 1 та 2 (див. рис. 3), при утворенні покриттів за умов докритичних температур не виникають зародки кристалітів, що є основою вуглецевого зносостійкого покриття, а саме, утворене таким чином покриття є аморфним, має низьку ($\sim 6-8$ МПа) адгезійну міцність, яка не забезпечує усунення мікро- та нанодфектів поверхонь п'єзоелементів від дії зовнішніх силових навантажень та вібрацій. Срібні електроди, що осаджуються на таке покриття, є несучільними та неоднорідними по товщині, їх поверхня має ефект “помаранчевої скоринки”, це значно погіршує техніко-експлуатаційні характеристики п'єзокерамічних виробів.

Таким чином, встановлено, що температура п'єзокерамічного зразка є необхідною умовою формування якісних вуглецевих зносостійких покриттів на поверхнях п'єзокерамічних матеріалів, що не призводять до виникнення дефектів на поверхнях п'єзоелементів від дії зовнішніх силових навантажень та вібрацій та є основою для нанесення на такі ВП матеріалу електроду. В той же час визначено зміну структури та мікрогеометрії утворених на п'єзокераміці ВП від температури основи, на яку відбувалося осадження.

Дослідження елементного складу вуглецевих покриттів методом растрової електронної мікроскопії

Дослідження елементного складу вуглецевих покриттів проводили із залученням методики визначення хімічного контрасту елементів у покритті, яка була реалізована за допомогою вбудованого в колону растрового електронного мікроскопу ULTRA-55 детектора зворотно розсіяних електронів з селекцією по енергії виходу (EsB). Результати цих досліджень представлено в табл. 1.

Таблиця 1. Спектральний елементний аналіз бінарних шарів покриття Cu–C, Cu–C–Cu–C

Перехідний або основний шари	Елемент, % (за масою)				
	C	Cu	Ti	Pb	Інші
Зразок групи 1 (основа–Cu–C)					
Основа–Cu	1,12	25,21	26,20	46,26	1,21
Cu–C	12,04	18,84	13,43	54,88	0,81
C	91,98	3,22	4,48	–	0,32
Зразок групи 2 (основа–Cu–C–Cu–C)					
Основа–Cu	1,78	25,67	26,88	43,64	2,03
Cu–C ^I	14,70	16,46	8,31	59,44	1,09
C ^I	87,12	4,23	5,16	32,23	0,26
C ^I –Cu ^{II}	24,97	12,11	3,21	69,63	0,08
Cu ^{II} –C ^{II}	73,28	0,47	1,78	24,47	–
C ^{II}	99,89	–	0,11	–	–

Наведені в табл. 1 дані дозволяють зробити висновок про те, що вуглецева складова при нарощуванні бінарних шарів ВП зростає. Масова частка свинцю в шарах змінюється таким чином: в менш щільному мідному шарі зростає, тоді як в більш щільному вуглецевому – зменшується в 2–3 рази. В той же час, масова частка міді та титану по мірі нарощування вуглецевих шарів покриття значно (з 25–27 % до несуттєвих 0,1–0,5 %) зменшується. Також спостерігається зменшення інших складових елементів покриття.

З отриманих методом растрової електронної мікроскопії фотознімків поверхні зразків (рис. 4, 5) видно, що покриття рівномірне, однорідне, має чітко сформовані структури (світлі утворення). Крім того, на рис. 5, а прослідковується певна впорядкованість вуглецевих утворень.

Дослідження елементного аналізу зразків групи 1 за енергетичними спектрами розподілу хімічних елементів в покритті Cu–C вказує на те, що за кількісним складом масова частка вуглецю в такому покритті перевищує масові частки інших елементів.

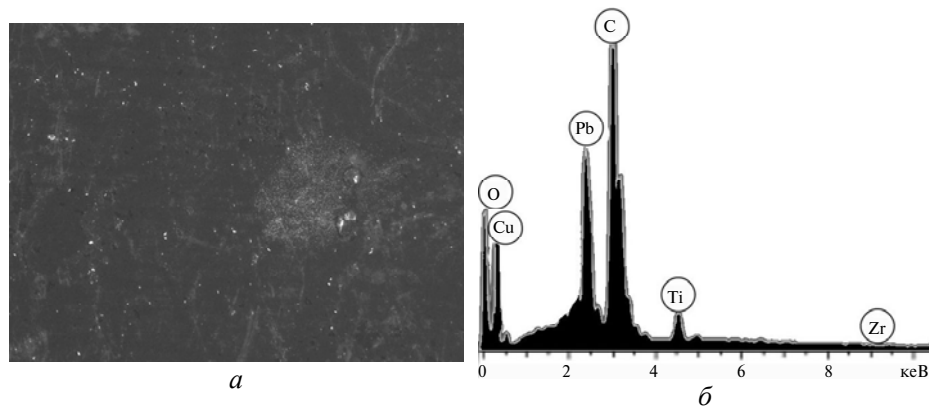


Рис. 4. Зображення поверхні зразка групи 1 (а) та енергетичний спектр розподілу хімічних елементів в покритті (б); растровий електронний мікроскоп ULTRA-55; $\times 10000$.

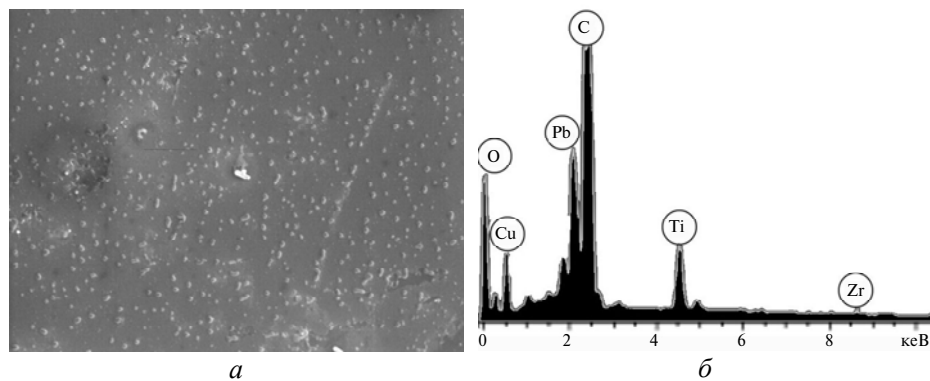


Рис. 5. Зображення поверхні зразка групи 2 (а) та енергетичний спектр розподілу хімічних елементів в покритті (б); растровий електронний мікроскоп ULTRA-55; $\times 10000$.

Проте, як видно на рис. 4, б, масова частка міді також достатньо висока, що може свідчити про неоднорідність та несущільність утвореного шару вуглецю, а також відносно малу його товщину ($\sim 15\text{--}20$ нм).

Слід відмітити високу масову частку свинцю в покритті. На думку авторів це пов'язано з тим, що в процесі підготовки зразка до осадження та безпосередньо в процесі осадження за температури ~ 780 К відбувається часткова сублимація легких елементів з поверхні п'єзокерамічного матеріалу, тоді як важкі елементи, на кшталт свинцю, дифундують в менш щільну структуру утворюваного покриття.

Елементний аналіз зразків групи 2 за енергетичними спектрами розподілу хімічних елементів (див. рис. 5, б) показує суттєве зменшення масової частки міді в покритті в порівнянні зі зразками групи 1. При цьому висока масова частка свинцю в покритті свідчить про достатньо високу швидкість, з якою дифундують молекули свинцю у вуглецеве покриття, а також про малу щільність та високу поруватість останнього, що підтверджується знімками поверхні цих зразків, отриманими методом растрової електронної мікроскопії (див. рис. 5, а).

Таким чином, встановлено, що утворені за схемою Cu-C-Cu-C ВП є більш рівномірними та однорідними в порівнянні з двохшаровим покриттям Cu-C та мають чітко сформовані вуглецеві структури. В окремих випадках прослідковується певна впорядкованість таких утворень, що може стати ос-

новою для створення надміцних впорядкованих наноструктур на поверхнях п'єзокерамічних матеріалів.

Проте проблемою залишається висока масова частка в отриманому покритті свинцю, який дифундує з основи зразка. Це перешкоджає утворенню впорядкованих структур та може погіршувати експлуатаційні властивості (зносостійкість, механічну міцність) таких покриттів.

Дослідження фізико-хімічних властивостей зносостійких покриттів на п'єзоелектричній кераміці

Тонкі ВП системи Cu–C–Cu–C отримували на п'єзоелектричній кераміці ЦТС-19 методом вакуумного термічного осадження з подальшою обробкою низькоенергетичним електронним потоком стрічкової форми ($E \leq 6$ кеВ) за режимами: прискорююча напруга – 1,5 кВ; струм електронного потоку – 80 мА; відстань від електронно-променевої гармати до оброблюваної поверхні – 15 мм. Для отриманих таким чином структур проводили електронно-мікроскопічне дослідження з визначенням якісного і кількісного складу покриттів (рис. 6).

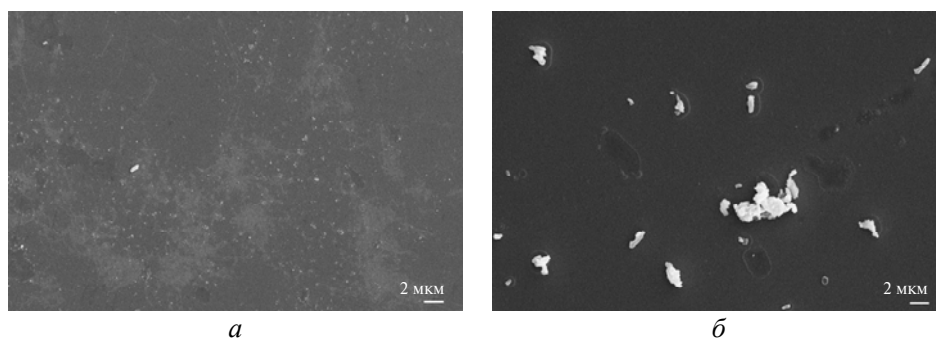


Рис. 6. Зображення ділянок поверхні зразка з п'єзоелектричної кераміки ЦТС-19 зі сформованим на ній покриттям Cu–C–Cu–C (а) та з утвореною електронно-променевим методом вуглецевою структурою (б); растровий електронний мікроскоп ULTRA-55; $\times 5000$.

Покриття Cu–C–Cu–C початково мають порувату неоднорідну структуру (див. рис. 6, а), тоді як обробка таких покриттів низькоенергетичним електронним потоком дозволяє зменшити поруватість на 85–90 %, підвищити однорідність покриття та сформувати на ньому окремі елементи (див. рис. 6, б), які при подальшій обробці та оптимізації режимів термічного осадження у вакуумі та низькоенергетичної електронної обробки можуть бути сформовані у впорядковані структури.

За результатами визначення якісного і кількісного складу композиційних покриттів після електронно-променевого модифікування зафіксовано зменшення вмісту елементів, які входять до складу ВП, а саме: Cu – з 24,47–59,44 до 3,23–0 % та Pb – з 0,47–16,46 до 0 %.

В той же час встановлено, що основним складовим елементом композиційних структур (світлі елементи на рис. 6) є вуглець (~ 96,6 %), що дозволяє говорити про природу походження таких структур, а саме – із ВП системи Cu–C–Cu–C, оскільки матеріал основи не містить вуглецю.

Для дослідження мікротвердості використовували зразки ВП Cu–C–Cu–C без та з електронно-променевим модифікуванням поверхні. Мікротвердість отриманих покриттів вимірювали за методикою, що описано в [11], із залученням методу атомно-силової мікроскопії (табл. 2).

Таблиця 2. Мікротвердість зразків з п'єзоелектричної кераміки ЦТС-19 зі сформованим на них покриттям Cu–C–Cu–C

Зразок	Мікротвердість H_v , кГ/мм ² при навантаженні, г	
	20	50
Без електронно-променевого модифікування	467	458*
Після електронно-променевого модифікування	510	586

* Покриття нестійке, адгезійна міцність менше 1,5 МПа (0–I балів).

Для порівняння результатів мікротвердості на ВП також визначено мікротвердість п'єзоелектричної кераміки ЦТС-19 зі сформованим на ній покриттям Cu–C–Cu–C з подальшим електронно-променевим модифікуванням при навантаженні 100 г, що становила в середньому $H_v = 734$ кГ/мм².

Проведені дослідження мікротвердості зносостійких вуглецевих покриттів, модифікованих електронним потоком, показали її суттєве (510–586 кГс/мм²) збільшення порівняно з покриттями, які отримані за тих самих режимів, але без електронно-променевого модифікування (458–467 кГс/мм²). В той же час, після електронно-променевого модифікування спостерігається відсутність міді та свинцю в отриманому покритті, що дозволяє зробити висновок про можливість використання такого модифікування для утворення впорядкованих вуглецевих структур на зносостійкому покритті, яке отримане на п'єзоелектричній кераміці ЦТС-19.

ВИСНОВКИ

Критична температура зразка з п'єзокерамічного матеріалу, на якому методом термовакуумного осадження формувалося покриття, дорівнює 780 К. При температурі вище зазначеної утворюється система Cu–C підвищеної зносостійкості, тоді як при меншій температурі – мідно-графітова суміш. Також встановлено, що при температурі зразка меншій за 550 К формуються аморфні покриття Cu–C, які не забезпечують усунення мікро- та нанодфектів поверхонь п'єзоелементів від дії зовнішніх силових навантажень та вібрацій.

Виявлена закономірність в зміні відсоткового вмісту компонентів в утвореному багаточаровому зносостійкому покритті залежно від складу матеріалу, що осаджувався, його геометричних характеристик та хімічної чистоти доводить їх істотний вплив на формування тонких вуглецевих структур термічним осадженням у вакуумі.

Вміст елементів, які входять до складу ВП після електронно-променевого модифікування зменшується, а саме: Cu – з 24,47–59,44 до 3,23–0 % та O – з 0,47–16,46 до 0 %. Зроблено припущення, що основним складовим елементом цих структур є вуглець (~96,6 %), що дозволяє встановити природу їх походження – із ВП системи Cu–C–Cu–C.

Середня мікротвердість зразків із п'єзоелектричної кераміки ЦТС-19 зі сформованим на них покриттям Cu–C–Cu–C складала $H_v = 467$ – 510 кГс/мм² (при навантаженні 20 г) та $H_v = 458$ – 586 кГ/мм² (при навантаженні 50 г), що менше за мікротвердість п'єзоелектричної кераміки ЦТС-19 зі сформованим на них покриттям Cu–C–Cu–C при подальшому електронно-променевому модифікуванні при навантаженні 100 г, яка становить в середньому $H_v = 734$ кГ/мм².

Исследованы функциональные особенности получения тонких износостойких покрытий при изучении условий их формирования термовакuumным осаждением на поверхностях пьезокерамических материалов. Обнаружено влияние низкоэнергетического ленточного электронного потока на физико-эксплуатационные характеристики поверхностей пьезокерамических элементов, которые эксплуатируются в условиях агрессивных сред. Установлено, что модификация низкоэнергетическим электронным потоком ($E \leq 6$ кэВ) поверхностей пьезоэлементов из керамики ЦТС-19 улучшает микрогеометрию этих поверхностей, способствует формированию на них углеродных структур, что повышает на 8–12 % их микротвердость.

Ключевые слова: углеродные покрытия, пьезокерамические материалы, термическое испарение в вакууме.

Functional features of producing thin wear-resistant coatings have been studied by analyzing the conditions of their formation via thermal vacuum deposition on the surfaces of piezoceramic materials. The effect has been revealed of low-energy ribbon flow on physical and operating characteristics of surfaces of piezoceramic elements, which operate in aggressive media. It has been found that the modification of surfaces of piezoelectric cells from the TsTC-19 ceramics by low-energy ribbon flow ($E \leq 6$ keV) improves the microgeometry of these surfaces, promotes the formation of carbon structures on them, which increases the surface microhardness by 8–12%.

Keywords: carbon coatings, piezoceramic materials, thermal evaporation in a vacuum.

1. Шарапов В. М., Минаев И. Г., Бондаренко Ю. Ю. и др. Пьезоэлектрические преобразователи: Справоч. пособие / Под ред. В. М. Шарапова – Черкассы: ЧГТУ, 2004. – 435 с.
2. Шарапов В. М., Мусиенко М. П., Шарапова Е. В. Пьезоэлектрические датчики. – М.: Техносфера, 2006. – 632 с.
3. Бондаренко М. А., Бондаренко Ю. Ю., Бабаев А. К. и др. Применение метода атомно-силовой микроскопии в прогнозировании срока эксплуатации пьезоэлектрических преобразователей медицинских приборов // Сб. докл. VII Междунар. семинара “Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии”, г. Минск, 1–3 нояб. 2006 г. – Минск, 2006. – С. 143–147.
4. Шарапов В. М., Гуржий А. М., Бондаренко М. А., Бондаренко Ю. Ю. Исследование характеристик токопроводящих электропроводных пьезокерамических элементов // Вісн. Черкас. держ. технол. ун-ту. – Черкаси, 2007. – Спецвип. – С. 258–260.
5. Самойлович М. И., Белянин А. Ф. Алмазные и алмазоподобные углеродные пленки: формирование и строение // Алмазные пленки и пленки родственных материалов: Сб. докл. 15-го Междунар. симп. “Тонкие пленки в оптике и электронике”. – Харьков: ННЦ ХФТИ, “Константа”, 2003. – С. 6.
6. Спицын Б. В., Галушко И. В., Алексеенко А. Е. и др. Алмазные пленки, легированные слабыми элементами // Алмазные пленки и пленки родственных материалов: Сб. докл. 12-го Междунар. симп. “Тонкие пленки в электронике”. – Харьков: ИПЦ “Контраст”, 2001. – С. 11.
7. Черепанов В. А., Золкин А. С., Колесов Б. А. и др. Алмазоподобные гранулированные пленки на кремнии, полученные при горении ацетилена // <http://psj.nsu.ru/articles/paper5.html>.
8. Бондаренко М. А., Дубровская Г. Н., Котляр А. В. Изучение микрогеометрии и топографии поверхности тонких покрытий методом атомно-силовой микроскопии // Материалы докл. 7-й Международ. науч.-техн. конф. “Новые материалы и технологии: Порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия”, Минск, 16–17 мая 2006. – Минск: Ин-т тепло- и массообмена НАНБ им. А. В. Лыкова. – С. 176–177.
9. Бондаренко М. О. Дослідження впливу низькоенергетичного електронного потоку на мікрогеометрію поверхонь п'єзокерамічних елементів // Труды Одесского политехн. ун-та: Научный и производственно-практический сборник по техническим и естественным наукам. – 2009. – Вып. 2(32). – С. 149–153.
10. Дубровская Г. Н., Божко Н. И., Котляр А. В. Получение тонких композиционных покрытий, модифицированных редкоземельными элементами // XV Российский сим-

позиум по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел “РЕМ-2007”, г. Черногловка, 4–8 июня 2007 г.: Сб. тез. – М., 2007. – С. 100.

11. *Dubrovskaya G. N., Kanashevich G. V., Bozko N. I., Bondarenko M. A, Kotlyar O. V., and Rukon A. K .M.* Examples of Surface Structure Analysis Methods. // Ed. Dubrovskaya G. N. – Silhet, Bangladesh: Shobus Biponi, Udoyon Ofset Printers, 2007. – 248 p.

Національний технічний ун-т України

Надійшла 09.03.12

“Київський політехнічний ін-т”

Черкаський державний технологічний ун-т