

УДК 681.2.082:666.655

М.О. Бондаренко, канд. техн. наук, доц., Черкас.
держ. технол. ун-т

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ НИЗЬКОЕНЕРГЕТИЧНОГО ЕЛЕКТРОННОГО ПОТОКУ НА МІКРОГЕОМЕТРІЮ ПОВЕРХОНЬ П'ЄЗОКЕРАМІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

М.О. Бондаренко. Дослідження впливу низькоенергетичного електронного потоку на мікрогеометрію поверхонь п'єзокерамічних елементів. Проведено дослідження впливу низькоенергетичного стрічкового електронного потоку на мікрогеометрію поверхонь п'єзокерамічних елементів, що експлуатуються в умовах агресивних середовищ. Встановлено, що модифікація низькоенергетичним електронним потоком ($E \leq 6$ кеВ) поверхонь п'єзоелементів з кераміки ЦТС-19 дозволяє незначно покращити мікрогеометрію цих поверхонь.

М.А. Бондаренко. Исследование влияния низькоенергетического электронного потока на микрогеометрию поверхностей пьезокерамических элементов. Проведены исследования влияния низькоенергетического ленточного электронного потока на микрогеометрию поверхностей пьезокерамических элементов, эксплуатируемых в условиях агрессивных сред. Установлено, что модификация низькоенергетическим электронным потоком ($E \leq 6$ кэВ) поверхностей пьезоэлементов из керамики ЦТС-19 позволяет незначительно улучшить микрогеометрию этих поверхностей.

М.А. Bondarenko. Research of influence of low-energy electron flow on microgeometry of surfaces of piezoceramic elements. Research of influence of low-energy strip electronic flow is conducted on microgeometry of surfaces of piezoceramic elements, on-the-road in the conditions of aggressive environments. Insignificant improvement of microgeometry of piezoelement surfaces from the ceramic ZTP-19 after modification by a low-energy electronic flow ($E \leq 6$ keV) is set.

В таких галузях науки та техніки, як точне приладобудування, медицина, гідроакустика, аерокосмічне та суднобудування широкого застосування набули елементи із п'єзокерамічних матеріалів та датчики на їх основі [1, 2]. Висока точність, надійність, чутливість та широкий діапазон вимірювань, які можуть здійснюватися такими датчиками, можливість їхнього виконання в мініатюрних габаритах дозволяють використовувати останні в умовах високого тиску, температури, вакууму, агресивних середовищ, а в окремих випадках (наприклад, при вимірюванні тиску теплоносія на атомних електростанціях) є єдиним можливим вимірювальним засобом [3].

Встановлено, що як в процесі експлуатації, так і при довготривалому зберіганні електрофізичні параметри таких п'єзоелементів значно погіршуються [4]. Це пов'язано з утворенням і розвитком мікро- та нанодфектів (тріщин, пор, локальних відшаровувань покриття від матеріалу основи), а також з ерозією поверхонь п'єзоелементів від дії зовнішніх силових навантажень та вібрацій, атмосферного впливу та дії агресивного середовища. Це, в свою чергу, призводить до зменшення добротності та амплітуди основного резонансу радіальних коливань, а також збільшення значення поверхневого опору п'єзоелемента.

Усунення дефектів струмопровідного покриття, а також значне уповільнення розвитку мікрорельєфу поверхні п'єзокерамічних елементів уявляється можливим за рахунок їхньої поверхневої обробки низькоенергетичним ($E \leq 6$ кеВ) електронним потоком стрічкової форми [5].

В той же час встановлено, що серед неруйнуючих методів контролю мікрогеометрії поверхні п'єзоелектричних елементів найбільш перспективним є метод атомно-силової мікроскопії, як такий, що має високу точність (до 1 нм); чутливість (порядку 10^{-12} Н) і продуктивність [6]. Тому дослідження зміни мікрогеометрії поверхонь п'єзокерамічних елементів при їхній експлуатації в умовах агресивних середовищ до та після низькоенергетичної електронно-променевої обробки із залученням методу атомно-силової мікроскопії є важливим завданням.

Експериментально-дослідна частина роботи проводилася в спеціалізованих лабораторіях. Об'єктами дослідження були зразки із п'єзоелектричної кераміки марки ЦТС-19 (диски діаметром 35 мм, товщиною 1 мм), виготовлені у 2008 р. та взяті з однієї партії зразків в кількості 15 штук. Усі зразки були поділені на групи по п'ять зразків: група 1 — зразки, які не підлягали електронно-променевому впливу і в експлуатації не знаходилися; група 2 — зразки, які не підлягали електронно-променевому впливу та експлуатувалися в екстремальних умовах, як вимірювальні елементи вібраційного стенду ультразвукового диспергатора УЗДН-А протягом одного року; група 3 — зразки, які підлягали поверхневому впливу електронним потоком та експлуатувалися в умовах, аналогічних умовам експлуатації зразків групи 2 протягом одного року.

Низькоенергетична поверхнева електронно-променева обробка проводилася на модифікованій технологічній електронній установці УВН-71. Інструментом обробки був електронний потік стрічкової форми з довжиною і шириною електронного потоку на поверхні матеріалу, відповідно, 60 мм та 1,5 мм. Технологічний режим електронної обробки обирався з досвіду колективу фахівців лабораторії з обробки керамічних матеріалів електронними потоками і становив: прискорююча напруга 1,5 кВ; струм електронного потоку 80 мА; відстань від електронно-променевої гармати до оброблюваної поверхні 15 мм; обробка здійснювалася для усіх зразків групи 2 та групи 3 і частково для зразків групи 1, в одному технологічному циклі за один прохід [5].

Дослідження мікрогеометрії поверхонь зразків усіх трьох груп проводилися на атомно-силовому мікроскопі NT-206 [7]. При цьому використовувалися кремнієві зонди "Ultrasharp CSC12". До складу приладу також входить система мікропозиціонування та вбудований оптичний довгофокусуєчий мікроскоп Logitech, за допомогою яких здійснювалося позиціонування вимірювальної системи атомно-силового мікроскопа на окремі ділянки по поверхні зразка. Вимірювання мікрорельєфу поверхні зразків проводилося в статистичному режимі на ділянках поверхні, максимально 13×13 мкм, згідно з розробленими методиками та рекомендаціями. В результаті проведених досліджень було встановлено, що при обробці поверхонь зразків групи 1 низькоенергетичним електронним потоком стрічкової форми, середня висота профілю h зменшувалася незначно: від 120...160 нм (рис. 1, профіль 1) до значень порядку 95...105 нм (профіль 2) відносно довжини профілю l вздовж лінії $A-B$.

Ймовірно таке зменшення пов'язане з інтенсивним випаровуванням (сублімацією) матеріалу матриці п'єзокераміки під дією концентрованого джерела енергії — електронної стрічки. На це вказує й зменшення поруватості поверхні п'єзокераміки після електронно-променевого впливу на неї (рис. 2).

Так, середній розмір пор вихідного зразка (рис. 2, *a*) становить 15...20 мкм, тоді як після електронно-променевого впливу — 5...8 мкм. Крім того, спостерігалось усунення окремих мікро- і нанодфектів поверхні зразків (5 % мікротріщин шириною до 5 нм і 60 % пор).

В результаті аналізу зразків групи 2 та групи 3 методом атомно-силової мікроскопії виявлене часткове руйнування та локальна ерозія їхньої поверхні (рис. 3).

При цьому, на відміну від зразків групи 1, середня висота профілю для яких навіть без електронно-променевої модифікації не перевищувала 160 нм, для зразків групи 2 спостерігалось збільшення середньої висоти профілю до 208...212 нм, тоді як для зразків групи 3 — до 180...185 нм. Як характерну особливість зразків групи 2 можна виділити більш розвинутий мікрорельєф поверхні та наявні мікро- і нанодфекти поверхні.

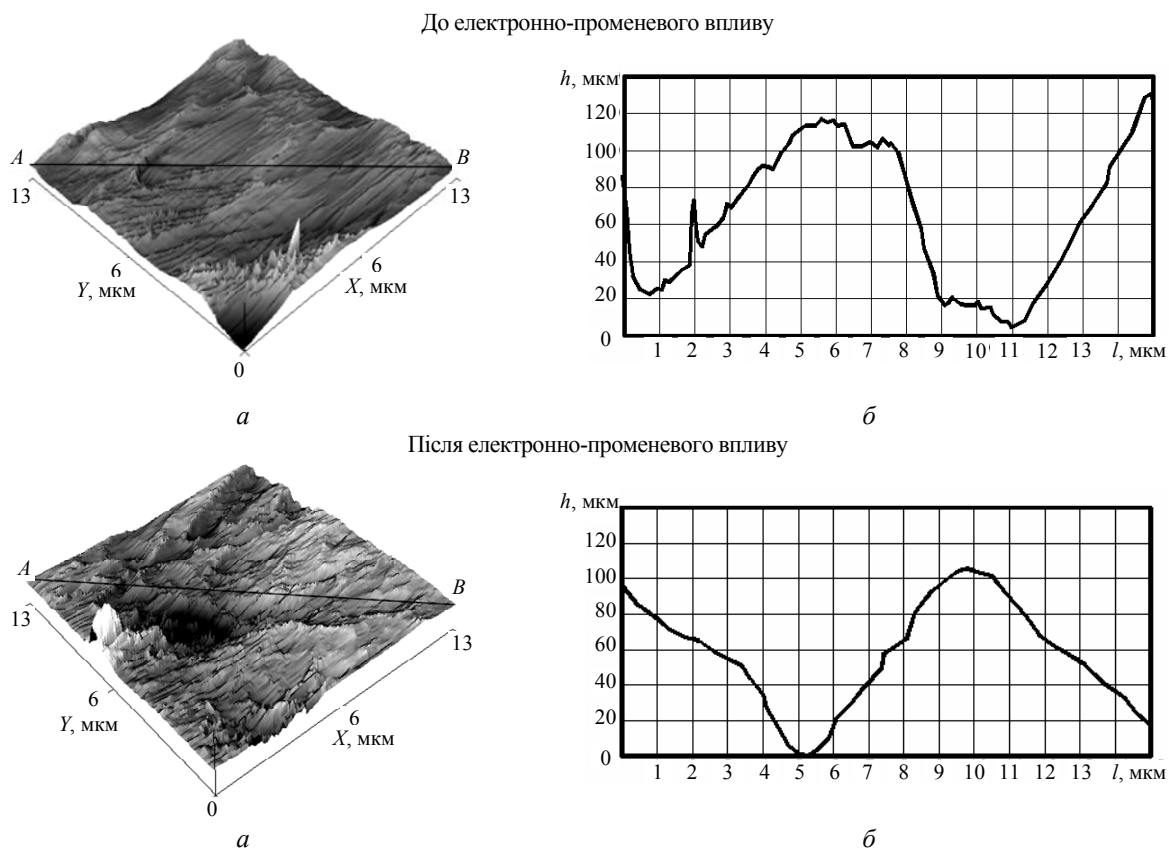


Рис. 1. Топограма (а) та профіль вздовж лінії А-В відсканованої ділянки (13×13 мкм) (б) поверхні п'єзокерамічного елемента групи 1 до та після електронно-променевого впливу, отримані за допомогою атомно-силового мікроскопу NT-206V

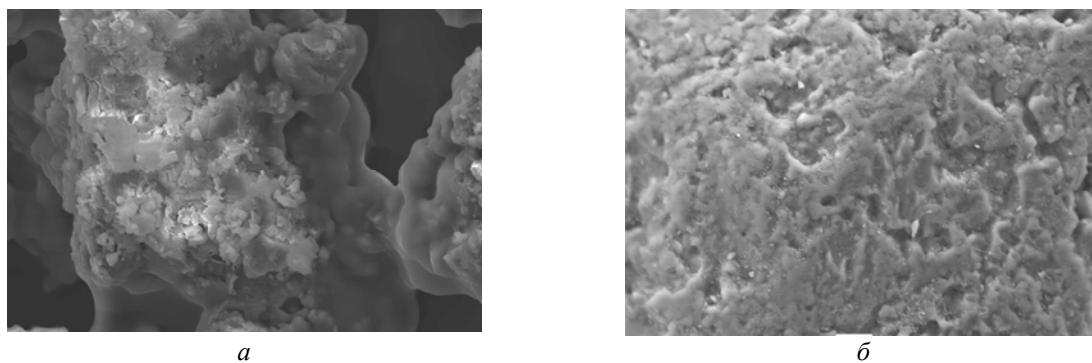


Рис. 2. Фрагменти поверхні зразка з п'єзокераміки ЦТС-19 до (а) та після (б) електронно-променевого впливу, отримані за допомогою растрового електронного мікроскопу JEOL JSM-6700F

В той же час, подальша електронно-променева обробка зразків групи 2 та групи 3 дозволила частково усунути ряд мікродфектів (зменшення мікродфектів — 1,8...3% від загальної кількості), характерних для необроблених зразків цих груп. Проте, як показали масдифрактометричні дослідження (прилад “ЕМАЛ-2”) хімічний склад таких поверхонь після електронно-променевого впливу змінювався не суттєво. Зменшення висоти профілю поверхні також не спостерігалось.

Слід зауважити, що подальша експлуатація п'єзокерамічних елементів як групи 2, так і групи 3 призводить до різкого зниження резонансного піку АЧХ з 580 до 220 мВ (в 2,6 рази), а також до розривів в імпульсній характеристиці та до виникнення шумів на перехідній

характеристиці, що є недопустимим при застосуванні таких елементів у відповідальних схемах (рис. 4).

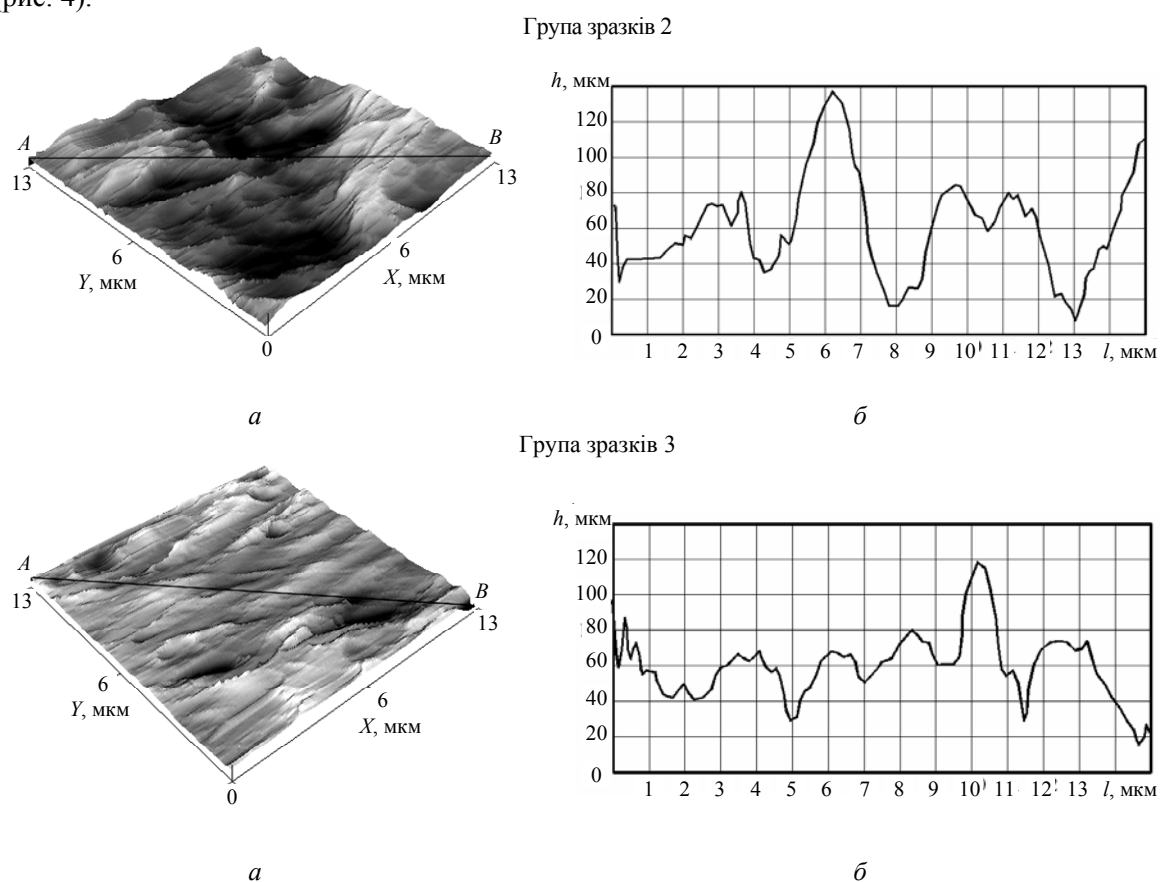


Рис. 3. Топограма (а) та профіль вздовж лінії А-В відсканованої ділянки (13×13 мкм) (б) поверхні п'єзокерамічних елементів групи 2 та групи 3, отримані за допомогою атомно-силового мікроскопа NT-206V

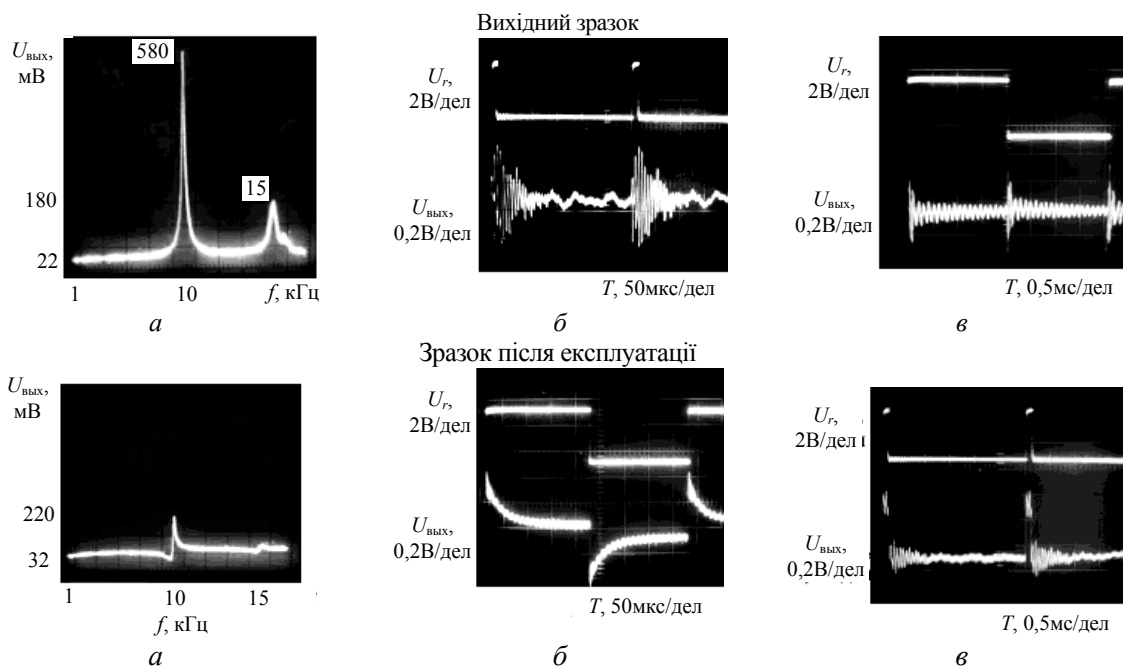


Рис. 4. Амплитудно-частотна (а), імпульсна (б) та перехідна (в) характеристики перетворювача тиску на основі п'єзоелектричних елементів, отримані за допомогою приладу Х1-46

Отже, можна зробити висновки:

— модифікація низькоенергетичним електронним потоком ($E \leq 6$ кеВ) поверхонь п'єзоелектричних елементів з кераміки ЦТС-19, які не знаходилися в експлуатації, дозволила покращити мікрогеометрію цих поверхонь (середня висота профілю поверхні зменшилася з 120...160 до 95...105 нм) та усунути ряд мікро- і нанодфектів: 5 % мікротріщин шириною до 5 нм, 60 % пор, середній розмір яких для вихідного зразка становив 15...20 мкм, а для зразка після електронно-променевого впливу — 5...8 мкм;

— на відміну від вихідних зразків, середня висота профілю для зразків після тривалої експлуатації в умовах агресивного середовища становила 208...212 нм, тоді як для зразків після електронно-променевого впливу та подальшої експлуатації за цих умов — до 180...185 нм;

— електронно-променева обробка зразків, які знаходилися в тривалій експлуатації в екстремальних умовах агресивного середовища не дозволила істотно покращити мікрогеометрію їхніх поверхонь; при цьому мікро- і нанодфекти, які виникли під час експлуатації, усунуті лише частково: не більше 3% від загальної кількості;

— утворення мікро- і нанодфектів та локальна ерозія поверхні п'єзокерамічних елементів в процесі їхньої експлуатації в умовах агресивного середовища призводить до погіршення електрофізичних параметрів цих елементів, а саме: до збільшення поверхневого опору з 0,18...0,2 до 0,77...0,83 Ом та зменшення добротності з 35...38 до 21,5...24, чим призводить до неможливості подальшої експлуатації таких елементів.

Література

1. Пьезоэлектрические преобразователи: справоч. пособие / В.М. Шарапов, И.Г. Минаев, Ю.Ю. Бондаренко и др.; под ред. В.М. Шарапова — Черкассы: ЧГТУ, 2004. — 435 с.
2. Шарапов В.М. Пьезоэлектрические датчики / В.М. Шарапов, М.П. Мусиенко, Е.В. Шарапова — М.: Техносфера, 2006. — 632 с.
3. Автоматизированное ультразвуковое устройство снятия остаточных напряжений в сварных соединениях АЭС / А.И. Трофимов, С.И. Минин, В.Н. Дементьев, А.И. Романцов // Известия вузов. Ядер. энергетика. — 2008. — № 2. — С. 36 — 42.
4. Применение метода атомно-силовой микроскопии в прогнозировании срока эксплуатации пьезоэлектрических преобразователей медицинских приборов / М.А. Бондаренко, Ю.Ю. Бондаренко, А.К. Бабаев и др. // Сб. докл. VII Междунар. семинара “Методол. аспекты сканирующей зондовой микроскопии”, г. Минск, 1 — 3 нояб. 2006 г. — Минск, 2006. — С. 143 — 147.
5. Исследование характеристик токопроводящих электропроводных пьезокерамических элементов / В.М. Шарапов, А.М. Гуржий, М.А. Бондаренко, Ю.Ю. Бондаренко // Вісн. Черкас. держ. технол. ун-ту. — Черкаси, 2007. — Спецвип. — С. 258 — 260.
6. Исследование поверхностей пьезокерамических элементов, модифицированных электронным потоком методом атомно-силовой микроскопии / М.А. Бондаренко, Ю.Ю. Бондаренко, Г.В. Канашевич и др. // Сб. докл. 8-го Белорус. семинара “Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии”, г. Минск, 8 — 10 окт. 2008 г. — Минск, 2008. — С. 23 — 26.
7. Общая информация о многофункциональном сканирующем зондовом микроскопе NT-206 [Электронный ресурс] / Білорусь, ТДВ “Микротестмашины”. — <http://microtm.com/nt206/nt206r.htm>. — 11.09.09.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Черкас. держ. техн. ун-та Вашенко В.А.

Надійшла до редакції 16 вересня 2009 р.