

УДК 620.187+61.002.56

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ В ПРОГНОЗИРОВАНИИ СРОКА ЭКСПЛУАТАЦИИ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ МЕДИЦИНСКИХ ПРИБОРОВ

М. А. Бондаренко¹, Ю. Ю. Бондаренко¹, А. К. Бабаев¹, И. В. Яценко¹, И. А. Рева¹,
Л. И. Конопальцева², В. А. Ващенко¹

¹ Черкасский государственный технологический университет,
бульв. Шевченко 460, г. Черкассы, Украина. E-mail: maXXium@rambler.ru

² Научно-исследовательский инженерно-внедренческий центр приоритетных технологий оптической
техники, ул. Московская 10, г. Киев, Украина

Введение

Сегодня в разных отраслях науки и техники широкое применение находят пьезоэлектрические преобразователи разнообразных форм (дисков, пластин, клиньев и т. д.), размеров и функционального назначения. Они используются в контрольно-измерительных приборах, микротехнике и медицинских приборах. Однако, последующее совершенствование таких преобразователей путем их миниатюризации невозможно без прогнозирования срока их безотказной эксплуатации.

Особенно важно это учесть при использовании пьезоэлектрических преобразователей в медицинских приборах, где выход из строя таких преобразователей может привести к неправильным диагнозам, а в отдельных случаях – к опасности для здоровья человека.

В работе [1] показано, что основными показателями, которые влияют на бесбойную работу и надежность эксплуатации пьезоэлектрических преобразователей является площадь электродов, микронеровность поверхностей пьезоэлектрических элементов (не должна превышать 0,3 мкм) и отсутствие на них микродефектов.

Поэтому целью данной работы является проведение исследований и анализа микрогеометрии поверхностей пьезоэлектрических преобразователей методом атомно-силовой микроскопии для определения скрытых микродефектов и микронеровностей поверхностей этих преобразователей на начальной стадии их эксплуатации, а также прогнозирования срока их безотказной эксплуатации.

Методика эксперимента

Объектами исследования служат пьезоэлектрические элементы в форме тонких дисков диаметром 10...15 мм и толщиной 0,3...0,5 мм из керамики ЦТС-19 (цирконат-титанат свинца), разделенные на две группы: 1) объекты не находились в эксплуатации; 2) применялись в качестве преобразователей давления в датчиках тонов Короткова [1] в течении 1, 5, 7 и 12 лет при эксплуатации согласно ОСТ 31-140 («Пьезоэлектрические приборы. Технические условия»)



Исследования микрогеометрии поверхностей объектов из обеих групп проводились на приборе NT-206 (ОДО «Микротестмашины», Беларусь) [2] с применением кремниевых зондов CSC12 (Mikromasch) [3]. При этом для повышения достоверности результатов исследования выполнялись на 9 участках площадью 13x13 мкм по поверхности каждого из образцов согласно схеме (рис. 1).

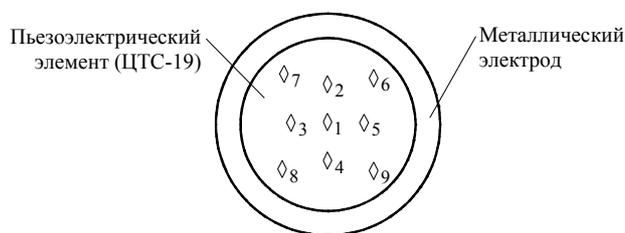


Рис. 1. Схема проведения исследования поверхности пьезоэлектрического элемента: $\diamond_1 \dots \diamond_9$ – участки, на которых проводились исследования (цифрами показана последовательность исследования участков)

Выбор необходимого участка на поверхности образца осуществлялся с помощью системы микропозиционирования и встроенной оптической системой.

Исследования объектов проводились следующим образом. После ультразвуковой очистки в этиловом спирте объект исследования базировался на магнитном предметном столике. Применение встроенной оптической системы и ступени-микропозиционирования позволило определять участок пьезоэлемента для исследований с точностью $\pm 2,5$ мкм. В качестве рабочего выбран статический режим работы АСМ, позволяющий исследовать поверхность объекта, игнорируя наличие на ней влаги и остатков органических веществ (спирта, жирных кислот и т.п).

Для повышения точности и воспроизводимости результатов исследования измерения проводились на 5...6 образцах из каждой группы по завершении процесса измерения с помощью системы микропозиционирования осуществлялся выбор следующего участка согласно схеме (рис. 1).

Математическая обработка результатов эксперимента

Анализ данных, полученных с помощью атомно-силовой микроскопии, выполнялся методом планирования двухфакторного эксперимента [4], где в качестве входных переменных выбирались прирост значений остаточных микронеровностей (%) и количество микродефектов на поверхности пьезоэлектрического элемента. В качестве отклика выбиралось время безотказной эксплуатации пьезоэлектрического элемента (лет). План эксперимента приведен в табл. 1.

Результаты планирования эксперимента представлялись в виде уравнения регрессии:

$$Y = b_0 X_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2, \quad (1)$$

где b_0, b_1, b_2 – коэффициенты уравнения регрессии, соответственно равные [4]

$$b_0 = N^{-1} \sum Y_i; \quad b_1 = N^{-1} \sum X_{i1} Y_i; \quad b_2 = N^{-1} \sum X_{i2} Y_i. \quad (2)$$

X_0 – среднее значение варьируемого параметра [5].

Таблица 1. План эксперимента по исследованию пьезоэлементов на время безотказной эксплуатации

Номер исследуемого объекта	Факторы		Отклик Y, лет (время безотказной эксплуатации пьезоэлемента)
	X ₁ , % (прирост значений остаточных микронеровностей)	X ₂ (количество микродефектов)	
1	-1 (0)	-1 (0)	12
2	-1 (77)	+1 (1)	7
3	+1 (167)	-1 (1)	2
4	+1 (200)	+1 (2)	1

С учетом вычисленных значений коэффициентов уравнение регрессии принимает вид

$$Y = 12 - 2,25X_1 - 3,25X_2. \quad (3)$$

Сопоставление результатов расчета по линеаризованной модели (3) с экспериментальными данными показало, что относительная погрешность ε определения времени безотказной эксплуатации не превышает 3...5%.

Результаты эксперимента и их обсуждение

Проведя математическую обработку результатов эксперимента и подставив в уравнение регрессии (3) максимальный прирост значений остаточных микронеровностей (180%) при условии отсутствия микродефектов поверхности, получим, что прогнозируемый срок эксплуатации пьезоэлектрических преобразователей на примере преобразователей давления в датчиках тонов Короткова составляет приблизительно 8 лет при их эксплуатации согласно ОСТ 31-140.

Анализ результатов АСМ исследований поверхностей пьезоэлектрических элементов позволил установить, что в процессе длительной эксплуатации происходит разрушение их поверхностей (рис. 2) (увеличение микронеровностей от 125...150 нм до 300...420 нм, появление микротрещин, сколов и других микродефектов), которое приводит к резкому снижению резонансного пика с 580 до 220 мВ (в 2,6 раза) амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), разрывам в импульсной характеристике и появлению шумов на переходной характеристике (рис. 3).

Прогнозирование срока эксплуатации пьезоэлектрических преобразователей медицинских приборов путем планирования двухфакторного эксперимента по данным, полученным методом АСМ, позволило построить гистограмму зависимости количества пьезоэлектрических преобразователей, работающих безотказно, от времени их эксплуатации (рис. 4).

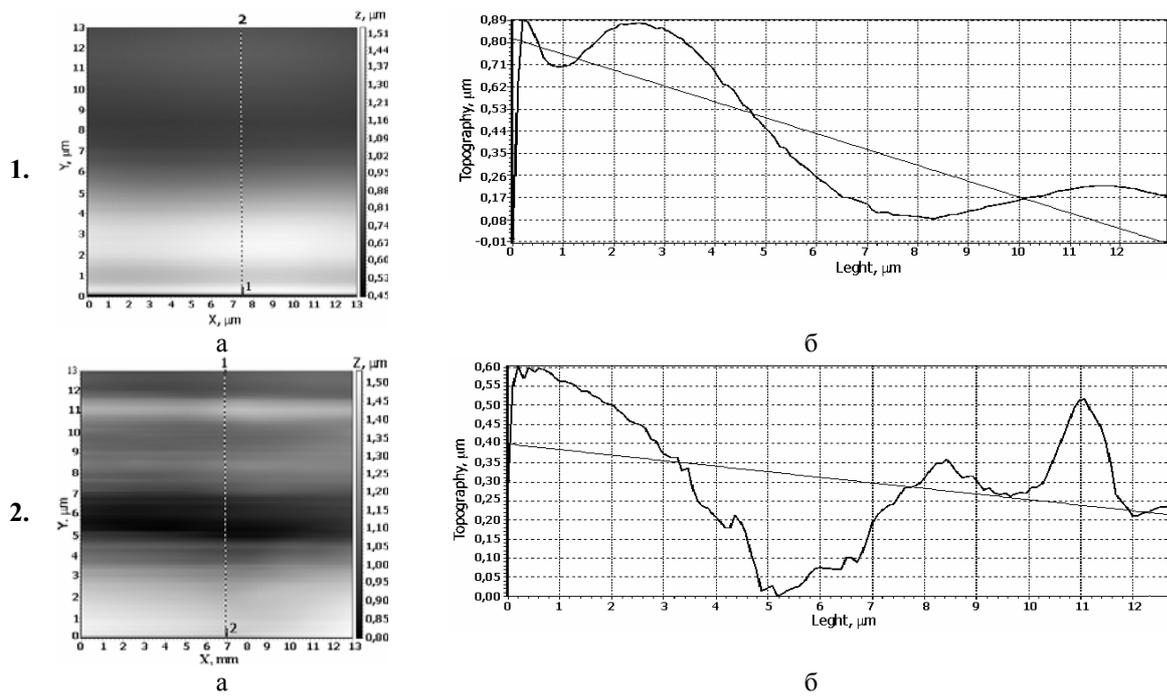


Рис. 2. Топография (а) и профиль вдоль линии 1 – 2 участка сканирования ($13 \times 13 \text{ мкм}^2$) (б) в начале (1) и после 12 лет (2) эксплуатации

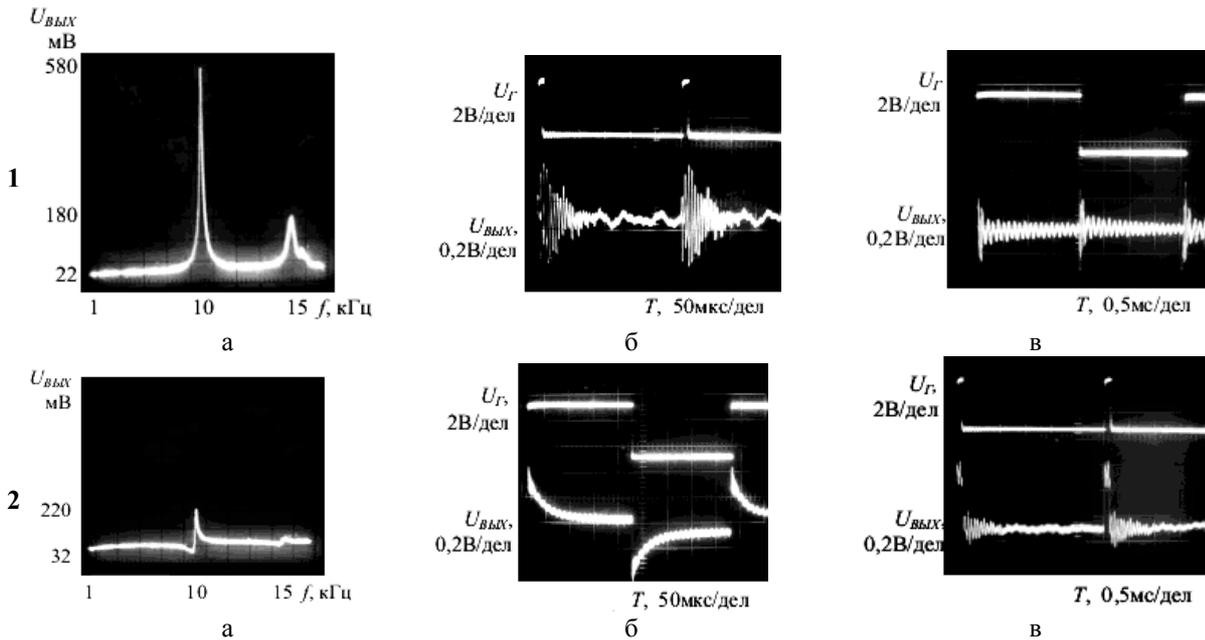


Рис. 3. Амплитудно-частотная (а), импульсная (б) и переходная (в) характеристики пьезоэлектрического датчика давления (ЦТС-19, диаметр 10 мм, толщина 0,3 мм) в начале (1) и после 12 лет (2) эксплуатации. X1-46

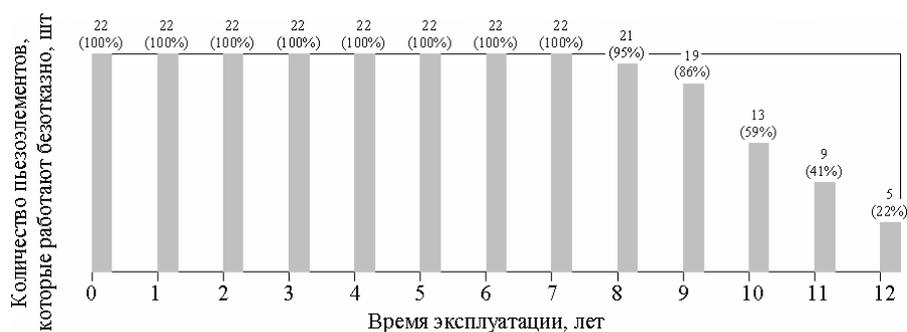


Рис. 4. Гистограмма зависимости количества безотказно работающих пьезоэлектрических преобразователей от времени их эксплуатации

Выводы

1. Впервые для анализа поверхности пьезоэлектрических преобразователей использован метод атомно-силовой микроскопии, который позволил на начальной стадии эксплуатации определять скрытые микродефекты (микротрещины, сколы, точки и т.п.) и микронеровности, которые не могут быть определены методами оптической и растровой электронной микроскопии.

2. Показано, что при эксплуатации пьезоэлектрических преобразователей происходит прогрессирование указанных выше дефектов (увеличение средних значений микронеровностей, развитие трещин), приводящих к преждевременному выходу их из строя.

3. Применение метода планирования экспериментов по результатам исследования пьезоэлектрических элементов медицинских приборов позволило проводить прогноз срока их безотказной эксплуатации согласно ОСТ 31-140. Для пьезоэлектрических преобразователей давления, применяемых в датчиках тонов Короткова, он составляет 8 лет.

Литература

1. Пьезоэлектрические преобразователи: Справочное пособие / В. М. Шарапов, И. Г. Минаев, М. П. Мусяенко, Ю. Ю. Бондаренко и др. / Под ред. В. М. Шарапова. Черкассы: ЧГТУ, 2004. 435 с.
2. <http://microtm.com>
3. <http://spmtips.com>
4. Фролов В. А. Анализ и оптимизация в прикладных задачах конструирования РЭС. К.: Выща школа, 1991. 310 с.