

## ДОСЛІДЖЕННЯ СПОСОБУ АКУСТИЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ НАНОПОКРИТТІВ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Ковалевський С. В., Коваленко Д. В.

В работе проанализирована литература, относительно методов измерения толщины покрытий. Выявлена проблема измерения покрытий малой толщины, нанопокровий. Для решения проблемы предложен новый способ измерения покрытий малой толщины с помощью созданного измерительного устройства, которое фиксирует значения амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) пьезоэлектрическим элементом. Проанализирована связь спектра акустического сигнала с покрытием малой толщины, нанопокровий. Выдвинута гипотеза о прогнозировании толщины покрытия на основе значений АЧХ полученных спектров акустических сигналов. Приведена принципиальная схема измерения покрытия малой толщины благодаря предложенному измерительному устройству: на измерительное устройство сигнал-генератор подает возбуждающее излучение в виде «Белого шума», в пьезоэлектрическом датчике происходит составление возбуждающего излучения, АЧХ которого имеет постоянную амплитуду на всем диапазоне излучения 20–20 000 Гц, и излучения, что относится к объекту измерения, то есть образца с покрытием. Приведена последовательность проведения эксперимента. В ходе экспериментальных исследований выявлена связь спектра акустического сигнала с входными и выходными данными. Создана модель нейронной сети на основе входных данных амплитудно-частотных характеристик и исходных данных толщины покрытия. На основе этой модели спрогнозированы значения толщины покрытия. При тарировке измерительного устройства рассчитаны отклонения от действительных значений толщины покрытия и построены графики.

**Ключевые слова:** нанопокровий, покрытие малой толщины, амплитудно-частотная характеристика, пьезоэлектрический излучатель, пьезоэлектрический датчик.

В роботі проаналізовано літературу, щодо методів вимірювання товщини покриттів. Виявлено проблему виміру покриттів малої товщини, нанопокриттів. Для вирішення проблеми запропоновано новий спосіб вимірювання покриттів малої товщини за допомогою створеного вимірювального пристрою, який фіксує значення амплітудно-частотних характеристик (АЧХ) п'єзоелектричним елементом. Проаналізовано зв'язок спектру акустичного сигналу з покриттям малої товщини, нанопокриття. Висунута гіпотеза щодо прогнозування товщини покриття на основі значень АЧХ отриманих спектрів акустичних сигналів. Приведено принципіальну схему вимірювання покриття малої товщини завдяки запропонованому вимірювальному пристрою: на вимірювальний пристрій сигнал-генератор подає збуджуюче випромінювання у вигляді «Білого шуму», в п'єзоелектричному датчику відбувається складання збуджуючого випромінювання, АЧХ якого має постійну амплітуду на всьому діапазоні випромінювання 20–20 000 Гц, і випромінювання, що відноситься до об'єкту вимірювання, тобто зразка з покриттям. Приведена послідовність проведення експерименту. В ході експериментальних досліджень виявлено зв'язок спектра акустичного сигналу з вхідними та вихідними даними. Створена модель в нейронній сеті на основі вхідних даних амплітудно-частотних характеристик та вихідних даних товщини покриття. На основі цієї моделі спрогнозовані значення товщини покриття. При тарировці

вимірювального пристрою розраховано відхилення від дійсних значень товщини покриття та побудовано графіки.

**Ключові слова:** нанопокриття, покриття малої товщини, амплітудно-частотна характеристика, п'єзоелектричний випромінювач, п'єзоелектричний датчик.

The paper analyzes the literature, methods of measuring the thickness of coatings. The problem of measurement of coatings of small thickness, nanocoatings is revealed. To solve the problem, a new method of measuring coatings of small thickness with the help of the created measuring device, which fixes the values of the amplitude-frequency characteristics of the piezoelectric element, is proposed. Analyzed a spectrum of the acoustic signal with a coating of small thickness, of the coating. A hypothesis is proposed to predict the coating thickness based on the values of the frequency response (amplitude-frequency characteristics) of the obtained acoustic signal spectra. The principal scheme for measuring the coating of small thickness due to the proposed measuring device is given: the signal-generator delivers exciting radiation in the form of "White noise" to the measuring device, the piezoelectric sensor composes the exciting radiation, the frequency response of which has a constant amplitude over the entire radiation range of 20–20 000 Hz and radiation, which refers to the object of measurement, that is a coated sample. The sequence of the experiment is given. In the course of experimental studies, the connection of the acoustic signal spectrum with the input and output data was revealed. The model of neural network is created on the basis of input data of amplitude-frequency characteristics and initial data of coverage thickness. Based on this model, the values of the coating thickness are predicted. When toreros measuring device calculated deviations from the actual values of the thickness of the coating and graphs.

**Keywords:** nano-coating, coating of small thickness, of the amplitude-frequency response, piezoelectric transducer, piezoelectric sensor.

Ковалевский С. В.

д-р техн. наук, проф., зав. каф. ТМ ДГМА  
[kovalevskii@ddma.donetsk.ua](mailto:kovalevskii@ddma.donetsk.ua)

Коваленко Д. В.

магістр ДГМА

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

УДК 621.7.08

**Ковалевський С. В., Коваленко Д. В.****ДОСЛІДЖЕННЯ СПОСОБУ АКУСТИЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ НАНОПОКРИТТІВ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

Збільшення терміну служби деталей являється основною проблемою сучасного машинобудування. Для збільшення терміну служби на деталь наносять зносостійкі покриття. Це покриття являється одним із основних показників довговічності машин. Саме нанесення зносостійких покриттів являється одним із методів захисту поверхонь від тертя і дозволяє одержувати різні властивості поверхні деталі. Важливою частиною довготривалої роботи деталей являється проведення випробовувань на зносостійкість цих покриттів. Для визначення зношення необхідно зафіксувати мікропроцеси, які відбуваються на поверхні деталі. В дослідженнях науковців, таких як В. В. Запорожця, В. М. Стадниченка, В. В. Токарука, О. М. Трошіна, В. В. Варварова [1–7], розглядаються мікропроцеси, що постійно змінюються на поверхні деталі, та для фіксування цих процесів використовуються методи неруйнівного контролю, які мають високу чутливість.

Традиційні методи випробувань є неприпустимими із-за незначної товщини покриттів, крім того, висока їх зносостійкість значно збільшує час проведення випробувань. Низька точність традиційних методів вимірювання зносу (лінійний, метод штучних баз, ваговий) вимагає багатократного проведення експериментів для підвищення точності і статистичної оцінки їх результатів [7].

Метою роботи є експериментальне дослідження виміру товщини покриття за допомогою створеного вимірювального пристрою.

Викладення основного матеріалу та результати дослідження.

Принцип роботи вимірювального інструменту (рис. 1).

Принцип роботи вимірювального пристрою, що зазначений на рис. 1 складається з наступного: стрижню (1) з масою  $m$ ; до стрижня приєднані п'єзоелектричний випромінювач (2) та п'єзоелектричний датчик (3). Завдяки масі  $m$  стрижня відбувається розділ сигналу випромінювача та датчика. На вимірювальний пристрій подається збуджуюче випромінювання (4). В п'єзоелектричному датчику відбувається складання збуджуючого випромінювання (4) у вигляді «Білого шуму», АЧХ якого має постійну амплітуду на всьому діапазоні випромінювання 20–20 000 Гц і випромінювання, що відноситься до об'єкту вимірювання, тобто зразка з покриттям.

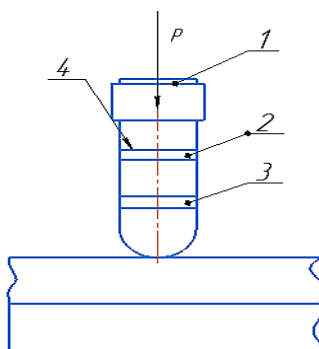


Рис. 1. Принципіальна схема роботи вимірювального пристрою

Методика проведення експерименту. Підготовка експериментального зразка. На металевий брус послідовно наносились шари скотчу товщиною 0,036 мм.

Обладнання: сигнал-генератор, випромінювання у вигляді «Білого шуму», яке уявляє собою комп'ютерну реалізацію на основі програми «Wavetools». Фіксування випромінювання проводилось аналізатором спектру частот "Spectrum Analyser", забезпечуючим отримання числових значень отриманого спектру.

Хід експерименту.

1. Кожний експериментальний зразок піддається впливу випромінюванням у вигляді «Білого шуму». Всього 36 проведених експериментів.

2. Одночасно з випромінюванням відбувається фіксація відбитого сигналу п'єзоелектричним датчиком.

3. Значення зафіксованих сигналів заноситься до таблиці (рис. 2).

	IB	IC	ID	IE	IF	IG	IH	II	IJ	IK	IL	IM	IN	IO	IP	IQ	IR	IS	IT	IU
1	x235	x236	x237	x238	x239	x240	x241	x242	x243	x244	x245	x246	x247	x248	x249	x250	x251	x252	x253	y
2	-100,87	-101,14	-100,99	-101,54	-101,92	-101,96	-103,05	-103,28	-102,75	-102,37	-102,98	-103,48	-103,70	-103,69	-104,38	-104,58	-104,56	-104,70	-104,73	0,000
3	-100,62	-100,45	-100,59	-100,95	-102,16	-103,08	-103,15	-103,53	-102,97	-102,84	-103,89	-103,88	-103,90	-104,62	-105,04	-104,82	-105,28	-104,93	-105,12	0,036
4	-100,60	-101,41	-102,01	-102,19	-102,01	-101,81	-101,56	-101,96	-102,31	-102,73	-103,48	-104,00	-104,19	-104,56	-104,64	-105,11	-105,33	-105,73	-105,35	0,072
5	-100,68	-101,17	-101,04	-101,02	-101,51	-102,47	-103,34	-103,51	-103,14	-103,65	-103,51	-103,91	-104,96	-105,20	-105,07	-105,74	-105,05	-104,71	-104,93	0,108
6	-101,02	-101,31	-102,03	-101,98	-101,29	-102,13	-101,86	-101,80	-102,85	-103,02	-103,52	-104,13	-104,45	-104,55	-104,40	-104,39	-105,20	-105,73	-106,60	0,144
7	-100,58	-100,41	-100,47	-101,64	-102,44	-102,04	-102,51	-102,71	-103,04	-103,15	-103,19	-103,00	-103,67	-104,43	-104,72	-104,59	-105,30	-105,46	-105,47	0,180
8	-100,85	-101,25	-101,54	-101,71	-101,64	-102,04	-102,45	-103,29	-104,36	-103,28	-103,19	-104,31	-104,54	-105,33	-105,36	-104,99	-104,71	-104,87	-104,78	0,216

Рис. 2. Скрін таблиці амплітудно-частотних характеристик (1)

4. У програмному пакеті "Neuro Pro 0.25" на основі цієї таблиці створюється ідентифікаційна модель.

Вербальний опис створеної моделі:

Поля базы данных (исходные симптомы):

X23

X26

X61

X87

X92

Поля базы данных (конечные синдромы):

Y

Предобработка входных полей БД для подачи сети:

$$X23 = (X23 - 83,02499) / 4,564999$$

$$X26 = (X26 - 82,81) / 5,209999$$

$$X61 = (X61 - 89,295) / 3,744999$$

$$X87 = (X87 - 91,96) / 3,110001$$

$$X92 = (X92 - 91,495) / 3,505001$$

Функциональные преобразователи:

$$\text{Сигмоида } I(A) = A / (0,1 + |A|)$$

Синдромы 1-го уровня:

$$\text{Синдром } I\_1 = \text{Сигмоида } I$$

$$(0,2962868 * X23 + 0,1067407 * X26 + 0,0783409 * X61 + 0,07598893 * X87 - 0,4640682 * X92)$$

$$\text{Синдром } I\_2 = \text{Сигмоида } I(0,1500107 * X23 + 0,235985 * X61 - 0,07926944 * X87 + 0,1991676 * X92)$$

$$\text{Синдром } I\_3 = \text{Сигмоида } I(-0,3051701 * X23 - 0,03021438 * X26 - 0,360007 * X87 - 0,2730105 * X92 + 0,2402003)$$

$$\text{Синдром } I\_4 = \text{Сигмоида } I(-0,1165219 * X23 - 0,3927959 * X26 - 0,1891425 * X61 - 0,2378429 * X87 + 0,01046448 * X92 - 0,25552)$$

$$\text{Синдром } I\_5 = \text{Сигмоида } I(-0,2838365 * X23 + 0,1300278 * X26 + 0,3682045 * X61 - 0,225384 * X87 - 0,2175666 * X92 + 0,3265038)$$

$$\text{Синдром } I\_6 = \text{Сигмоида } I(-0,1030892 * X23 - 0,2324729 * X26 + 0,2152782 * X61 - 0,35222 * X87 + 0,3822088 * X92 - 0,1716281)$$

$$\text{Синдром1}_7 = \text{Сигмоида1}(-0,339085 * X_{23} + 0,285337 * X_{26} - 0,3089929 * X_{61} - 0,1010632 * X_{87} + 0,02384765 * X_{92} - 0,06387841)$$

$$\text{Синдром1}_8 = \text{Сигмоида1}(-0,2821059 * X_{23} - 0,3178881 * X_{26} + 0,1523188 * X_{61} - 0,2808546 * X_{87} - 0,2695023 * X_{92})$$

$$\text{Синдром1}_9 = \text{Сигмоида1}(0,2078632 * X_{23} + 0,4126185 * X_{26} + 0,4103388 * X_{87} + 0,2982674 * X_{92})$$

$$\text{Синдром1}_{10} = \text{Сигмоида1}(0,169488 * X_{23} + 0,04215727 * X_{61} + 0,08944673 * X_{92} + 0,1907952)$$

$$\text{Синдром1}_{11} = \text{Сигмоида1}(0,4642057 * X_{23} - 0,2382526 * X_{26} + 0,1988963 * X_{61} - 0,03362518 * X_{87} - 0,2006584 * X_{92} + 0,2472871)$$

$$\text{Синдром1}_{12} = \text{Сигмоида1}(-0,1314721 * X_{23} - 0,09556841 * X_{26} + 0,3650046 * X_{61} + 0,3374763 * X_{87} + 0,3254097 * X_{92} - 0,3661447)$$

$$\text{Синдром1}_{13} = \text{Сигмоида1}(-X_{23} - X_{87} - 0,1559745 * X_{92})$$

$$\text{Синдром1}_{14} = \text{Сигмоида1}(-0,276848 * X_{23} + 0,05349867 * X_{26} + 0,0728122 * X_{61} - 0,3953856 * X_{87} + 0,3287603 * X_{92})$$

$$\text{Синдром1}_{15} = \text{Сигмоида1}(-X_{26} - X_{87} - 0,1841714 * X_{92})$$

$$\text{Синдром1}_{16} = \text{Сигмоида1}(X_{23} + X_{26} + 0,4948146 * X_{87} + 0,2364101 * X_{92})$$

Конечные синдромы:

$$Y = -0,5276254 * \text{Синдром1}_1 + 0,4689428 * \text{Синдром1}_2 + 0,4106373 * \text{Синдром1}_3 - 0,6332276 * \text{Синдром1}_4 - \text{Синдром1}_5 - \text{Синдром1}_6 - \text{Синдром1}_7 + \text{Синдром1}_8 - 0,4918566 * \text{Синдром1}_9 + 0,4858442 * \text{Синдром1}_{10} - \text{Синдром1}_{11} - 0,5624222 * \text{Синдром1}_{12} - 0,4784575 * \text{Синдром1}_{13} + 0,4896506 * \text{Синдром1}_{14} + 0,1672802 * \text{Синдром1}_{15} + 0,4292926 * \text{Синдром1}_{16} - 0,09091993$$

Постобработка конечных синдромов:

$$Y = ((Y * 1,2960000038147) + 1,2960000038147) / 2$$

5. На основі створеної моделі тестуються результати виміру покриття цього ж експериментального зразка. Похибка вимірювань відображена на рис. 3.

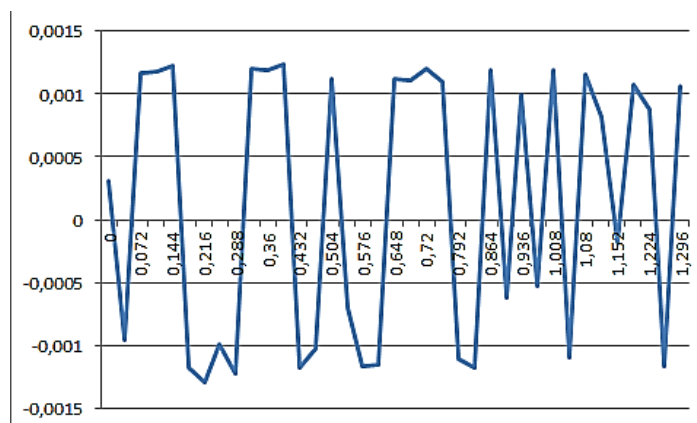


Рис. 3. Графік похибки вимірювань

З проведеного експерименту видно, що пристрій вимірює товщину покриття з похибкою  $\pm 0,00125$  мм.

Для практичного підтвердження роботи вимірювального пристрою проводимо вимір товщини епіламіюваного покриття.

Проводяться виміри нанесеного покриття на дев'яти зразках та результати заносяться до таблиці (рис. 4).

▲	IB	IC	ID	IE	IF	IG	IH	II	IJ	IK	IL	IM	IN	IO	IP	IQ	IR	IS	IT	IU
1	x235	x236	x237	x238	x239	x240	x241	x242	x243	x244	x245	x246	x247	x248	x249	x250	x251	x252	x253	γ
2	-90,88	-91,15	-91,08	-90,7	-90,88	-91,66	-92,87	-93,09	-93,3	-93,47	-94,27	-94,91	-94,59	-94,63	-95,03	-94,56	-94,28	-94,51	-103,01	
3	-91,47	-91,89	-91,79	-92,77	-92,85	-91,97	-92,15	-93,06	-94,32	-94,32	-94,02	-94,81	-95,43	-95,19	-95,21	-95,36	-95,56	-95,64	-102,86	
4	-91,41	-91,53	-91,89	-92	-92,57	-92,62	-93,04	-93,05	-93,49	-93,53	-94,12	-94,58	-95,62	-96,94	-96,31	-95,13	-95,37	-95,52	-102,95	
5	-92,21	-91,96	-92,11	-91,89	-92,44	-92,64	-92,63	-93,65	-94,21	-94,34	-94,35	-94,95	-95,69	-95,87	-96,26	-96,5	-96,63	-96,65	-104,49	
6	-90,85	-91,75	-91,9	-91,51	-91,83	-91,91	-91,68	-92,36	-93,66	-93,53	-93,74	-94,23	-94,73	-95,11	-95,13	-94,65	-94,16	-93,87	-103,05	
7	-90,04	-91,23	-91,78	-92,19	-92,23	-92,02	-93,15	-93,89	-94,17	-95,21	-94,78	-94,52	-94,35	-94,91	-94,9	-94,72	-94,86	-95,38	-102,19	
8	-91,32	-91,37	-91,51	-92,67	-92,48	-92,38	-93,77	-93,82	-93,87	-94,1	-94,32	-94,84	-94,53	-95,11	-95,54	-95,33	-95,14	-95,51	-102,95	
9	-91	-91,67	-92,01	-92,11	-92,27	-92,51	-92,72	-93,51	-93,52	-93,52	-94,35	-94,47	-93,98	-94,65	-94,31	-95,3	-94,6	-93,93	-103,33	
10	-90,83	-91,24	-91,2	-91,56	-92,55	-93,02	-92,74	-93,73	-94,35	-94,84	-94,7	-95,04	-95,36	-94,65	-94,91	-95,73	-95,31	-95,55	-102,29	

Рис. 4. Скрін таблиці амплітудно-частотних характеристик (2)

Таблиця з даними завантажується в "Neuro Pro" та тестується на створеній вже ідентифікаційній моделі. Таким чином знаходимо значення товщини покриття S (рис. 5).

Таблиця 1

## Значення товщини покриття

№ зразка	Товщина покриття
1	0,1150351
2	0,1085265
3	0,1088137
4	0,1059736
5	0,1048312
6	0,1074473
7	0,1068053
8	0,1048432
9	0,1037230

Таким чином даний вимірювальний пристрій виміряв товщину епіламіюваного покриття з похибкою  $\pm 0,00125$  мм.

## ВИСНОВКИ

З проведеного експерименту можна стверджувати, що за даними спектрами можливо визначити товщину покриття. Даний спосіб та вимірювальний пристрій працюють. Цей спосіб дозволить виміряти товщину будь-якого покриття, при цьому не вимагаючи великого часу та додаткових витрат.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Запорожець В. В. Критерії оцінювання механізму дисипації енергії та прогнозування ресурсу при акустоемісійній діагностиці аксіально-пориневих гідромашин / В. В. Запорожець, В. М. Стадніченко, В. В. Токарук // Проблеми тертя та зношування. – 2010. – Вип. 54. – С. 5–18.
2. Трошин О. М. Трибологія зносостійких покриттів / О. М. Трошин // Системи озброєння та військова техніка. – 2007. – № 1 (9). – С. 116–118.
3. Акустична емісія напівпровідників та діодних структур (огляд) / О. І. Власенко, М. П. Киселюк, В. П. Велешук, З. К. Власенко, І. О. Ляшенко, О. В. Ляшенко // Оптоелектроніка і напівпровідникова техніка. – 2014. – Вип. 49. – С. 8–14.
4. Космач О. П. Спектральний аналіз модельних сигналів акустичної емісії під час зміни навантаження пари тертя із композиційних матеріалів / О. П. Космач // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія : Технічні науки. – 2014. – № 1. – С. 70–79.
5. Німченко Т. В. Застосування акустичної емісії як одного з засобів технічного захисту / Т. В. Німченко // Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ" : зб. наук. пр. Темат. вип. : Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ "ХПІ". – 2015. – № 21 (1130). – С. 50–56.
6. Ковтун І. І. Неруйнівний контроль і прогнозування характеристик міцності і пластичності матеріалів методом акустичної емісії / І. І. Ковтун, В. П. Ройзман, А. В. Горошко // Надійність машин і прогнозування їх ресурсу. – 2000. – С. 4–5.
7. Прискорена методика визначення зносостійкості нанопокриттів в трібосистемах з використанням інформативних параметрів акустичної емісії / В. В. Запорожець, В. М. Стадніченко, О. М. Трошин, В. В. Варваров, М. Г. Стадніченко // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних сил. – 2010. – Вип. 3. – С. 1–6.