МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ
до виконання лабораторної роботи

«Дослідження дисипативних властивостей та характеристик поверхневого шару наноструктурних покриттів пера лопаток компресора»

для студентів спеціальності
G9 «Прикладна механіка»
освітньої програми «Технології машинобудування»
усіх форм навчання

2025

Методичні рекомендації до виконання лабораторної роботи «Дослідження дисипативних властивостей та характеристик поверхневого шару наноструктурних покриттів пера лопаток компресора» для студентів спеціальності G9 «Прикладна механіка» освітньої програми «Технології машинобудування» усіх форм навчання / Укл. доц. Пухальська Г.В. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2025 – 14 с.

Укладачі: Пухальська Г.В., к.т.н., доц. каф. ТМБ

Рецензент: Козлова О.Б., к.т.н., доцент кафедри ТМБ

Відповідальний за випуск Дядя С.І., к.т.н., доцент, зав. каф. ТМБ

Затверджено на засіданні кафедри
«Технологія машинобудування»
Протокол № 1
від 06.08.2025 р.

Рекомендовано до видання
НМК МФ
Протокол № 1 від 26.08.2025 р.

1 Мета роботи

Дослідити дисипативні властивостей та характеристики поверхневого шару наноструктурних покриттів пера лопаток компресора.

2 Необхідне обладнання та матеріали

2.1 Віброелектродинамічний стенд ВЕДС-400.
2.2 Прилад «Hoummelwave T8000».
2.3 Мікротвердомір LECO LM-248AT, оснащений системою автоматичного вимірювання твердості AMH-4.
2.3 Лопатки III ступ. КНТ дв. Д-36 із титанового славу ВТ3-1 з наноструктурними покриттями із міді та срібла.
2.4 Методичні вказівки до лабораторних робіт.

3 Загальні положення та відомості

Одним з найбільш важливих техніко-економічних показників якості виробів машинобудування є забезпечення їх вібраційної надійності. Однак в більшості випадків внаслідок значної щільності частот власних і вимушених коливань при експлуатації даних об'єктів неможливо уникнути небезпечних резонансних режимів. Тому використовують різні конструктивно-технологічні способи, що знижують небезпеку їх наслідків, серед яких визначальним є підвищення демпфуючої здатності як засобу обмеження максимальних резонансних напружень конструктивних елементів.

Стосовно до робочих лопаток компресорів ГТД, що виготовляються з високоміцних з низькими значеннями дисипативних властивостей титанових сплавів, одним з ефективних способів підвищення вібраційної надійності є нанесення на перо високодемпфуючих покриттів.

Разом з тим ефективної дисипації енергії коливань можна досягти також шляхом осадження тонких покриттів з високодемпфуючих матеріалів на поверхню деталей, що піддаються інтенсивним вібраційним навантаженням, наприклад на лопатки компресора ГТД.

Наноматеріали - це матеріали, що містять структурні елементи, геометричні розміри яких хоча б в одному напрямку не перевищують нанотехнологічної межі - 100 нм, які мають якісно інші в порівнянні з традиційними матеріалами фізичні, хімічні, механічні і біологічні властивості, функціональні та експлуатаційні характеристики.

Основні методи отримання наноматеріалів можна розділити на ряд технологічних груп: методи на основі порошкової металургії, методи, в основі яких лежить отримання аморфних станів, поверхневі технології (створення покриттів і модифікованих шарів з наноструктурою), методи, засновані на використанні інтенсивної пластичної деформації, і комплексні методи, які використовують послідовно або паралельно кілька різних технологій.

Формування нанокристалічних структур приводить до зміни властивостей в порівнянні з масивними аналогами, зокрема, до значного підвищення механічних характеристик нанокристалічних матеріалів, серед яких, в першу чергу, необхідно відзначити надзвичайно високу твердість.

Поєднання підвищеної міцності з високим рівнем дисипації механічної енергії матеріалів в наноструктурованому стані представляється перспективним для створення на їх основі захисних покриттів, які забезпечили б не тільки демпфування коливань деталей складних механічних систем, але і захист їх поверхні від механічних ушкоджень.

Зі зменшенням температури осадження змінюється внутрішня будова кристалітів, що проявляється в утворенні прошарку з двійникових доменів, розташованих переважно паралельно фронту зростання кристалітів. Кількість таких двійників різко зростає з пониженням температури осадження починаючи з $T \approx 350^0$C. При подальшому зниженні температури їх кількість збільшується, що приводить до формування в кристалітів нанодвійникової субструктури.

Об'єкт дослідження - лопатки третього ступеня компресора

низького тиску двигуна Д-36 з титанового сплаву ВТ3-1, з нанесеним на перо лопаток наноструктурним покриттям із срібла та міді. Поверхня пера остаточно оброблена кульками в ультразвуковому полі (УЗЗ) за серійною технологією до нанесення покриття.

Покриття з міді та срібла (Ag+6% Cd) отримували методом електронно-променевого випаровування і конденсації матеріалу покриття в вакуумі. Товщина покриття близько 10 мкм. Покриття осаджували на частину пера лопатки, що піддається максимальній напрузі в експлуатації.

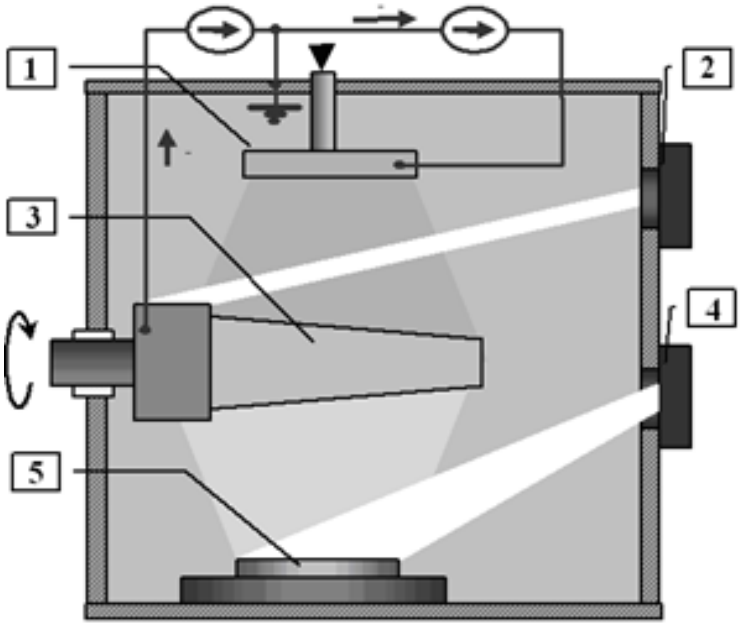

Рисунок 3.1 – Схема процесу осадження покриттів: 1 – джерело іонів + Ar; 2, 4 – електронно-променева гармата; 3 – титанова лопатка; 4 - електронна гармата випаровування металу;
5 – злиток металу, що випаровується

На початковому етапі процесу осадження покриття, за

допомогою електронно-променевої гармати 2, проводився нагрів лопатки до температури осадження 300^0С, потім за допомогою іонного джерела 1 проводилось очищення поверхні лопатки. За допомогою електронно-променевої гармати 4 нагрівався злиток з матеріалом покриття 5. Внаслідок бомбардування поверхні електронним пучком, матеріал нагрівався до температури, при якій відбувається його випаровування з необхідною швидкістю. В утворений потік поміщувалась підкладка 3, на яку конденсувалась випаровуюча речовина. Приклад титанових лопаток з конденсатами міді представлений на рис. 3.2.

Рисунок 3.2 - Лопатки з покриттям наноструктурною міддю

Випробування з визначення демпфуючої здатності покриттів проводили на віброелектродинамічному стенді ВЕДС-400, що дозволяє збуджувати та стабільно підтримувати коливання лопаток за основним тоном з необхідним рівнем навантаження. Установка обладнана комплектом контрольно-вимірювальної апаратури для вимірювання і контролю параметрів процесу втомних випробувань. Випробування проводили на вихідних лопатках (УЗЗ) і лопатках з покриттям з наноструктурованої міді і срібла.

Вимірювання параметрів шорсткості Rz і Ra робочих поверхонь лопаток після УЗЗ і з покриттям наноструктурною міддю виконували

на приладі «Hoummelwave T8000» вздовж і впоперек вісі лопаток.

Заміри твердості проводилися на мікротвердомірі LECO LM-248AT, оснащеному системою автоматичного вимірювання твердості AMH-43. В якості індентора використовувався алмазний накінечник у формі правильної чотиригранної піраміди з кутом між протилежними гранями 136^0. До індентора додавалося навантаження 0,5 Н з витримкою зусилля протягом 15 с.

4 Порядок виконання лабораторної роботи

Дослідження дисипативних властивостей покриттів проводити в такій послідовності: встановити і закріпили стійку на столі вібратора, забезпечити щільне прилягання нижньої поверхні стійки до поверхні столу. Встановити лопатку в затиск, забезпечивши однакову величину зусилля затиснення (рис. 4.1). Знайшовши частоту власних коливань лопатки, вивести на амплітуду коливань 2А=7 мм, що відповідає напрузі у найбільш навантаженій зоні пера б=400 Н/мм^2.

Енергію, необхідну для навантаження лопаток однаковим рівнем деформації (2А=7 мм) визначали за величиною потужності, що підводиться, шляхом зміни сили струму і напруги, що подаються на вібростенд. Слід зазначити, що в процесі навантаження лопаток з плином часу величини сили струму і напруги, необхідні для підтримання однакового рівня деформації лопатки змінюються. Стабілізація цих величин відбувається через 30 хв після початку навантаження. Тому, реєстрацію показань вольтметра і амперметра виконувати на початку випробувань і після напрацювання 10, 20 і 30 хвилин. Результати вимірювань занести в табл. А.1, дод. А.

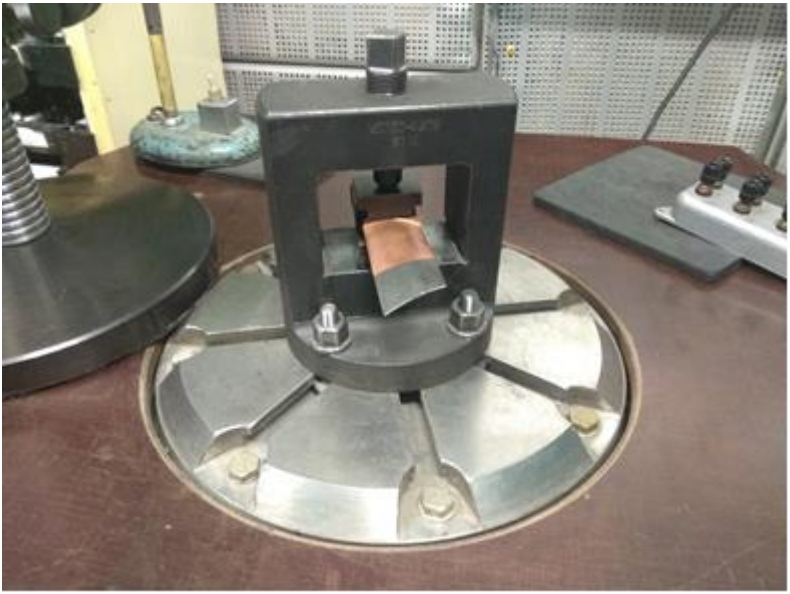

Рисунок 4.1 - Лопатка з покриттям із міді, закріплена на стенді ВЕДС-400

Вимір параметрів шорсткості Rz та Ra на лопатках виконувати за схемою, що представлена на рис. 4.2. Виміри проводити на вихідних лопатках (після УЗЗ) та лопатках з покриттям (УЗЗ + Cu). Результати вимірювань занести в табл. А.2, дод. А.

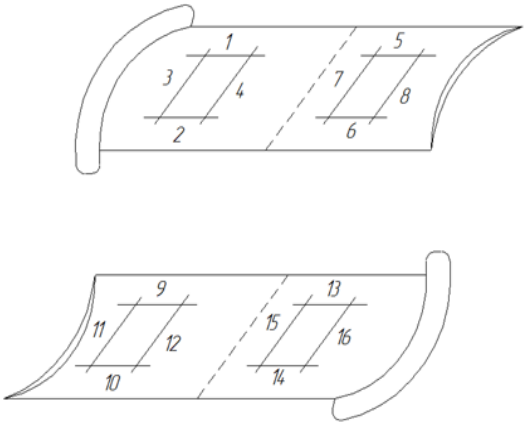

Рисунок 4.2 - Схема виміру шорсткості поверхні лопаток (1…16 – напрям та порядок вимірів)

Зразки для вимірювання мікротвердості вирізати на електроерозійному верстаті з найбільш плоских ділянок профільної частини лопаток (рис. 4.3). Виміри твердості зразків з покриттям міддю і без проводити в трьох зонах і в перерізі у поверхні з кроком 30 мкм. Отримані результати записати в табл. Б.1 та Б.2, дод. Б. Величину мікротвердості визначити як середнє значення п'яти відбитків індентора.

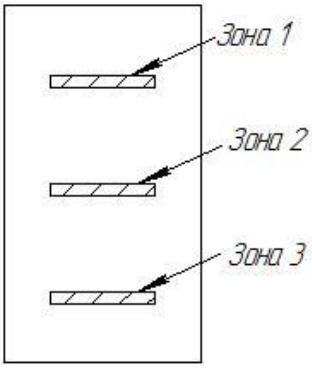

Рисунок 4.3 - Схема виміру мікротвердості поверхні зразків

5 Контрольні питання

5.1 Що таке дисипація енергії?

5.2 Назвіть основні елементи конструкції установки для нанесення покриттів?

5.2 Що таке мікротвердість?

5.3 Як наносили покриття на лопатки?

5.4 Дати визначення наночастини?

5.5 Назвіть прибор, на якому вимірювали шорсткість поверхні?

5.6 Поясніть принцип роботи профілографа-профілометра.

5.4 Поясніть принцип роботи мікротвердоміра?

5.5 Як працює віброелектродинамічний стенд ВЕДС-400?

6 Вимоги з техніки безпеки

6.1 У аудиторіях, слід строго виконувати правила внутрішнього розпорядку.

6.2 Помітивши порушення інструкції іншими особами або небезпеку для навколишнього середовища, повідомити викладача.

6.3 При виявленні запаху гару негайно вимкнути апаратуру, удруге не включати і звернутися до викладача.

6.4 Оглянути і переконатися в справності обладнання, електропроводки. У разі виявлення несправностей до роботи не приступати.

6.5 Перевірити наявність і надійність захисного заземлення обладнання.

6.6 Використовувати всі засоби захисту, такі як окуляри, навушники або інші засоби, передбачені інструкцією з експлуатації.

6.7 Перед початком роботи на устаткуванні переконатися, що електроустаткування відповідає стандартам безпеки та правильно підключено.

6.8 Перед використанням переконайтеся, що вимірювальне обладнання в хорошому стані правильно налаштоване і каліброване.
6.9 При роботі зі зразками треба бути обережними з гострими кромками, щоб уникнути порізів або травм.
6.10 При фіксації зразка для вимірювання переконатися, що він встановлений стабільно та безпечно, щоб уникнути його падіння або усунення в процесі вимірювання.
6.11 Перед використанням ознайомтеся з інструкціями з експлуатації конкретного приладу. Це дозволить правильно налаштувати та використати прилад, а також уникнути помилок.
6.12 Переконайтеся, що робоча область, де проводяться вимірювання, є чистою та безпечною. Уникайте наявності сторонніх предметів, які можуть стати на заваді процесу вимірювання. Встановіть прилад так, щоб він був стабільним і надійно закріпленим. Це допоможе уникнути зсувів та спотворень результатів вимірювань.
6.13 Забезпечте правильну підготовку зразка перед вимірюванням мікротвердості. Переконайтеся, що поверхня зразка чиста та підготовлена відповідно до вимог.
6.14 Розробіть процедури запобігання аваріям і знайте, як діяти у разі надзвичайної ситуації.

Забороняється

6.15 Залишати своє робоче місце без відома викладача.
6.16 Вмикати і вимикати (крім аварійних випадків) устаткування і механізми, робота на яких не доручена.
6.17 Працювати та ремонтувати несправне устаткування.
6.18 Торкатися до струмопровідних частин, електричних дротів (навіть ізольованих), кабелів, клем, наступати на переносні дроти на підлозі.
6.19 Відволікатися сторонніми справами і розмовами, ходити по приміщенню, відволікаючи інших.

Перелік джерел посилання

1. Sordelet D.J., Kim J.S., Besser M.F. Dryslidin go fpoly-grained quasicrystalinne and crystalline Al–Cu–Fe alloys //Mat. Res. Soc. Symp. Poc. 1999. V. 553. P. 459–470.

2. Paton B.E., Movchan B.A. Composite Materials Deposited from the Vapour Phase in Vacuum Soviet Technologies (Review) //Weld and Surfacing. 1991. №2. P. 43–64.

3. Мікроскопія в нанотехнологіях [Текст]: / В.С. Антонюк, Г.С. Тимчик, О.В. Верцанова [та ін.] //– К. : НТТУ «КПІ», 2014. – 258 с. : іл.– 157. Бібліогр. :С.245-258.

4. Геворкян Е.С., Тимофеєва Л.А., Нерубацький В.П. Інтегровані технології обробки матеріалів, Харків, 2016.

ДОДАТКИ

Додаток А

Таблиця А.1 – Результати визначення енергії, необхідної для навантаження лопаток амплітудою коливання 2А=7 мм

Стан лопаток, інд. номер	Напрацювання, хв												F Гц
	Спочатку			10			20			30			
	U, В	I, А	P, Вт	U, В	I, А	P, Вт	U, В	I, А	P, Вт	U, В	I, А	P, Вт	
Вихідна (УЗЗ) 1.													
Вихідна (УЗЗ) 2.													
Покриття (УЗЗ+Ag) 1.													
Покриття (УЗЗ+Ag) 2.													
Покриття (УЗЗ+Cu) 1.													
Покриття (УЗЗ+Cu) 2.													

Таблиця А.2 – Результати вимірів шорсткості поверхні лопаток вихідних (УЗЗ) та покритих міддю (УЗЗ+Cu)

Спинка						Корито				Середнє значення R_a, мкм	Середнє значення R_z, мкм
		R_a, мкм		R_z, мкм		R_a, мкм		R_z, мкм			
Покриття (УЗЗ+Cu)	вздовж вісі										
	поперек вісі										
вихідна (УЗЗ)	вздовж вісі										
	поперек вісі										

Додаток Б

Таблиця Б.1 – Значення мікротвердості зразків

		Зона 1		Зона 2		Зона 3	
		Твердість HV0.05	Діагональ відбитку мм	Твердість HV0.05	Діагональ відбитку мм	Твердість HV0.05	Діагональ відбитку, мм
Вихідний зразок (УЗЗ)	1						
	2						
	3						
	4						
	5						
Середнє							
Зразок з покриттям (УЗЗ+Cu)	1						
	2						
	3						
	4						
	5						
Середнє			-		-		-

Таблица Б.2 - Значення мікротвердості зразків в перерізі біля поверхні

		Відстань, мм	Твердість HV0.05	Діагональ, мм		Відстань, мм	Твердість HV0.05	Діагональ, мм
Вихідний зразок (УЗЗ)	1	0,03			Зразок з покриттям (УЗЗ+Cu)	0,03		
	2	0,06				0,06		
	3	0,09				0,09		
	4	0,12				0,12		
	5	0,15				0,15		
	6	0,18				0,18		