



УКРАЇНА
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
(ЗНТУ)

РЕЦЕНЗІЯ

на дипломний проект Дослідження дисипативних властивостей та характеристик поверхневого шару наноструктурованих покриттів пера лопаток ГТД.

(вказати тему дипломного проекту (роботи))

Студент Щербина М.А.

Спеціальність «131 Прикладна механіка», група М-113м

Обсяг проекту повний

Кількість аркушів креслень -

Кількість сторінок пояснювальної записки 95 сторінок

а) короткий зміст проекту та прийнятих рішень в проекті розглянуто теоретичні дані, стосовно теми дослідження, зроблено літературний огляд, описано методику проведення досліджень та результати, які отримані.

б) висновок про відповідність проекту завданню зміст магістерської роботи повністю відповідає завданню.

в) характеристика виконання кожного розділу дипломного проекту, рівень відповідності останнім досягненням науки та техніки і передовим методам роботи
магістерська робота повністю відповідає рівню останніх досягнень науки та передових методів роботи.

г) негативні особливості виконання проекту в роботі не сформульована новизна проведених досліджень.

д) позитивні особливості всі дослідження проведено на натурних лопатках ГТД в умовах реального виробництва.

е) оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки до проекту пояснювальна записка до проекту містить всі необхідні розділи; зміст відповідає завданню, а оформлення за стандартами та ДОСТами.

є) відгук про роботу загалом робота має науково-практичну цінність. Результати можуть бути рекомендовані до впровадження у виробничий процес.

ж) інші зауваження немає

з) оцінка проекту робота виконана на високому науково-технічному рівні, а магістр – Щербина Марія Андріївна заслуговує на оцінку відмінно.

Рецензію склав доц. Козлова О.Б.

(посада, місце роботи, прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

«04» грудня 2018 р.

[12:17:39] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №617 [4] (100027 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло)

[12:17:49] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №622 [4] (100027 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло)

[12:18:09] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №627 [4] (100027 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло)

[12:18:19] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №632 [4] (100027 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло)

[12:18:29] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №637 [4] (100027 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло)

[12:18:39] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №642 [4] (100027 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло)

[12:20:29] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №647 [4] (100027 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло)

[12:20:39] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №652 [4] (100027 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло)

[12:21:19] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №657 [4] (100027 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло)

[12:24:09] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №662 [4] (100027 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло)

[12:24:20] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №667 [4] (100027 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло)

[12:24:30] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №672 [4] (100027 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло)

[12:24:50] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №677 [4] (100027 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло)

[12:25:00] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №682 [4] (100027 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло)

[12:25:15] Тип проверки: *Стандартная*

[12:25:16] **ВНИМАНИЕ! Уникальность может быть определена некорректно! (Обнаружено ошибок: 42%)**

[12:25:17] **Уникальность текста 90%[©] (Проигнорировано подстановок: 13%)**

Перевірку на плагіат програмою AntiPlagiarism.NET, магістерської роботи Щербіна М.А., провів зав. лаб. каф. ТМБ Паміров В.М.

03.12.2018р.



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Машинобудівний

(повне найменування інституту, назва факультету)

Технології машинобудування

(повна назва кафедри)

Пояснювальна записка

до магістерської роботи

магістр

(ступінь вищої освіти (освітній ступінь))

на тему Дослідження дисипативних властивостей та характеристик
поверхневого шару наноструктурованих покриттів пера лопаток ГТД

Виконав: студент 6 курсу, групи М-113м
спеціальності (напряму підготовки)

131 Прикладна механіка

(код і назва напряму підготовки, спеціальності)

Щербини М.А.

(прізвище та ініціали)

Керівник Пухальська Г.В., доц.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Козлова О.Б., доц.

(прізвище та ініціали)

м.Запоріжжя
2018 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Запорізький національний технічний університет
 (повне найменування вищого навчального закладу)

Інститут, факультет Машинобудівний
 Кафедра Технології машинобудування
 Ступінь вищої освіти (освітній ступінь) магістр
 Спеціальність 131 Прикладна механіка
 Напрямок підготовки _____
 (код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____

“ ____ ” _____ 20 ____ року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТУ

Щербині Марії Андріївні

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Дослідження дисипативних властивостей та характеристик
поверхневого шару наноструктурованих покриттів пера лопаток ГТД
 керівник проекту (роботи) Пухальська Г.В., к.т.н., доцент,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “26” 11 2018 року № 366

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 03.12.18

3. Вихідні дані до проекту (роботи) креслення деталі

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) теоретичний аналіз проблеми, дослідження демпфуючої здатності покриттів, методика досліджень, результати досліджень та їх аналіз, охорона праці.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Графічний матеріал представлений у вигляді
презентації.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
Нормоконтроль	Дядя С.І.	02.02.18	26.11.18
Охорона праці	Шмирко В.І.	10.10.18	24.11.18

7. Дата видачі завдання 02.02.18

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Теоретичний аналіз проблеми, відомості про наноматеріали, їх властивості	21.02.18	
2	Способи формування покриттів	05.03.18	
3	Опис методики досліджень	21.04.18	
4	Випробування на втому та визначення дисипативних властивостей	30.05.18	
5	Заміри мікротвердості	15.06.18	
6	Виміри параметрів шорсткості	30.06.18	
7	Виконання модального аналізу	21.07.18	
8	Рентгенструктурні дослідження	27.08.18	
9	Збір даних з охорони праці	18.10.18	

Студент

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи)

(підпис)

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

ПЗ: 95 стор., 35 рис., 13 табл., 46 джерел.

Об'єкт дослідження - лопатки третього ступеня компресора низького тиску двигуна Д-36 з титанового сплаву ВТЗ-1, з нанесеним на перо лопаток наноструктурованим покриттям із срібла та міді. Поверхня пера остаточно оброблена кульками в ультразвуковому полі (УЗЗ) за серійною технологією до нанесення покриття.

Метою роботи є дослідження характеристик поверхневого шару та дисипативних властивостей наноструктурованих покриттів лопаток ГТД.

Наведено результати досліджень дисипативних властивостей наноструктурованих покриттів з міді та срібла на робочі поверхні лопаток, які свідчать, що лопатки мають більшу демпфуючу здатність, ніж вихідні без покриття; причому конденсати з наноструктурованої міді приводять до більшої дисипації енергії. Покриття не погіршує якість поверхні і не приводить до зміни твердості підшарової області і серцевини. Також встановлено, що покриття пера лопаток з наноструктурованої міді і срібла не приводить до зниження витривалості лопаток і не змінює частоту власних коливань лопатки.

Встановлено, що нанесення покриття з наноструктурованої міді на перо лопатки приводить до значного підвищення демпфуючої здатності лопаток і забезпечує сприятливі характеристики поверхневого шару, що дозволяє розглядати його в якості можливої складової композитних захисних покриттів лопаток ГТД.

НАНОСТРУКТУРОВАНІ ПОКРИТТЯ; ДИСИПАТИВНІ ВЛАСТИВОСТІ;
ШОРСТКІСТЬ; ЛОПАТКА; МІКРОТВЕРДІСТЬ.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів.....	6
Вступ.....	7
1 Теоретичний аналіз проблеми.....	9
1.1 Основні відомості про наноматеріали.....	9
1.2 Класифікація наноматеріалів.....	10
1.3 Методи отримання наноматеріалів.....	16
1.4 Способи формування плівок і покриттів.....	17
1.5 Властивості наноматеріалів.....	21
1.5.1 Механічні властивості.....	21
1.5.2 Термодинамічні властивості.....	25
1.5.3 Магнітні властивості.....	26
1.6 Дослідження демпфуючої здатності іонно-плазмових покриттів.....	28
2 Методика досліджень.....	47
3 Результати досліджень та їх обговорення.....	52
4 Охорона праці.....	68
4.1 Аналіз потенційних небезпек.....	68
4.2 Заходи з забезпечення безпеки.....	71
4.3 Заходи з забезпечення виробничої санітарії та гігієни праці.....	74
4.4 Заходи з пожежної безпеки.....	79
4.5 Заходи з забезпечення безпеки у надзвичайних ситуаціях.....	82
Висновки.....	88
Перелік посилань.....	90

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ГТД - газотурбінний двигун;

ВГ – віброгалтовка;

ВП – віброполірування;

ВПТВЕ - вакуумно-плазмова технологія високих енергій;

УЗЗ - ультразвукове зміцнення;

ПК - персональний комп'ютер;

КПО - коефіцієнт природної освітленості;

НС - надзвичайна ситуація;

ЦО - цивільна оборона;

НЦО - начальник цивільної оборони.

ВСТУП

У зв'язку з розвитком сучасного машинобудування високі вимоги висуваються до надійності й довговічності як окремих конструктивних елементів, так і машин в цілому. Оскільки більшість з них експлуатуються в умовах широкого спектра динамічних навантажень, які можуть викликати вихід з ладу і руйнування конструктивних елементів, а також привести до катастрофічних наслідків, одним з ключових завдань досягнення надійного функціонування протягом необхідного ресурсу є забезпечення їх динамічної міцності. Особливо актуально це для авіаційних газотурбінних двигунів (ГТД), більшість дефектів у яких, що виявляються при проектуванні, доведенні і експлуатації, обумовлені недостатньою міцністю вузлів і конструктивних елементів і в першу чергу робочих лопаток.

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 [1].

Разом з тим ефективною 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 [2, 3].

Реалізувати цей підхід важко, так як необхідно використовувати матеріали з високими значеннями межі витривалості, твердості і, в той же час, високим рівнем демпфування.

У розроблених раніше [2] високодемпфуючих матеріалів необхідний комплекс властивостей відсутній, що перешкоджає їх застосуванню в якості покриттів для деталей ГТД.

Метою роботи є дослідження дисипативних властивостей і характеристик поверхневого шару наноструктурованих покриттів лопаток ГТД.

За результатами роботи надрукована стаття в науковий журнал «Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні» №1 2018 рік (с.6-15).

1 ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ

1.1 Основні відомості про наноматеріали

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.

Основними складовими науки про наноматеріали і нанотехнології є:

- фундаментальні дослідження властивостей матеріалів на наномасштабному рівні;
- розвиток нанотехнології як для цілеспрямованого створення наноматеріалів, так і пошуку, і використання природних об'єктів з наноструктурними елементами;
- створення готових виробів з використанням наноматеріалів і інтеграція наноматеріалів і нанотехнологій в різні галузі промисловості і науки;
- розвиток засобів і методів дослідження структури і властивостей матеріалів, а також методів контролю і атестації виробів і напівфабрикатів для нанотехнології.

Початок XXI століття ознаменувався початком розвитку нанотехнологій і наноматеріалів. Вони вже використовуються у всіх розвинених країнах світу в найбільш значущих сферах людської діяльності (промисловості, оборони, інформаційній сфері, радіоелектроніці, енергетиці, транспорті, біотехнології, медицині). Аналіз зростання інвестицій, кількості публікацій з даної тематики і темпів впровадження фундаментальних і пошукових розробок дозволяє зробити висновок про те, що в найближчі 20 років використання нанотехнологій і наноматеріалів буде одним з визначальних чинників наукового, економічного і оборонного розвитку держав. Деякі експерти пророкують, що XXI століття буде століттям нанотехнологій.

Один з перспективних напрямків нанотехнологій є наноплівки і нанопокриття на різних деталях машин.

Для формування нанокристалічних плівок і покриттів необхідно навчитися управляти розміром і кристалографічною орієнтацією зерен. Цього можна досягти:

- іонним бомбардуванням при осадженні покриттів;
- впровадженням додаткових елементів в основний матеріал;
- осадженням багат шарових плівок з шарами нанометрової товщини;
- формуванням нанокомпозитних покриттів.

1.2 Класифікація наноматеріалів

Наноматеріали поділяються за ступенем структурної складності на наночастинки і наноструктурні матеріали (рис.1.1). Наночастинки являють собою нанорозмірні комплекси певним чином взаємопов'язаних атомів або молекул.

До наночастинок відносяться:

- нанокластери, серед яких розрізняють впорядковані нанокластери, що характеризуються наявністю певного порядку в розташуванні атомів або молекул і сильними хімічними зв'язками, і неупорядковані нанокластери, що характеризуються, відповідно, відсутністю порядку в розташуванні атомів або молекул і слабкими хімічними зв'язками;
- нанокристали (кристалічні наночастинки), що характеризуються впорядкованим розташуванням атомів або молекул і сильними хімічними зв'язками – подібно масивним кристалам (макротристам).
- фулерени, що складаються з атомів вуглецю (або інших елементів), що утворюють структуру у вигляді каркаса сфероподібного;
- нанотрубки, що складаються з атомів вуглецю (або інших елементів), що утворюють структуру у вигляді циліндричного каркаса, закритого з торців каркасними куполами;

- супермолекули, що складаються з "молекули-господаря" з просторовою структурою, в порожнині якого міститься "молекула-гість";
- біомолекули, що представляють собою складні молекули біологічної природи, що характеризуються полімерною будовою (ДНК, білки);
- міцели, що складаються з молекул поверхнево-активних речовин, що утворюють сфероподібну структуру.

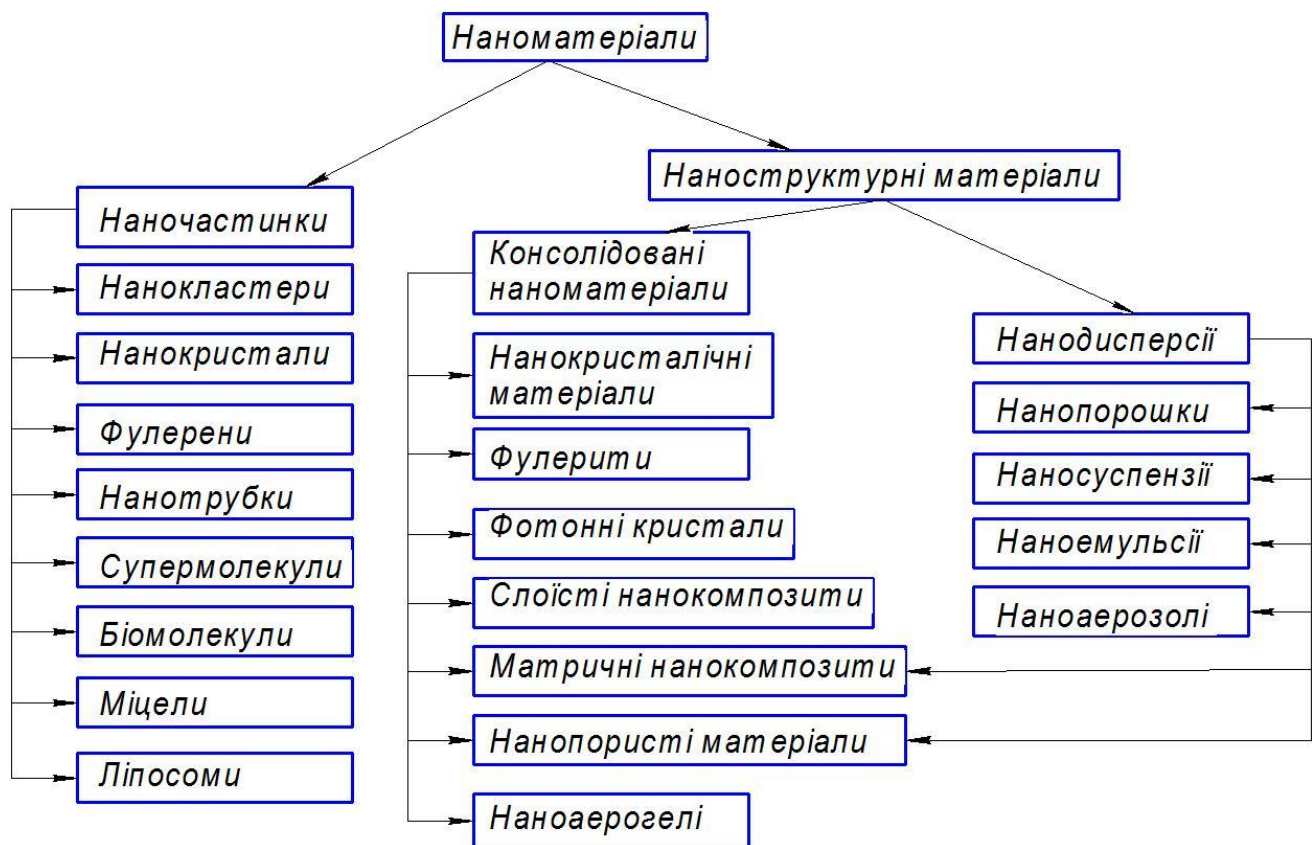


Рисунок 1.1 - Класифікація наноматеріалів за структурними ознаками[4]

Наноматеріали можна також поділити на чотири категорії (рис. 1.2).

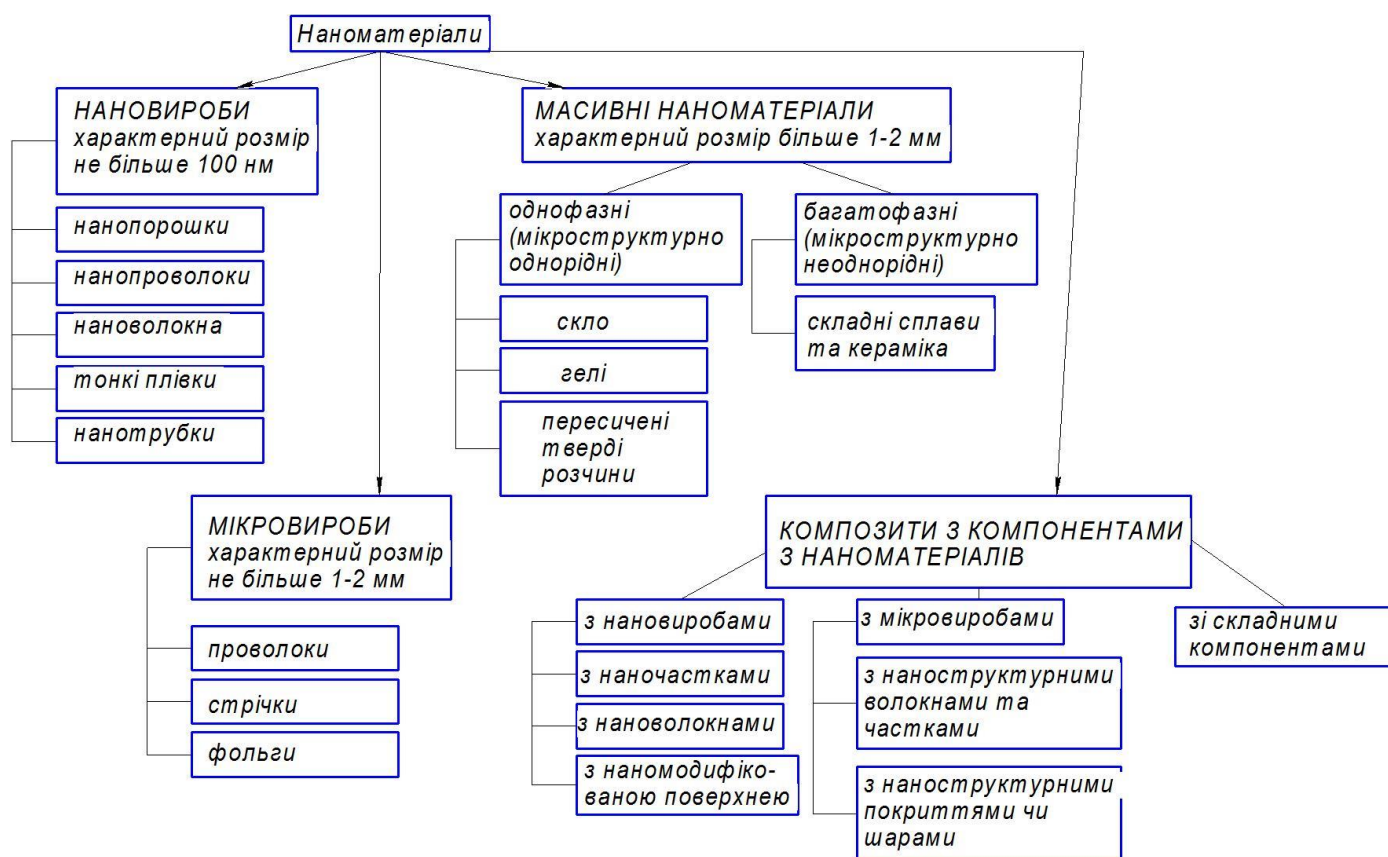


Рисунок 1.2 - Класифікація наноматеріалів [4]

Перша категорія включає матеріали у вигляді твердих тіл, розміри яких в одному, двох або трьох просторових координатах не перевищують 100 нм. До таких матеріалів можна віднести нанорозмірні частинки (нанопорошки), нанодріт і нановолокна, дуже тонкі плівки (товщиною менше 100 нм), нанотрубки і т. п. Такі матеріали можуть містити від одного структурного елемента або кристаліта (для частинок порошку) до декількох їх шарів (для плівки). У зв'язку з цим першу категорію можна класифікувати як наноматеріали з малим числом структурних елементів або наноматеріали у вигляді нановиробів.

Друга категорія включає в себе матеріали у вигляді малорозмірних виробів та характеризується розміром в зразковому діапазоні від 1 мкм до 1 мм. Зазвичай це дріт, стрічки, фольги. Такі матеріали можна класифікувати як наноматеріали з великим числом структурних елементів (кристалітів) або наноматеріали у вигляді мікроеlementів.

Третя категорія являє собою масивні (або, інакше, об'ємні) наноматеріали з розмірами виробів з них в макродіапазоні (більше декількох міліметрів). Такі матеріали складаються з дуже великого числа нанорозмірних елементів (кристалітів) і фактично є полікристалічними матеріалами з розміром зерна 1-100 нм. У свою чергу третю категорію наноматеріалів можна розділити на два класи.

У перший клас входять однофазні матеріали (у відповідність з термінологією – мікроструктурно однорідні матеріали), структура та/або хімічний склад яких змінюються за обсягом матеріалу тільки на атомному рівні. Їх структура, як правило, знаходиться в стані, далекому від рівноваги. До таких матеріалів відносяться, наприклад, скло, гелі, пересичені тверді розчини. До другого класу можна віднести мікроструктурно неоднорідні матеріали, які складаються з нанорозмірних елементів (кристалітів, блоків) з різною структурою та/або складом. Це багатофазні матеріали, наприклад, на основі складних металевих сплавів.

Друга і третя категорії наноматеріалів підпадають під більш вузькі визначення нанокристалічних або нанофазних матеріалів.

До четвертої категорії відносяться композиційні матеріали, що містять в своєму складі компоненти з наноматеріалів. При цьому як компоненти можуть виступати наноматеріали, віднесені до першої категорії (композити з наночастинками і/або нановолокнами, вироби зі зміненням іонною імплантацією поверхневим шаром або тонкою плівкою) та другої категорії (наприклад, композити, зміцнені волокнами та/або частками з наноструктурою, матеріали з модифікованим наноструктурним поверхневим шаром або покриттям). Можна виділити також композиційні матеріали зі складним використанням нанокомпонентів.

Властивості наноматеріалів в значній мірі визначаються характером розподілу, формою і хімічним складом кристалітів (нанорозмірних елементів), з яких вони складаються. У зв'язку з цим доцільно класифікувати структури наноматеріалів за цими ознаками (табл. 1.1). За формою кристалітів

наноматеріали можна розділити на шаруваті (пластинчасті), волокнисті (стовпчасті) і рівновісні. Зрозуміло, товщина шару, діаметр волокна і розмір зерна при цьому приймають значення близько 100 нм і менш. Виходячи з особливостей хімічного складу кристалітів і їх кордонів зазвичай виділяють чотири групи наноматеріалів.

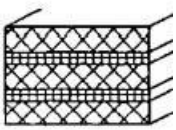
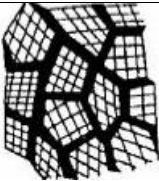
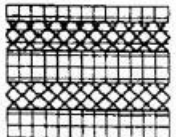
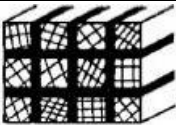
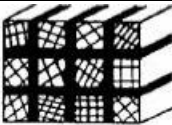
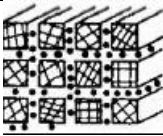
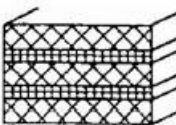
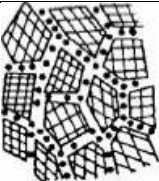
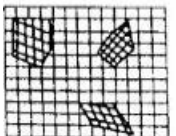
До першої відносять такі матеріали, у яких хімічний склад кристалітів і меж розділу однакові. Їх називають також однофазними. Прикладами таких матеріалів є чисті метали з нанокристалічною рівновісною структурою і шаруваті полікристалічні полімери. До другої групи відносять матеріали, у яких склад кристалітів різниться, але межі є ідентичними за своїм хімічним складом. Третя група включає наноматеріали, у яких як кристаліти, так і межі мають різний хімічний склад. Четверту групу становлять наноматеріали, в яких нанорозмірні виділення (частинки, волокна, шари) розподілені в матриці, що має інший хімічний склад. До цієї групи належать, зокрема, дисперсно-зміцнені матеріали.

До наноматеріалів, використовуваних в тій чи іншій області, пред'являють різні вимоги. Так, наприклад, матеріали, призначені для радіоелектроніки, повинні, перш за все, характеризуватися необхідними фізичними властивостями і забезпечувати мініатюризацію пристроїв. Наноматеріали конструкційного призначення необхідні в основному для виготовлення масивних виробів і їх оцінюють рівнем механічних властивостей.

Таблиця 1.1 – Класифікація наноматеріалів за геометричним принципом [4]

Характеристики об'єкту	Мірність матеріалу з точки зору наноскопічних вимірень	Мірність матеріалу з точки зору макроскопічних вимірень	Приклади матеріалів
Всі три розміри менше 100 нм	3-мірний	0-мірний	Атомні кластери та частинки, нанопорошки, фулерени, квантові крапки
Два розміри менше 100 нм	2-мірний	1-мірний	Нанотрубки, нановолокна, квантові проволоки
Один розмір менше 100 нм	1-мірний	2-мірний	Наношарові покриття, квантові ями
Всі три розміри більше 100 нм	0-мірний	3-мірний	Нанокристалічні покриття, об'ємні матеріали з розміром зерна нанометрового діапазону, нанокомпозити

Таблиця 1.2 – Основні типи структури наноматеріалів [4]

Характер розподілення	Кристалітний			Матричний
	склад кристалітів та границь однаковий	склад кристалітів різний при однаковому складі границь	склад кристалітів та границь різний	кристаліти розподілені в матриці іншого складу
Слоїста форма				
Волокниста форма				
Рівновісна форма				

1.3 Методи отримання наноматеріалів

Основні методи отримання наноматеріалів можна розділити на ряд технологічних груп (рис. 1.4): 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.

Найчастіше використовують метод отримання нанопорошків механосинтезом. Основою механосинтеза є механічна обробка твердих сумішей, в результаті якої відбувається подрібнення і пластична деформація

речовини, прискорюється масопереніс і здійснюється перемішування компонентів суміші на атомному рівні.

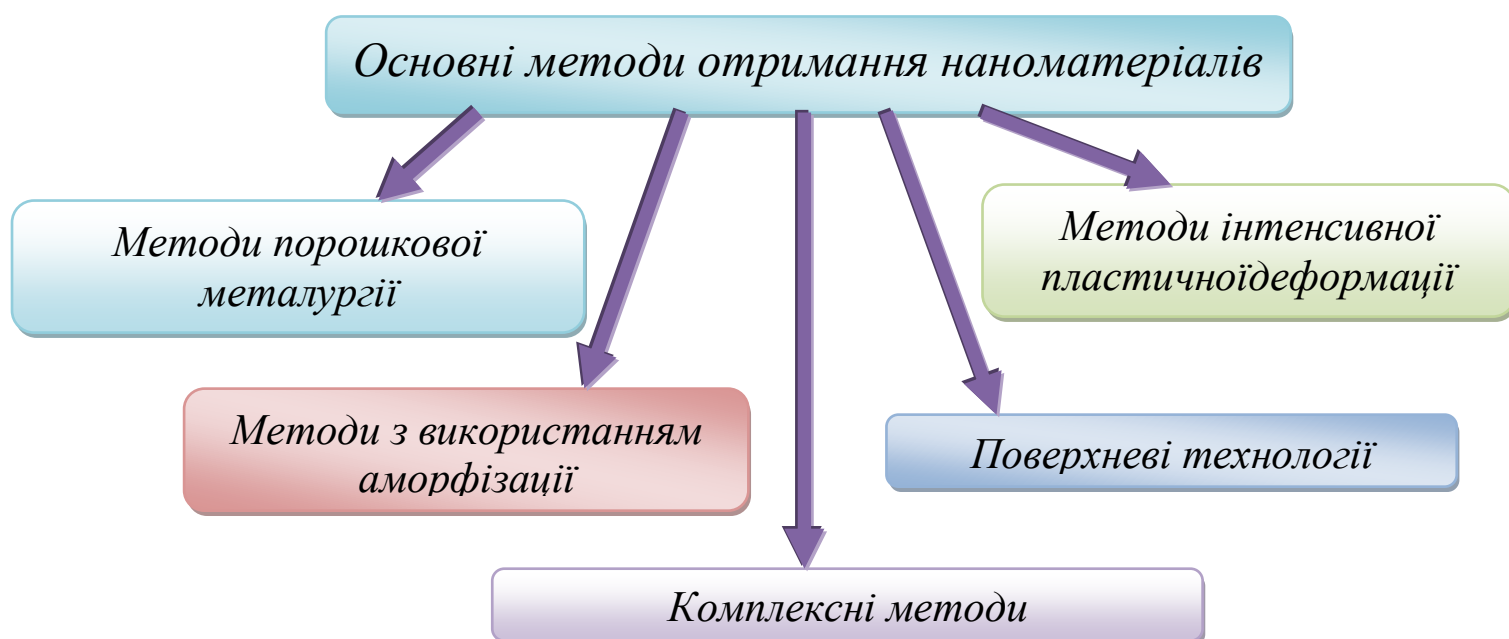


Рисунок 1.3 - Основні технології отримання наноматеріалів [4]

1.4 Способи формування плівок і покриттів

До нанопокриттів (наноплівок) відносяться двовимірні зразки матеріалів, які характеризуються нанорозмірною товщиною. У свою чергу, до нанодротів (наностержнів, нановолокнів, нанонітів) відносяться одновимірні зразки наноматеріалів, які характеризуються нанорозмірним діаметром. І нанопокриття (наноплівки), і нанопроволоки можуть бути подібні за будовою об'ємним зразкам наноструктурних матеріалів, зокрема, їм може бути притаманна нанокристалічна або нанокомпозиційна структура. Разом з тим, і наноплівки в силу їх нанорозмірної товщини, і нанодроту в силу їх нанорозмірного діаметра можуть значно відрізнятися від об'ємних зразків за властивостями [5].

Існують різноманітні технології отримання нанопокриттів, які аналогічні традиційним тонкоплівковим технологіям. Серед них найбільш широке

поширення одержали технології осадження речовини на підкладку з парогазової фази або плазми, а також з розчинів. Крім того, використовуються технології обробки поверхні, засновані на таких процесах, як азотування та гідрування, обробка атомами бору, титану та іншими елементами.

Серед технологій осадження речовини на підкладку з розчинів особливо ефективно електролітичне осадження, що забезпечує розширений спектр можливостей по регулюванню параметрів процесу осадження [6].

Такі плівки формуються в процесі епітаксії, то мережа в процесі росту, при якому кристалічна решітка створюваної плівки закономірно орієнтована відносно кристала-підкладки. Розрізняють гомоепітаксію, коли матеріали плівок і підкладки ідентичні, і гетероепітаксію, коли поєднуються різnorідні речовини [6].

У технологіях осадження речовини на підкладку з парогазової фази або плазми товщина і структура плівки можуть регулюватися за рахунок зміни параметрів потоку загрозованих атомів. Різновидом цих технологій є іонно-стимульоване осадження, коли використовується, крім пучка атомів або молекул для створення матеріалу плівки, пучок високоенергетичних іонів або лазерне випромінювання для активації поверхні [7].

При цьому виникає додаткова можливість варіювати товщину і структуру плівки за рахунок зміни стану поверхні підкладки.

Для отримання напівпровідникових наноплівок найбільш широко використовуються технології хімічного осадження з газової фази і молекулярнопроменевої епітаксії [1], які спочатку були розроблені для створення тонкоплівкових елементів у виробках мікроелектроніки [7].

Хімічне осадження з газової фази застосовується для створення напівпровідникових епітаксціальних структур. Воно включає орієнтоване зростання монокристалічної плівки з матеріалу, що надходить з газової фази, на підходящій для цих цілей монокристалічній підкладці.

Газове середовище може містити як пари матеріалу що кристалізується, так і газоподібні реагенти, здатні в процесі хімічних реакцій на підкладці

утворити необхідний для епітаксійного росту матеріал. Осадження плівок зазвичай проводиться у проточних камерах, де газ-носії, що містять відповідні реагенти, пропускається над нагрітою монокристалічною підкладкою. Хімічний склад, тиск газу і температура підкладки є головними параметрами, контролюючими процес осадження і властивості обложених плівок [7].

Серед розмаїття методів проведення хімічного осадження з газової фази використання металоорганічних сполук в якості вихідних газоподібних реагентів дає найкращий результат при створенні скоєних надграток з різкою межею розділу і товщиною аж до одного моношару.

Головною перевагою методу хімічного осадження є можливість одночасної обробки великої кількості підкладок, що якнайкраще відповідає вимогам масового виробництва. Обмеженням методу є важко контрольоване забруднення матеріалу плівок вуглецем, а також необхідність приймати серйозні заходи безпеки при роботі з гідридами, які токсичні і вибухонебезпечні [7].

Молекулярно-променева епітаксія з'явилася як розвиток методу хімічного осадження плівок в надвисокому вакуумі. Відзначимо, що тиск залишкових газів нижче 10^{-7} Торр вважається високим вакуумом, а область тисків 10^{-11} Торр і нижче відноситься до надвисокого [6].

При молекулярно-променевій епітаксії реагенти вводяться в робочу камеру у вигляді молекулярних або атомних потоків. Ці потоки формуються випаровуванням матеріалу всередині замкнутої комірки з дуже малим вихідним отвором. Випаровані всередині неї молекули і атоми, виходячи з отвору малого діаметра в надвисокий вакуум, рухаються без зіткнень, тобто балістично, створюючи таким чином спрямовані добре колімовані потоки частинок [7].

Для молекулярно-променевої епітаксії зазвичай використовують кілька ефузійних осередків-по одній комірці на кожен конгруентно випаровується, (тобто без порушення стехіометрії), матеріал. Крім осередків для осадження самих матеріалів повинні бути також джерела легуючих домішок. Поряд з випаровуванням осаджуємого матеріалу всередині ефузійної клітинки,

молекулярні потоки можуть формуватися за таким же принципом і з парів або газоподібних сполук. Для цього їх вводять в надвисоковакуумну камеру через спеціальні сопла [7].

Вакуумний шлюз дозволяє змінювати підкладки, зберігаючи надвисокий вакуум. Обертанням підкладки забезпечується однорідність складу і структури напилюваних шарів, індивідуальна товщина яких може становити від декількох нанометрів до часток мікрона.

Конденсація атомів і молекул в необхідних стехіометричних співвідношеннях на нагрітій підкладці, в принципі, представляє досить складну задачу. Проте проведення осадження в надвисокому вакуумі дозволяє використовувати сучасні методи іонного та електронного дослідження твердого тіла прямо в процесі осадження або безпосередньо після його завершення.

Молекулярно-променева епітаксія широко застосовується для формування високоякісних надрешіток. Слід нагадати, що для цих цілей підходить і більш продуктивний метод хімічного осадження з газової фази металоорганічних сполук. Однак по дефектності, складу неконтрольованих домішок і різкості міжфазних меж цей метод поступається молекулярно-променевому осадженню[6].

Однорідні напружені епітаксiальні плівки починають рости пошарово, навіть коли є неузгодженість решіток матеріалу що наноситься і підкладки. Накопичення енергії в напруженому стані по мірі збільшення товщини плівки неминуче веде до утворення острівців, що знижує загальну енергію в системі. При цьому утворюються нанокристалічні епітаксiальні острівці, що самоорганізуються, на монокристалічній підкладці. Перехід від двомірного пошарового росту суцільної плівки до тривимірного росту острівців (2D 3D перехід) має місце, коли міжатомні відстані в кристалічній решітці матеріалу що осаджують більше, ніж в решітці підкладки. Острівкова структура енергетично більш сприятлива для релаксації напруг, ніж шарувата [7].

Релаксація напруг в двомірному шарі може здійснюватися тільки в напрямку, перпендикулярному площині цього шару. Острівці напруги мають можливість релаксувати як в самому острівці, так і навколо нього.

1.5 Властивості наноматеріалів

1.5.1 Механічні властивості

Формування нанокристалічних структур призводить до зміни властивостей порівняно з масивними аналогами, зокрема, до значного підвищення механічних характеристик нанокристалічних матеріалів, серед яких, в першу чергу, необхідно відзначити надзвичайно високу твердість. Так як твердість характеризує опір матеріалу пластичної деформації при вдавлюванні у нього більш твердого тіла, наприклад, алмазу, то існує пропорційний зв'язок між твердістю і межею плинності матеріалу (σ_y).

Ідея підвищення твердості матеріалів за рахунок надання їм наноструктурного стану насправді виявилась не такою вже простою. Проведені дослідження твердості матеріалів в залежності від розмірів зерен виявили аномальну залежність, а саме зниження твердості зі зменшенням розміру зерна [4].

На рис. 1.4 наведена схема зміни твердості, межа плинності при зменшенні розміру зерна до критичного розміру (близько 10 нм).

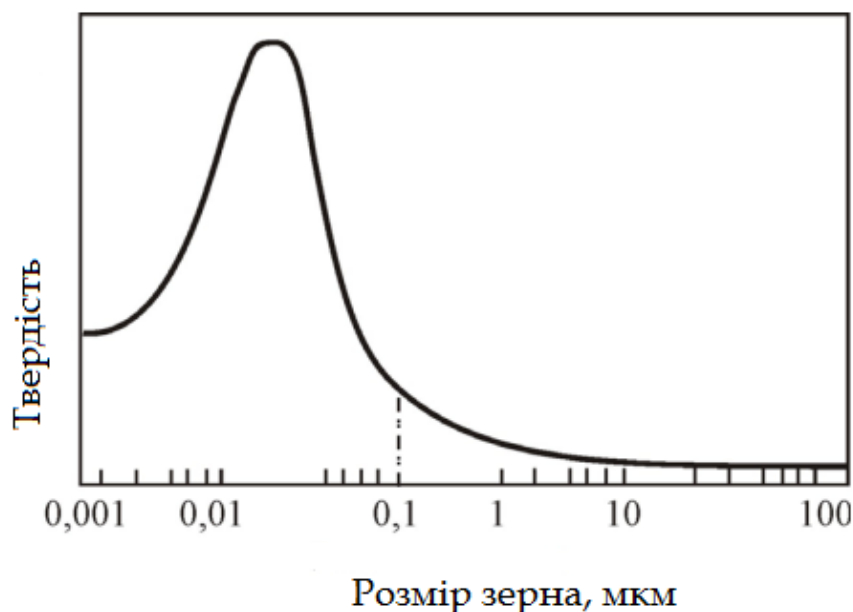


Рисунок 1.4 - Схема зміни твердості, межі текучості при зменшенні розміру зерна [4]

При зменшенні розміру зерен до 7 нм і нижче замість підвищення твердості спостерігається зворотний ефект Холла-Петча, тобто має місце зниження зміцнення зі зменшенням розміру зерна.

Природа екстремальної залежності показника міцності нанокристалічних тіл від розміру зерен виявилася досить складною. Щоб її зрозуміти, необхідно враховувати специфіку механізму деформування наноструктурних матеріалів, а саме - взаємне проковзування зерен по межах, яке носить недислокаційний характер [4].

У кристалітів з розміром $d < 10$ нм відсутні дислокації, а зерногранична фаза близька за структурою до аморфної.

Міцність нанокристалічних матеріалів при розтягуванні в 1,5 - 2 рази вище, ніж у крупнозернистих аналогів. Однак було відмічено падіння твердості зі зменшенням розміру зерна нижче деякого критичного розміру, що, найімовірніше, пов'язане зі збільшенням частки потрійних стиків меж зерен.

Для великих зерен зростання міцності і твердості при зменшенні їх розміру пов'язане з запровадженням додаткових кордонів зерен, які є

перешкодами для руху дислокацій. При малих нанорозмірних зернах зростання міцності відбувається завдяки низькій щільності наявних дислокацій і труднощі утворення нових. На рисунку 1.5 представлено співвідношення між міцністю і пластичністю для сталей.

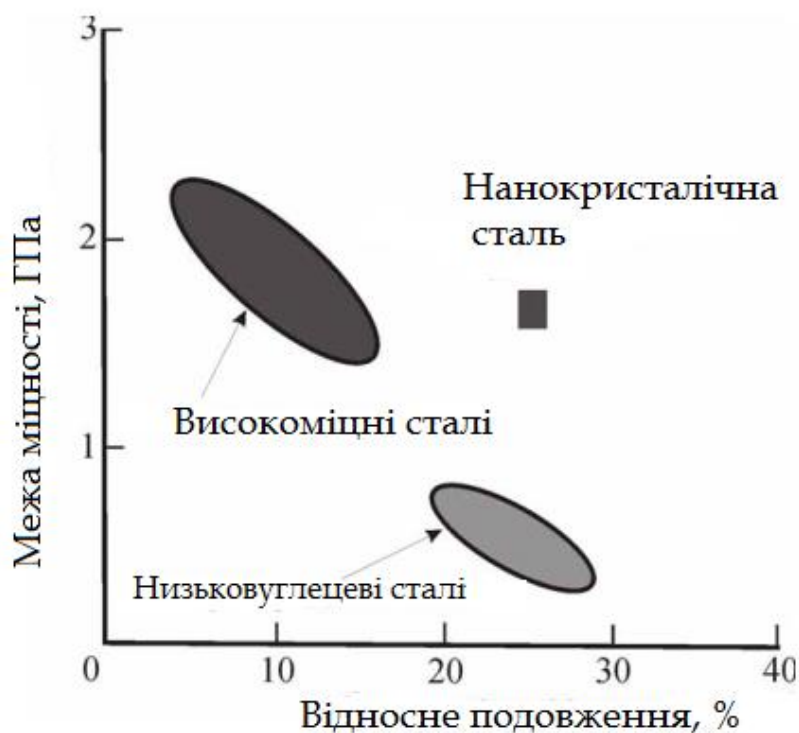


Рисунок 1.5 - Блок-схема зміни механічних властивостей різних матеріалів [4]

У таблиці 1.3 наведено результати зміни механічних властивостей металів залежно від розмірів зерна.

Нанокристалічна сталь 12X18H10T володіє хорошим співвідношенням міцності і пластичності. В окремих випадках низька пластичність нанокристалічних матеріалів викликається, мабуть, складністю розмноження і руху дислокацій, а також наявністю пір, мікротріщин і включень в цих матеріалах. Зносостійкість алюмінієвих сплавів з нанокристалічною структурою значно вище, ніж з грубозернистою (рис. 1.6).

Таблиця 1.3 - Механічні властивості звичайного і нанокристалічного нікелю [4]

Властивості	Звичайний, 10 мкм	Нано - Ni	
		100 нм	10 нм
Міцність, МПа (25°C)	103	690	>900
Гранична міцність на розтяг, МПа (25°C)	403	1100	>2000
Твердість за Віккерсом, кг/мм ²	140	300	650

Такі крихкі матеріали, як інтерметаліди, стають пластичними при зменшенні розмірів зерен нижче критичних розмірів, що можна пояснити наявністю специфічних механізмів зародження та поширення мікротріщин. Отже, нанорозмірні структури матеріалів відкривають унікальні можливості для отримання нового рівня властивостей: високої міцності, твердості, зносостійкості при досить високій пластичності.

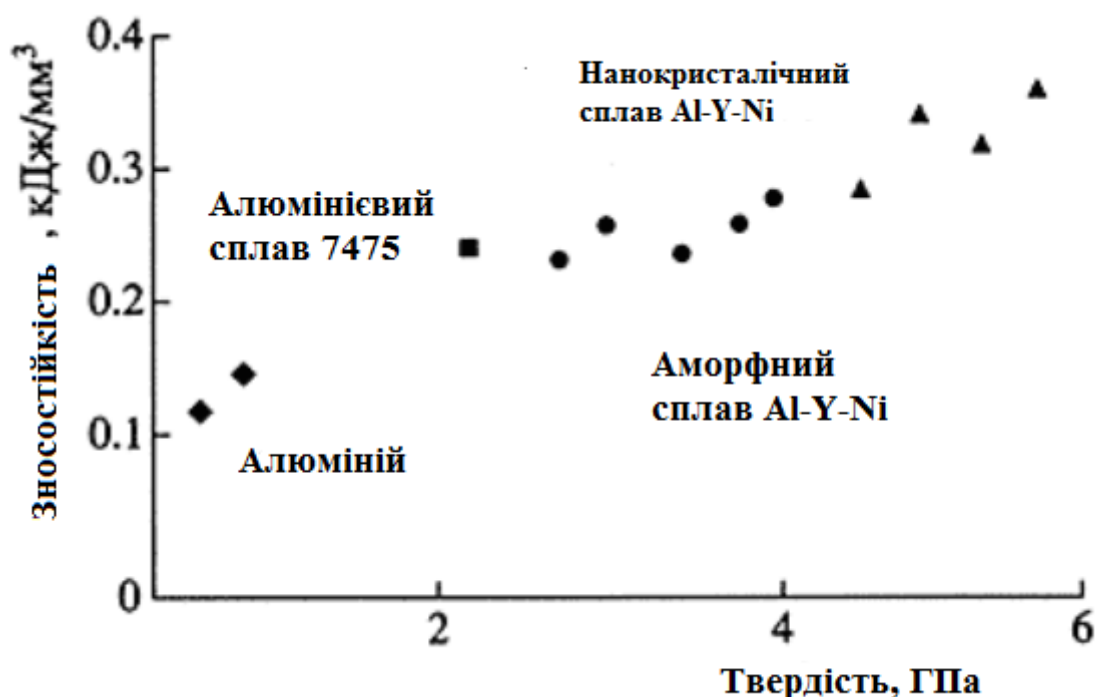


Рисунок 1.6 - Зносостійкість алюмінієвих сплавів [4]

Результати вивчення впливу температури відпалу на структуру і властивості нанозразків Ni_3Al [19] показують, що зростання зерен супроводжується зміною фізико-механічних властивостей, однак при цьому змінюються і інші параметри структур (внутрішнє мікрвикривлення, ступінь порядку і ін).

Встановлення відповідних розмірних закономірностей відкриває можливості переходу до нового покоління матеріалів, властивості яких змінюються за допомогою регулювання розмірів і форми складових їх структурних елементів. Ці особливості також можна використовувати при створенні елементів приладових пристроїв.

1.5.2 Термодинамічні властивості

Що стосується особливостей термодинамічних властивостей і фазових рівноважних станів, то на цей рахунок певного однозначного тлумачення немає. Для частинок розміром більше 10 нм традиційні поняття про поверхневу енергію більш застосовні. Однак в разі розмірів 1 – 10 нм загальні закономірності зміни термодинамічних властивостей вимагають окремого уточнення, а при розмірах менше 1 нм вся частка набуває властивості поверхневого шару і вимагає спеціального підходу. У першому наближенні ці міркування застосовні для термодинаміки консолідованих наноматеріалів. Зменшення міжатомних відстаней може досягти критичної величини, при якій здійснюється фазовий перехід, пов'язаний з перебудовою кристалічної решітки.

Однією з характеристик матеріалів є теплопровідність, яка чутлива до зміни структурних, у тому числі і розмірних факторів. Теплопровідність, як відомо, складається з електронної та решіткової складової. Для металоподібних матеріалів перша складова є переважаючою, а для напівпровідників і діелектриків перенесення тепла здійснюється за рахунок фононів. При цьому зменшення розміру структурних елементів значно знижує теплопровідність нанометалу за рахунок розсіювання електронів на міжзеренних кордонах.

Наприклад, теплопровідність нанокристалічного срібла з розміром зерен близько 20 – 47 нм в 3,5 – 4 рази нижче для кристалічного срібла [14].

1.5.3 Магнітні властивості

Магнітні характеристики також є чутливими до критичного розміру структурного елемента і зараз активно досліджуються. Найбільшу увагу привернуто до магнітних властивостей малих частинок добре відомих феромагнетиків: заліза, нікелю і кобальту. Необхідно дати відповідь на питання: чи залишаються незмінними такі властивості, як коерцитивне поле H_c , магнітна анізотропія K , початкова магнітна проникність μ , температура Кюрі T і інші, якщо обсяг феромагнетика зменшується до мізерно малої величини, рівній $10^3 - 10^4$ атомів? Яке мінімальне число атомів феромагнетика, наприклад заліза або кобальту, треба зібрати разом, щоб у частки з'явилися феромагнітні властивості?

Перш ніж перейти до обговорення феромагнітних властивостей малих частинок, розглянемо фізичний сенс використовуваних термінів «температура Кюрі» і «магнітна анізотропія». Як відомо, феромагнітний стан металів і сплавів виникає в результаті дії сил електростатичної природи, що приводять магнітні моменти атомів в упорядкований стан. При цьому утворюються домени – області з паралельним розташуванням магнітних моментів атомів. При нагріванні ферромагнетика тепловий рух атомів поступово починає впливати на впорядковане розташування атомних магнітних моментів і при деякій температурі повністю його руйнує. Температура, при якій повністю руйнується впорядкованість орієнтації магнітних моментів всередині доменів, отримала назву температури Кюрі на честь видатного французького вченого-фізика П'єра Кюрі.

Перейдемо до розгляду поняття магнітної анізотропії. Уявімо, що є монокристалічний зразок такого феромагнетика, як залізо. Внаслідок упорядкованого розташування атомів в монокристалі його магнітні властивості

сильно залежать від напрямку прикладеного до зразка зовнішнього магнітного поля. Експерименти показали, що для монокристалу заліза існують два виділених (щодо магнітних властивостей) напрямки: уздовж одного кристал намагнічується найлегше (вісь легкого намагнічування), уздовж іншого – найважче (вісь важкого намагнічування). Це явище називається магнітною анізотропією. Константа анізотропії K являє собою різницю енергій, які витрачаються на намагнічування одиниці обсягу феромагнетика по осях важкого і легкого намагнічування. Значення K для заліза при кімнатній температурі становить $4,2 \cdot 10^4$ Дж/м³.

Коли обсяг магнітного матеріалу зменшується, Магнітний порядок зазнає значних змін. Концептуально це може бути сприйнято як зростання невизначеності механічного моменту і енергії електрона в деякій області простору. Згадаймо, що електрон є носієм спінового і орбітальних магнітних моментів.

Що показують експериментальні результати з вивчення феромагнітних властивостей малих частинок заліза, нікелю і кобальту? Виявлено, що перехід в парамагнітний стан залежить від розміру часток і температури. Феромагнетизм зникає при розмірах частинок заліза і нікелю близько 6 – 7 нм. Нижче цих розмірів вони стають парамагнітними. Частинка заліза розміром 6 нм переходить у феромагнітний стан тільки при $T_c = 170$ К. Для порівняння: масивні зразки заліза мають температуру Кюрі $T_c = 1090$ К.

Таким чином, експериментальні дані показують, що діаметр частинок, при якому дальній магнітний порядок порушується, значно перевищує оцінки, що впливають з співвідношень Гейзенберга (для заліза $d = 1$ нм). Слід, однак, зазначити, що ці оцінки зближуються, якщо врахувати, що при зменшенні розмірів частинок значна частина атомів виявляється на поверхні. Так, для частинок діаметром 2,5 нм більше 50 % всіх атомів лежать на поверхні (передбачається, що поверхня покривається двома шарами атомів). Коерцитивне поле H_c наночастинок також залежить від розміру.

1.6 Дослідження демпфуючої здатності іонно-плазмових покриттів

Для гасіння коливань лопаток застосовуються різні механізми демпфування. Розрізняють конструкційне демпфування - за рахунок конструктивних особливостей кріплення лопаток, бандажів або демпфуючого дроту [8, 9]. Існує також демпфування в самому матеріалі лопаток, яке докладно вивчено в роботі [10], але рівень розсіювання енергії в матеріалі дуже обмежений. Крім того, в процесі роботи газотурбінного двигуна виникає аеродинамічне демпфування, проте його все одно недостатньо для того, щоб запобігти виникненню небезпечних амплітуд коливань [11,12].

Дослідження демпфуючої здатності з'єднання типу «ластівчин хвіст» лопаток компресора показали [13], що рівень енергетичних втрат в досліджених сполуках при щільній посадці хвостовика лопатки в паз диска дуже малий. Він порівнюється з втратами енергії в матеріалі зразка, що коливається і, знижується з ростом розтягуючого зусилля і температури, при значеннях останніх, відповідних граничним робочим умовам, практично дорівнює нулю (характеризується логарифмічним декрементом коливання зразка, рівним кількох сотих відсотка). Деяке поліпшення демпфуючої здатності з'єднання досягається при вільній посадці хвостовика лопатки в паз диска. Однак для граничних робочих умов силового навантаження з'єднання збільшення декременту коливань лопатки за рахунок вільної посадки хвостовика незначно.

Таким чином, демпфуючу здатність компресорних лопаток з хвостовиком типу «ластівчин хвіст» слід оцінювати як дуже низьку, обумовлену в основному демпфуючими властивостями матеріалу [8].

В умовах, де використання демпфуючих елементів важко або неможливо, для зниження змінних напруг можна використовувати спеціальні демпфуючі покриття [14]. Для демпфуючих покриттів розглядаються багатокомпонентні покриття, які можна наносити за допомогою вакуумно-плазмової технології високих енергій (ВПТВЕ), яка широко використовується на підприємствах авіаційного двигунобудування для нанесення захисних і

зміцнюючих покриттів на деталі і лопатки авіаційних ГТД. За цією технологією наносять покриття на промислових іонно-плазмових установках типу МАП-1, МАП-2 і МАП-3. У цих установках використовується вакуумно-дуговий спосіб генерації плазми матеріалу трубного катода з формуванням радіального плазмового потоку [26]. Покриття наноситься осадженням з плазмового потоку матеріалу покриття при високих і керованих енергіях частинок. Трубні катоди із заданим хімічним складом виплавляються в вакуумно-індукційних печах із заливкою розплаву в спеціальну графітову форму [15-18].

Для досліджень з титанового сплаву ВТ6 виготовлені модельні зразки товщиною 2 мм [26]. Для підготовки поверхні зразків використовували: кругові та лоткові вібратори, а також піскоструминну камеру ежекторного типу. Дані типи поверхневої обробки застосували для додання поверхні зразків титанового сплаву ВТ6 різної морфології, а також з метою створення в поверхневому шарі стискаючих напруг [19, 20]. Нанесення демпфуючих покриттів здійснювалося на іонно-плазмовій установці з автоматизованою системою управління технологічним процесом відповідно до ПП1.2.620-2002. Дослідження мікроструктури зразків титанового сплаву ВТ6 з демпфуючими покриттями в вихідному стані проводили на металографічному оптичному мікроскопі з цифровою системою обробки зображення при збільшенні в 500 разів. Перед зйомкою виготовлені мікрошліфи піддавали травленню в 3%-ому розчині плавикової кислоти. Випробування на демпфуючу здатність проводили на вібростенді при температурі 20°C згідно ASTM E 756-05 [26].

Одним з важливих етапів при нанесенні іонно-плазмових покриттів є стадія підготовки поверхні зразків основи перед нанесенням. Вибрали наступні попередні варіанти підготовки поверхні зразків титанового сплаву ВТ6:

- віброгалтовка (ВГ) в круговому вібраторі фірми протягом 6 ч при амплітуді коливань 5 мм;
- віброгалтовка + віброполірування (ВП) в лотковому вібраторі фірми протягом 6 год;

- обдубання електрокорунду з розмірами зерна 120-150 мкм при тиску 3 ат до освіти однотонного матового поверхні [26].

Після технологічних операцій з підготовки поверхні зразків з титанового сплаву ВТ6 проводили відпрацювання режимів нанесення варіантів демпфуючих покриттів. Осадження покриттів здійснювали зі сплавів на основі системи Al-Cu-Fe і сплавів цієї ж системи, додатково легованих ітрієм і гадолінієм [21]. Для нанесення покриттів обраний «м'який» режим осадження (струм вакуумної дуги 350 А, напруга зсуву 10-15 В), при якому температура іонного і радіаційного нагріву титанових зразків не перевищувала 400°C, що охороняло сплав ВТ6 від розміцнення [22].

Після нанесення покриттів на основі системи Al-Cu-Fe на іонно-плазмовій установці МАП-3 встановлено, що на зразках титанового сплаву ВТ6 після поверхневої підготовки (ВГ і ВГ + ВП) спостерігалось розтріскування покриття, що, мабуть, пов'язано з великим рівнем залишкових напруг в поверхневому шарі зразків. При цьому покриття на зразках, які пройшли піскоструминну обробку поверхні електрокорунду, не мало поверхневих дефектів [26].

Тому для підготовки поверхні сплаву ВТ6 перед нанесенням покриттів обрана піскоструминна обробка поверхні електрокорунду з розмірами зерна 120-150 мкм при тиску 3 ат до освіти однотонної матової поверхні [23].

За обраному режиму на зразки з титанового сплаву ВТ6 нанесені демпфуючі покриття таких складів:

- склад 1 - Al-Cu-Fe;
- склад 2 - Al-Cu-Fe-Y;
- склад 3 - Al-Cu-Fe-Gd [26].

Відомо, що демпфуючі покриття на основі сплавів системи Al-Cu-Fe повинні мати товщину не менше 40-45 мкм [24]. Тому для визначення реальної товщини і мікроструктури отриманих покриттів проведені металографічні дослідження нанесених покриттів [26].

Дослідження мікрошліфів проводили на металографічному оптичному мікроскопі з цифровою системою обробки зображення. Мікроструктури зразків титанового сплаву ВТ6 (після хімічного травлення в 3%-ому розчині плавикової кислоти) з демпфуючими покриттями і без них в початковому стані представлені на рис. 1.7 [26].

Визначена фактична товщина нанесених демпфуючих покриттів різних систем після 270 хв осадження (табл. 1.4) [26].

Таблиця 1.4 – Товщина демпфуючих покриттів [26]

№ складу	Система	Товщина покриття, мкм
1	Al-Cu-Fe	51
2	Al-Cu-Fe-Y	70
3	Al-Cu-Fe-Gd	80

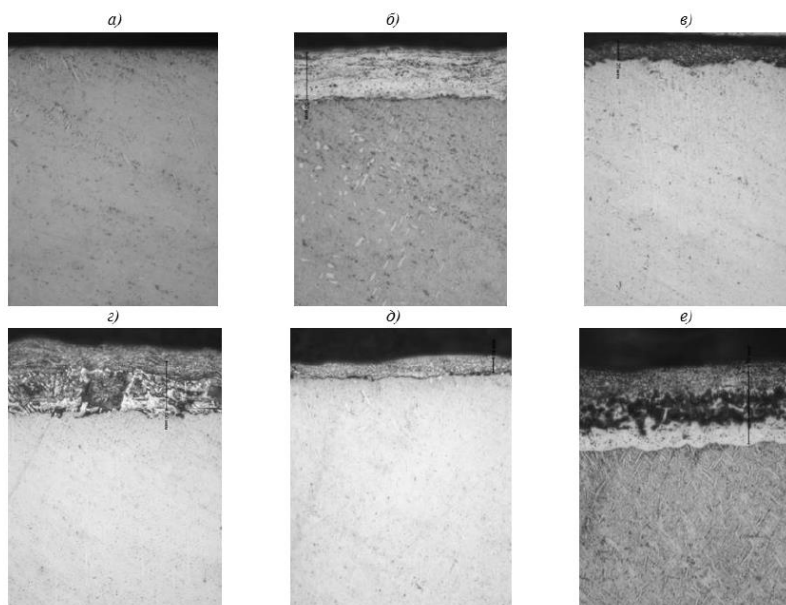


Рисунок 1.7 - Мікроструктури зразків титанового сплаву ВТ6 з демпфуючими покриттями та без них у вихідному стані: а - без покриття; б – склад 1 (Al-Cu-

Fe) тривалість осадження 270 хв; в, г - склад 2 (Al-Cu-Fe-Y) тривалість осадження 60 та 70 хв; д, е - склад 3 (Al-Cu-Fe-Gd) тривалість осадження 60 та 70 хв [26]

На мікроструктурах покриттів видно наявність дрібнодисперсних включень на основі мікрокраплинної фази матеріалу покриття, присутньої в потоці вакуумно-дугової плазми. Видно також відсутність перегріву основи (сплав ВТ6), що підтверджує правильний вибір режиму нанесення покриття [25].

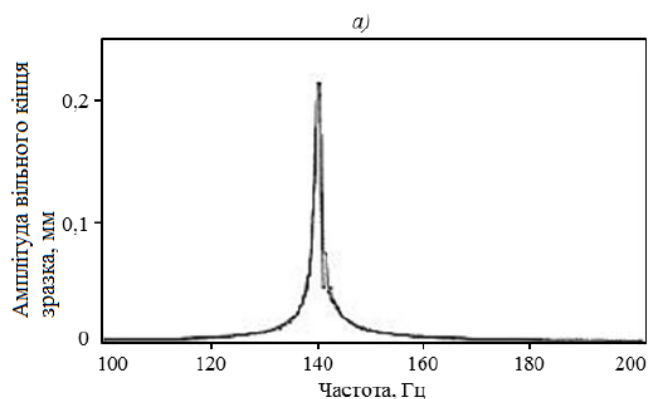
Для відпрацювання режимів випробувань за визначенням демпфуючої здатності експериментальних матеріалів покриттів виготовлені модельні зразки з титанового сплаву ВТ6, а також технологічне оснащення для жорсткого закріплення зразка на столі вібростенда [27]. Випробування проводили на електродинамічному вібростенді при температурі 20°C згідно ASTM E 756-05 [26].

Варіанти звіту керуючої програми для резонансних кривих і параметрів випробувань (при 20°C) зразків з титанового сплаву ВТ6 з покриттям Al-Cu-Fe-Gd з найнижчою добротністю і без покриття представлені на рис. 1.8 [26].

Слід зазначити, що дана програма видає в якості звіту Q-фактор (добротність), який з наукових літературними даними є критерієм дисипативних властивостей матеріалів і є зворотною величиною коефіцієнта розсіювання енергії, а також декременту загасання коливань [3].

Випробування, проведені на вібростенді, показали можливість отримання даних з резонансних піків для подальших розрахунків коефіцієнтів розсіювання енергії, а також декременту загасання коливань. В результаті випробувань (при 20°C) отримані амплітудно-частотні залежності на резонансних частотах, представлені в табл. 1.5 [26].

Відпрацьована технологічна схема - від підготовки поверхні зразків титанового сплаву ВТ6 перед нанесенням іонно-плазмових демпфуючих покриттів до технології нанесення [26].

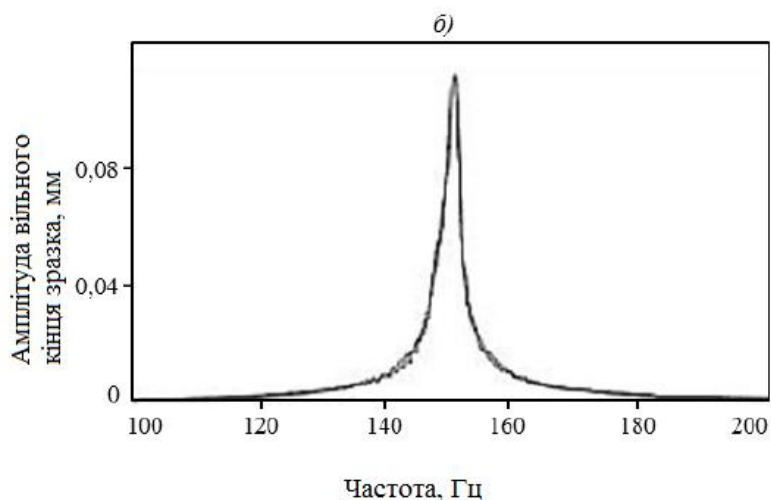


Параметри режимів випробування

Початкова частота, Гц	Амплітуда столика, мм	Кінцева частота, Гц	Амплітуда столика, мм
100	0,01	200	0,01

Параметри при резонансі за першою згинною формою

Частота, Гц	Канали	Амплітуда, мм	Фаза, град	Q - фактор (добротність)
139,77	Ch2/Ch1	21,0628	241,7	129,0



Параметри при резонансі за першою згинною формою

Частота, Гц	Канали	Амплітуда, мм	Фаза, град	Q - фактор (добротність)
150,475	Ch2/Ch1	10,9732	259,2	72,5

Рисунок 1.8 - Резонансні криві та параметри випробування для зразків з титанового сплаву ВТ6 без покриття (а) та з покриттям на основі сплаву системи Al-Cu-Fe-Gd (б) при швидкості проходу 100 Гц/хв. В діапазоні частот 100-200 Гц [26]

Обрані технологічні режими нанесення демпфуючих покриттів на зразки титанового сплаву ВТ6, при яких температура на зразках не перевищувала 400°C: струм вакуумної дуги 350 А, напруга зсуву 10-15 В, швидкість осадження 15-20 мкм / год [26].

Таблиця 1.5 - Ефективність демпфуючої здатності іонно-плазмових покриттів на зразках з титанового сплаву ВТ6 при амплітуді столика 0,01 мм [26]

Покриття	Тривалість осадження, хв	Товщина покриття, мкм	Частота резонансу, Гц	Амплітуда резонансу, мм	Q - фактор (добротність)
Без покриття	-	-	139	0,2	129
Al-Cu-Fe	270	51,2	145,9	0,19	128,5
Al-Cu-Fe-Y	60	15	142,0	0,14	81,3
	270	70	148,9	0,12	82,9
Al-Cu-Fe-Gd	60	15	138,7	0,14	83,6
	270	80	150,5	0,11	72,5

В якості технологічної операції з підготування поверхні зразків обрана піскоструминна обробка електрокорунду з розмірами зерна 120-150 мкм при тиску 3 ат до освіти однотонного матового поверхні [26].

Встановлена фактична товщина завданих експериментальних демпфуючих покриттів, яка склала в середньому від 15 до 80 мкм. Різна товщина при однаковій тривалості осадження пов'язана з різною щільністю отриманих матеріалів відлитих катодів. На мікроструктурах покриттів чітко видно наявність дрібнодисперсних включень [26].

В роботі [26] досліджено ефективність іонно-плазмових покриттів при випробуваннях на демпфуючу здатність на вібростенді. Показана можливість визначення ефективності роботи покриттів по зниженню амплітуди вільного

кінця зразка і добротності (Q-фактор). Найбільш високі показники з зниження амплітуди коливань вільного кінця зразка показало покриття системи Al-Cu-Fe-Gd, також має найнижчу добротність в порівнянні із зразками титанового сплаву BT6 з покриттями систем Al-Cu-Fe і Al-Cu-Fe-Y [26].

В роботі [28] автори проводили випробування компресорних лопаток з тонкими покриттями робочих поверхонь хвостовиків. Як покриття наносили такі матеріали як латунь, срібло, антифрикційний плівкоутворювальний склад ВАП-2. В результаті випробувань встановлено, що нанесення покриттів на хвостовики лопаток призводить до деякого підвищення демпфуючої здатності. При цьому найбільш ефективним виявилось покриття зі складу ВАП-2 [29].

Для досліджень виготовлені модельні зразки з титанового сплаву BT6 завтовшки 3 мм, представлені на рис. 1.9 [29].

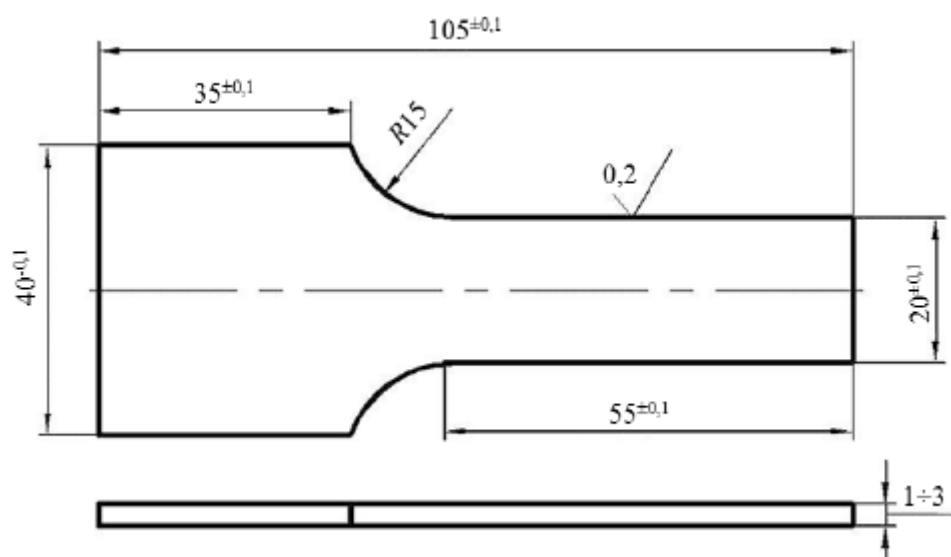


Рисунок 1.9 - Зразок для вібровипробування по першій згинальній формі [29]

Випробування проходили в кілька стадій - випробування методом оцінки ефективності роботи покриття до і після його нанесення і порівняльне дослідження демпфуючої здатності матеріалу до і після нанесення покриття шляхом визначення добротності коливальної системи [29].

Метод оцінки ефективності роботи покриття до і після нанесення передбачає в початковий період випробувань знаходження резонансу зразків

без покриття - регулюючи амплітуду робочого столу вібростенда і виставляючи необхідну амплітуду вільного кінця зразка, відповідну заданій напрузі в небезпечному перерізі, фіксували амплітуду столу [29].

Після нанесення покриття знову знаходили резонанс - встановлюючи значення амплітуди столу з випробування до нанесення покриття, визначали амплітуду вільного кінця зразків. У даній роботі амплітуду вільного кінця плоского зразка відповідала напрузі в небезпечному перерізі, рівному 70 МПа [29].

Порівняльне випробування на дослідження демпфуючої здатності матеріалу до і після нанесення покриття шляхом визначення добротності коливальної системи передбачає перебування резонансу зразків без покриття, фіксування отриманої амплітуди столу вібростенда. Після нанесення покриття необхідно також знайти резонансну частоту зразка з покриттям і, регулюючи амплітуду столу вібростенда, встановити значення амплітуди вільного кінця зразка до нанесення покриття [29].

Згідно СТО 1-595-2-506-2016, порівняльне випробування плоского зразка без покриття та з покриттям проводять при резонансній частоті по першій згинальній формі коливань при однаковій амплітуді робочого столу вібродинамічного стенду, при якій амплітуду вільного кінця зразка без покриття відповідає заданим рівнем напруги в небезпечному перерізі, а амплітуду кінця зразка з покриттям в першому наближенні пропорційна рівню напружень в тому ж перерізі зразка.

При визначенні параметрів демпфування досліджуваних зразків, коливання вільного кінця зразків реєстрували за допомогою безконтактного лазерного тріангуляційного датчика переміщення [29].

Однакові умови випробувань на стенді забезпечуються затягуванням зразків притискним болтом оснастки з моментом 200 Н•м. Зазначена величина моменту затягування для оснащення стенду забезпечує мінімум втрат енергії за її рахунок.

Для досліджень можливості зниження амплітуди коливань вільного кінця плоского зразка при вібровипробуванні по першій згинальній формі на хвостовик зразка з титанового сплаву ВТ6 наносили такі варіанти покриттів: покриття, що складається з наношарів системи TiN / CrN, що чергуються; покриття, що складається з мікрошарів системи Ti-TiN, що чергуються; покриття на нікелевій основі зі сплаву марки СДП-2; покриття на алюмінієвій основі з сплаву марки ВСДП-28, нанесених на іонно-плазмовій установці МАП-3, й антифрикційний плівкоутворювальний складу марки ПФД-5. Для кожного типу покриття випробували по три зразка [29].

Параметри процесу осадження для кожного з варіантів покриттів, нанесених на іонно-плазмовій установці, а також для покриття марки ПФД-5 встановлювалися таким чином, щоб отримати товщину покриттів, рівну 30 мкм [29].

Вибір покриття марки ПФД-5 обумовлений однотипністю з покриттям ВАП-2, розробленим у ФГУП «ВІАМ», і позитивним ефектом щодо підвищення демпфуючої здатності, отриманим в роботі [29]. Покриття на алюмінієвій основі з сплаву марки ВСДП-28, леговане нікелем і ітрієм, за даними дослідників володіє демпфуючою здатністю щодо зниження амплітуди вільного кінця зразка після нанесення на робочу частину, яка імітує перо лопатки компресора. Покриття на нікелевій основі зі сплаву марки СДП-2, леговане хромом, алюмінієм і ітрієм, призначене для нанесення жаростійких покриттів, вибрано через свою аморфної структури, що отримується після осадження в початковому стані [29].

З результатів випробувань зразків з титанового сплаву ВТ6 до і після нанесення покриттів на ефективність демпфування впливає, що нанесення покриттів на поверхні зразків, що імітують хвостовик лопатки, дозволяє трохи підвищити демпфуючу здатність. При обраних режимах випробувань зразків з покриттями найкращим чином показало себе покриття ПФД-5, знизивши амплітуду вільного кінця зразків на 22-29%. Деяке зниження амплітуди також спостерігається на зразках з іонно-плазмовим покриттям ВСДП-28: 5-12%.

Однак на пластинах з іонно-плазовими покриттями TiN / CrN, Ti-TiN і СДП-2 спостерігається збільшення амплітуди в резонансі в середньому: для TiN / CrN - на 40%, для Ti-TiN - на 34%, для СДП-2 - на 18% [29].

Поясненням отриманих даних можуть служити матеріали і структура досліджуваних покриттів. Для покриття марки ПФД-5 зниження амплітуди в даному випадку, очевидно, пов'язано з втратою енергії, що передається від вібродинамічного стенду до зразка за рахунок взаємного проковзування на контактних поверхнях в затиску оснащення через наповнювача з дисульфиду молібдену і графіту. Для іонно-плазового покриття на алюмінієвій основі з сплаву марки ВСДП-28 зниження амплітуди, можливо, пов'язане з пластичною деформацією покриття через основи [29].

Значне збільшення амплітуди вільного кінця на зразках з іонно-плазовими покриттями систем TiN / CrN, Ti-TiN і СДП-2, ймовірно, пов'язано з контактним схоплюванням в зонах взаємодії покриття і затиску оснащення, що виключає зминання покриття через високу твердості (для покриття системи TiN / CrN) і малих дисипативних властивостей при внутрішньому терті в даних типах покриттів. Покриття зі сплаву марки СДП-2 щодо покриттів систем TiN / CrN і Ti-TiN більш пластичне, проте також показало підвищення амплітуди вільного кінця зразка [29].

Проведено також випробування зразків на визначення добротності коливальної системи в залежності від типу нанесеного покриття. З даних випробувань, найменші значення добротності показали зразки з антифрикційним покриттям ПФД-5. Зниження добротності також спостерігається на зразках з покриттям ВСДП-28. На зразках з покриттями систем TiN / CrN, Ti-TiN і СДП-2 значення добротності збільшується в порівнянні із зразками в початковому стані без покриттів [29].

Випробування на визначення добротності коливальної системи в залежності від типу покриттів також підтвердили перевагу твёрдосмазочного покриття марки ПФД-5 в розсіюванні енергії, що підводиться за рахунок своїх триботехнических властивостей в порівнянні з розглянутими іонно-плазовими

покриттями. Низька добротність, показана покриттям зі сплаву ВСДП-28, можливо пов'язана з алюмінієвою основою, яка розсіює енергію за рахунок своєї теплопровідності. Щодо низьких значень добротності для зразків з покриттями систем TiN / CrN і Ti-TiN, вони, ймовірно, пов'язані з шаруватою структурою даних типів покриттів. Найвищу добротність, тобто найнижче розсіювання енергії, показало покриття зі сплаву СДП-2, ймовірно, через свою аморфну структуру, отриману при конденсації [29].

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 [31].

Для досягнення високого рівня міцності матеріалу елементи його субструктури повинні залишатися нерухомими при більш високих напругах. З іншого боку, для забезпечення високого рівня демпфування потрібна рухливість елементів субструктури вже при незначних напругах. Отже, поєднання високих рівнів міцності і демпфуючої здатності в одному і тому ж матеріалі представляється в певній мірі взаємовиключним [3].

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 [3].

В роботах [3, 33, 34, 35, 36] досліджували мікроструктури вакуумних конденсатів міді, отриманих при різних температурах підкладки. Показано, що чим нижче температура підкладки, тим менше розмір зерен в конденсаті (рис.1.10).

З [3, 37] випливає, що 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 $T \approx 350^\circ\text{C}$. При подальшому зниженні температури їх кількість збільшується, що приводить до формування в кристалітів нанодвійникової субструктури [17].

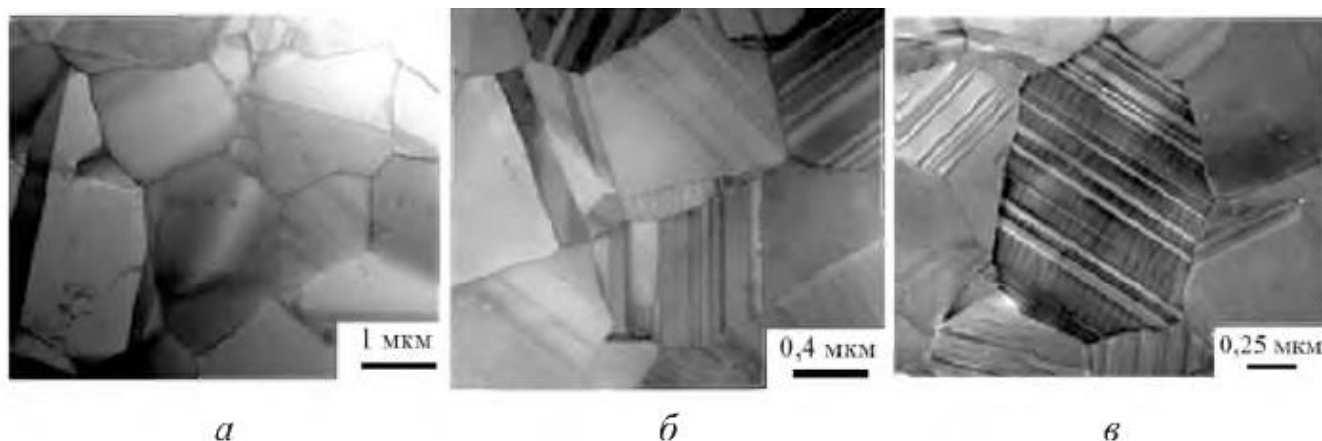


Рисунок 1.10 – Мікрофотографії конденсатів міді, осаджених при температурах підкладки 600 (а), 300 (б) та 165°C (в) [3]

Отже, на прикладі міді видно, що шляхом зниження температури підкладки можна формувати покриття, в яких розмір зерен змінюється в кілька разів, а товщина двійникових доменів - від мікро - до наномасштабного рівня [37].

У роботах [3, 34, 37, 38, 39] вивчали залежність логарифмічного декременту загасання коливань в залежності від температури осадження і розмірів зерен (рис.1.11, 1.12).

Конденсати з розмірами зерен вище критичного значення мають низький рівень демпфування, який не змінюється при їх нагріванні, демпфуючі властивості конденсатів з розмірами зерен менше критичного значення при нагріванні істотно підвищуються [3].

При переході від мікро - до нанодвійникової субструктури покриттів спостерігається не тільки зміна характеристик демпфування, але і різке зростання мікротвердості [3,17, 18].

Аналіз результатів показує, що незалежно від виду матеріалу дисипативні властивості конденсатів зазнають суттєвих змін, якщо розміри їх

структурних елементів (зерно або двійниковий домен) досягають величин, менших деяких критичних значень. З подальшим зменшенням розмірів структурних елементів ці зміни стають ще більш вираженими [3].

Згідно з існуючими уявленнями, деформаційна поведінка матеріалів при зменшенні розміру зерен визначається головним чином процесами, що розвиваються по межах зерен. На цій підставі можна припустити, що і демпфування в наноструктурованих матеріалах контролюється процесами по межах зерен. Як наслідок такого припущення, можна очікувати зміни характеристик демпфування матеріалу незалежно від його хімічного складу при переході в наноструктурований стан [3].

Формування нанодвійникового стану в конденсатах міді істотно впливає також на те, яким чином змінюється форма залежності логарифмічного декременту затухання при нагріванні зразка. Для конденсатів з доменами мікронного масштабу підвищення температури приводить в основному до збільшення нахилу даної амплітудної залежності (рис. 1.12, а). З амплітудних залежностей для конденсатів, що містять двійники нанорозмірного масштабу, видно, що енергетичні втрати при підвищенні температури помітно збільшуються для всіх амплітуд деформації (рис. 1.12, б) [3].

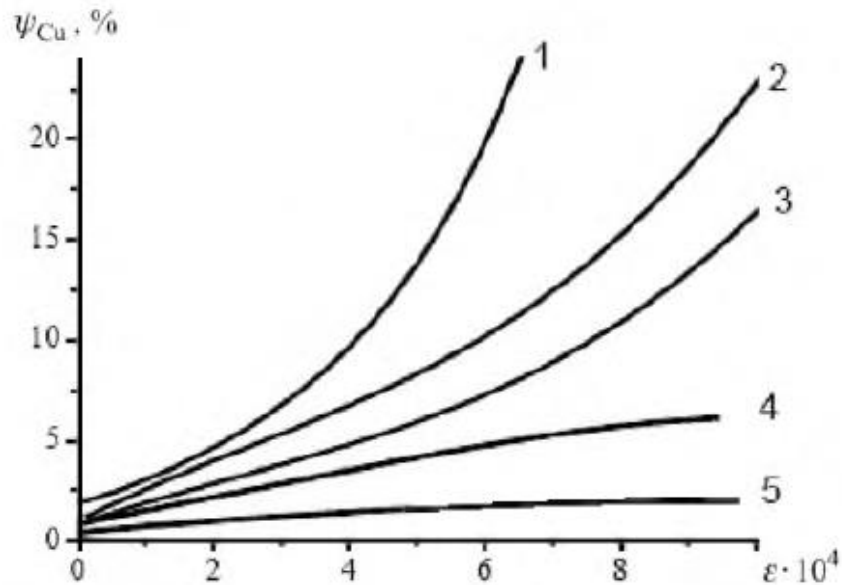


Рисунок 1.11 – Амплітудні залежності логарифмічного декременту загасання при кімнатній температурі для конденсатів міді з різними розмірами зерен D й товщиною двійникових доменів d : 1 – $D=3,5$ мкм, $d=3000$ нм; 2 – $D=2,5$ мкм, $d=2700$ нм; 3 – $D=2$ мкм, $d=2500$ нм; 4 – $D=1,4$ мкм, $d=100$ нм; 5 – $D=0,9$ мкм, $d=30$ нм [3]

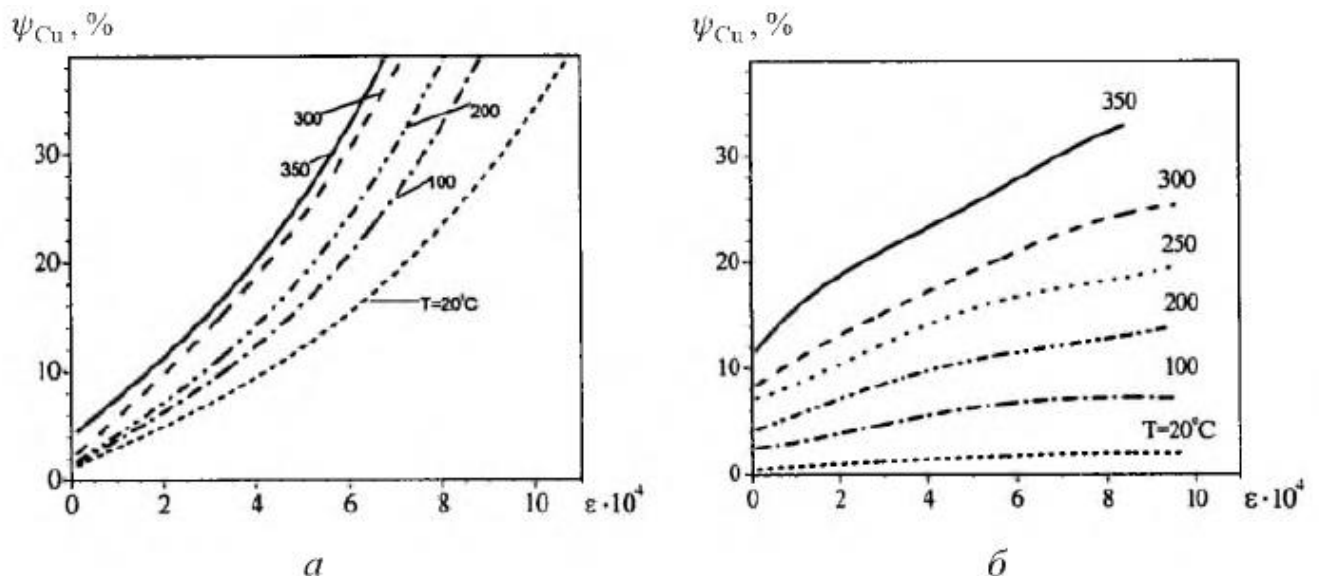


Рисунок 1.12 - Амплітудні залежності істинного коефіцієнта енергетичних втрат для конденсатів міді з двійниковими доменами товщиною 3000 (а) і 30 нм (б) при різних температурах [3]

Встановлено, що зі зниженням температури підкладки розмір зерен зменшується також у вакуумних конденсатах інтерметалічних сполук. Однак, на відміну від конденсатів міді, субструктура зерен при цьому практично не змінюється [37]. Разом з тим по досягненні деякої критичної величини розміру зерен дисипативні властивості інтерметалічних конденсатів зазнають якісні зміни. Якщо конденсати з розмірами зерен вище критичного значення мають низький рівень демпфірування, який не змінюється при їх нагріванні, то демпфуючі властивості конденсатів з розмірами зерен менше критичного значення при нагріванні істотно підвищуються [37]. На рисунку 1.12 представлені амплітудні залежності дійсного коефіцієнта енергетичних втрат коливань Ψ_{AlCuFe} для конденсатів Al-Cu-Fe з квазікристалічною структурою, що відрізняються розмірами зерен.

Видно, що величина Ψ_{AlCuFe} слабо залежить від амплітуди коливань і характеризується низьким рівнем при кімнатній температурі. При підвищенні температури зразка амплітудна залежність $\Psi_{\text{AlCuFe}}(\epsilon)$ конденсатів з субмікронним розміром зерен слабо змінюється (рис. 1.13, а). На противагу цьому для конденсатів з наноквазікристалічною структурою рівень Ψ_{AlCuFe} з підвищенням температури істотно збільшується в усьому інтервалі амплітуд деформації (рис. 1.13, б), як і в разі нанодвійникової міді. Однак, на відміну від нанодвійникової міді, збільшення рівня дисипативних властивостей наноквазікристалічних конденсатів при нагріванні відбувається, якщо температура зразка перевищує деяке граничне значення (близько 175°C), до цієї температури амплітудні залежності Ψ_{AlCuFe} практично не змінюються [3].

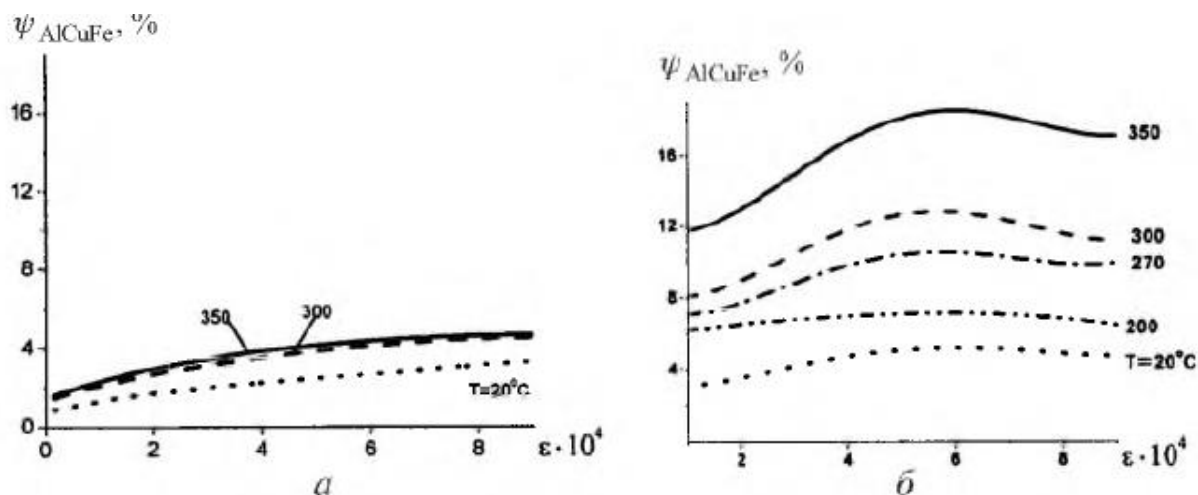


Рисунок 1.13 - Амплітудні залежності істинного коефіцієнта енергетичних втрат для квазікристалічних конденсатів Al-24 Вага.% Cu-14 вага.% Fe з розмірами зерен 580 (а) і 30 нм (б) при різних температурах [3]

Значна зміна демпфуючих властивостей встановлена також у разі конденсатів, сформованих на основі металоцерамічних систем, за умови, що розміри їх зерен зменшуються до наномасштабних величин [32]. Як приклад на рисунку 1.13 представлена амплітудна залежність істинного коефіцієнта енергетичних втрат в конденсатах MgO-10 вага.% SN-17 вага.% Cr із середнім розміром зерна приблизно 10 нм [32]. Як і у випадку наноквазікристалічних конденсатів, величина залежить від амплітуди немонотонно: при певних амплітудах спостерігається максимум дисипації енергії коливань. Для таких металоцерамічних конденсатів, як і для наноквазікристалічних існує певна порогова температура ($\sim 250^\circ\text{C}$), при нагріванні вище якої рівень демпфування матеріалу зростає для всіх амплітуд деформації.

Зазначимо, що мікротвердість конденсатів на основі металоцерамічної системи MgO-10 вага.% SN-17 вага.% Cr в наноструктурованому стані досягає 16...18 ГПа [32]. Аналіз результатів показує, що незалежно від виду матеріалу (інтерметалідів, металоцераміка, чистий метал) дисипативні властивості конденсатів перетерплюють істотні зміни, якщо розміри їх структурних елементів (зерно або двійниковий домен) досягають величин, менших деяких

критичних значень. З подальшим зменшенням розмірів структурних елементів ці зміни стають ще більш вираженими.

Згідно з існуючими уявленнями, деформаційна поведінка матеріалів при зменшенні розміру зерен визначається головним чином процесами, що розвиваються по межах зерен. На цій підставі можна припустити, що і демпфування в наноструктурованих матеріалах контролюється зерномежевими процесами. Як наслідок такого припущення, з одного боку, можна очікувати зміни характеристик демпфування матеріалу незалежно від його хімічного складу при переході в наноструктурований стан. З іншого боку, мають місце відмінності в характеристиках демпфування наноструктурованих матеріалів, що відрізняються структурою меж між елементами їх мікро- або субструктури: наприклад, спостерігаються відмінності в зміні дисипативних властивостей при нагріванні конденсатів Al-Cu-Fe, Sn-Cr-MgO і міді. Якщо в конденсатах Al-Cu-Fe і Sn-Cr-MgO наноструктурований стан формується на основі зерен, розділених некогерентними межами [37], то в конденсатах міді нанорозмірні елементи субструктури (двійникові домени) розділені когерентними кордонами [35]. З представлених даних видно, що рівень дисипації енергії коливань в конденсатах з когерентними кордонами підвищується при нагріванні безперервно. Навпаки, у конденсатів, в яких переважають некогерентні межі зерен, рівень демпфування починає підвищуватися при нагріванні тільки вище деякого порогового значення температури [3].

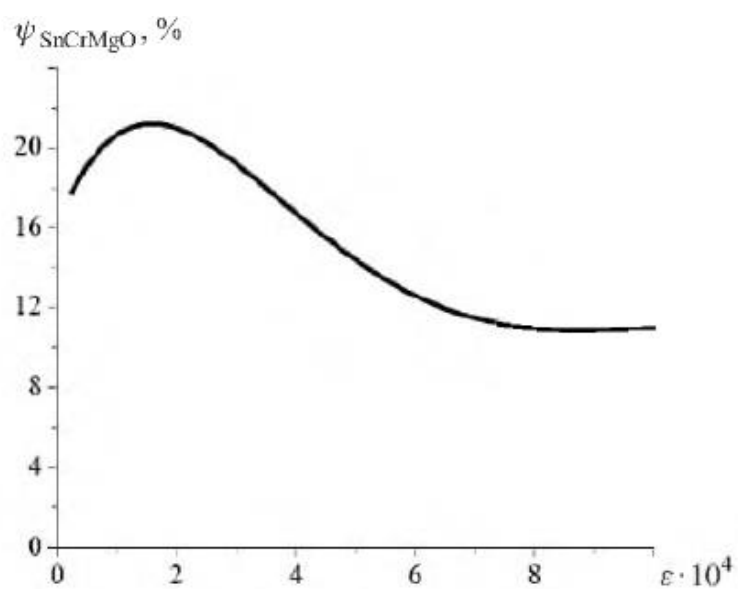


Рисунок 1.14 - Амплітудна залежність істинного коефіцієнта енергетичних втрат механічної енергії коливань в конденсатах MgO-10 вага.% SN-17 вага. % Cr при температурі 20° С [3]

2 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Об'єкт дослідження - лопатки третього ступеня компресора низького тиску двигуна Д-36 з титанового сплаву ВТ3-1, з нанесеним на перо лопаток наноструктурованим 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 ($\text{Ag}+6\% \text{Cd}$) отримували методом електронно-променевого випаровування і конденсації матеріалу покриття в вакуумі [3]. Товщина покриття близько 10 мкм. Покриття осаджували на частину пера лопатки, що піддається максимальній напрузі в експлуатації.

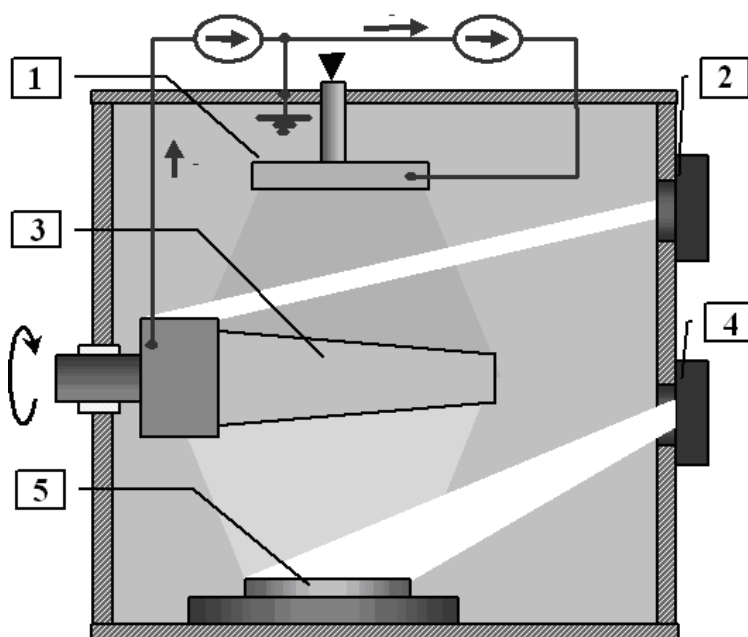


Рисунок 2.1 – Схема процесу осадження покриттів: 1 – джерело іонів + Ag; 2, 4 – електронно - променева гармата; 3 – титанова лопатка; 4 - електронна гармата випаровування металу; 5 – злиток металу, що випаровується [3]

На початковому етапі процесу осадження покриття, за допомогою електронно-променевої гармати 2, проводився нагрів лопатки до температури осадження 300°C , 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. 2.2.



Рисунок 2.2 - Лопатки з покриттям наноструктурованою 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 згідно з [39].

Вимірювання параметрів шорсткості R_z і R_a робочих поверхонь лопаток після УЗЗ і з покриттям наноструктурованої міддю виконували на приладі «Hommelwave T8000» (рис. 2.3) вздовж і впоперек вісі лопаток.



Рисунок 2.3 – Прилад «Hommelwave T8000» для вимірювання параметрів шорсткості

Заміри твердості проводилися на мікротвердомірі LECO LM-248AT (рис. 2.4), оснащеному системою автоматичного вимірювання твердості АМН-43 згідно з [40]. В якості індентора використовувався алмазний накінецьник у формі правильної чотиригранної піраміди з кутом між протилежними гранями 136° . До індентора додавалося навантаження 0,5 Н, з витримкою зусилля протягом 15 с.



Рисунок 2.4 - Мікротвердомір LECO LM-248AT

Випробування на втому лопаток з покриттями проводили способом динамічного збудження в них коливань по першій згинальній формі на вібростенді ВЕДС-400 (рис. 2.5) згідно з [41]. Лопатки закріплювали в спеціальний замок і випробовували в резонансному режимі до появи макротріщини, що відповідало падінню частоти власних коливань. Було випробувано по 6 лопаток з покриттями з міді та срібла, для вихідних лопаток були використані дані з випробувань серійних лопаток. База випробувань $N=100$ млн. циклів.



Рисунок 2.5 – Вібростенд ВЕДС-400

Рентгеноструктурні дослідження проводились на дифрактометрі ДРОН-3 в мідному монохроматичному випромінюванні з фільтрацією дифракційних відображень та комп'ютерною обробкою даних.

Для дослідження впливу покриття пера лопаток на частоту власних коливань було проведено модальний аналіз в ANSYS Workbench для визначення частот коливання вихідної моделі лопатки (після УЗЗ) і лопатки покритої наноструктурованою міддю. Для проведення даного аналізу побудована твердотільна модель за номінальними розмірами відповідно до креслення.

З РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Дослідження дисипативних властивостей покриттів проводили в такій послідовності: встановили і закріпили стійку на столі вібратора, забезпечили щільне прилягання нижньої поверхні стійки до поверхні столу. Встановили лопатку в затиск, забезпечивши однакову величину зусилля затиснення (рис.3.1). Знайшовши частоту власних коливань лопатки, вивели на амплітуду коливань $2A=7$ мм, що відповідає напрузі у найбільш навантаженій зоні пера $\sigma=400$ Н/мм².

Енергію, необхідну для навантаження лопаток однаковим рівнем деформації ($2A=7$ 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 виконували на початку випробувань і після напрацювання 10, 20 і 30 хвилин. Результати вимірювань занесли в таблицю 3.1.

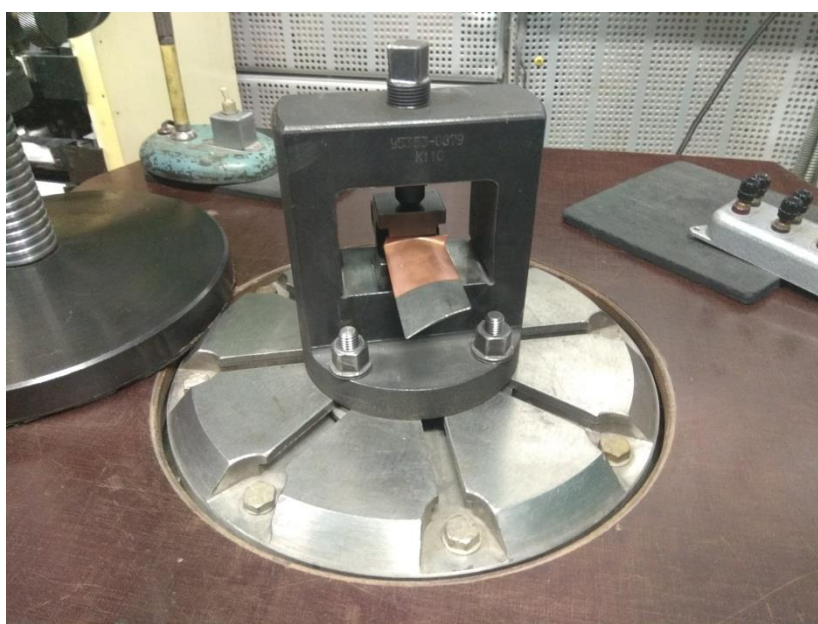


Рисунок 3.1 - Лопатка з покриттям із міді, закріплена на стенді ВЕДС-400

Таблиця 3.1 – Результати визначення енергії, необхідної для навантаження лопаток амплітудою коливання $2A=7$ 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.	12,9	6,5	83,85	12,2	6,2	75,6	12,2	6,2	75,6	12,0	6,1	73,2	548
Вихідна (УЗЗ) 2.	14,4	7,2	103,7	13,8	6,8	93,8	13,8	6,8	93,8	13,7	6,8	93,2	544
Покриття (УЗЗ+Ag) 1.	18,0	8,6	154,8	16,2	7,8	126,3	15,8	7,7	121,7	15,3	7,4	113,2	543
Покриття (УЗЗ+Ag) 2.	17,8	8,5	151,3	16,3	7,9	128,8	16,3	7,9	128,8	15,9	7,7	122,4	536
Покриття (УЗЗ+Cu) 1.	25,2	11,7	294,8	20,7	9,7	200,8	19,4	9,2	178,5	18,4	8,8	161,9	546
Покриття (УЗЗ+Cu) 2.	27,9	12,8	357,1	22,7	10,5	238,4	21,2	9,9	209,9	19,2	9,3	178,6	541

Порівнявши потужність, витрачену на задану амплітуду коливань $2A=7$ мм, вихідних лопаток (УЗЗ) і лопаток з покриттям (УЗЗ+Cu і УЗЗ+Ag), можна зробити висновок, що для лопаток, покритих міддю необхідно затратити набагато більше енергії, ніж вихідних, що говорить про дисипацію енергії. Лопатки з покриттями зі срібла (Ag+6% Cd) незначно відрізняються від вихідних лопаток, що свідчить про меншу демпфуючу здатність покриття. Отже, при однаковому рівні навантаження, лопатки з покриттям наноструктурованою міддю будуть мати меншу амплітуду коливань, ніж вихідні (УЗЗ), що призведе до зниження динамічної напруженості.

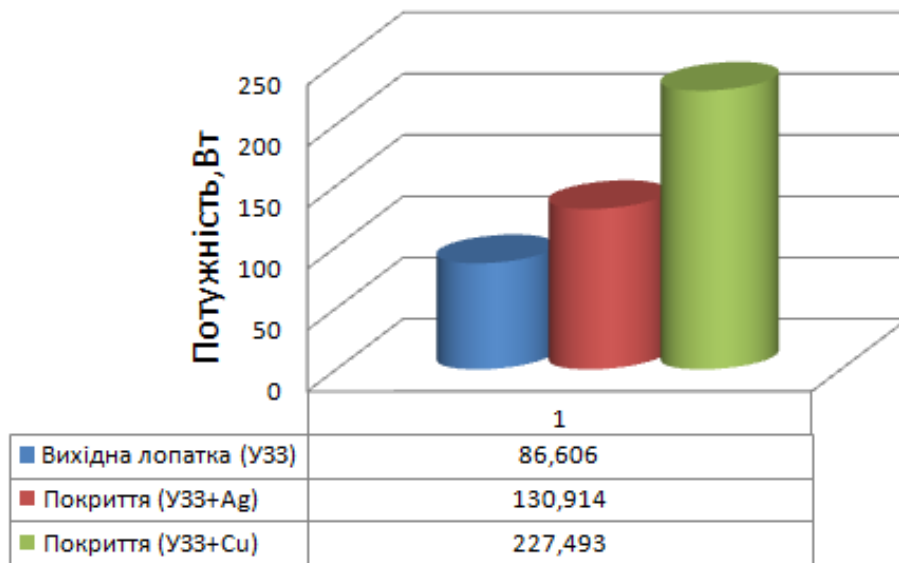


Рисунок 3.2 - Середня потужність, витрачена на нагрівання лопаток амплітудою коливання $2A=7$ мм

Вимір параметрів шорсткості R_z та R_a на лопатках виконували за схемою, що представлена на рис. 3.3. Виміри проводили на вихідних лопатках (після УЗЗ) та лопатках з покриттям (УЗЗ+Cu).

Отримані результати занесли в таблицю 3.2.

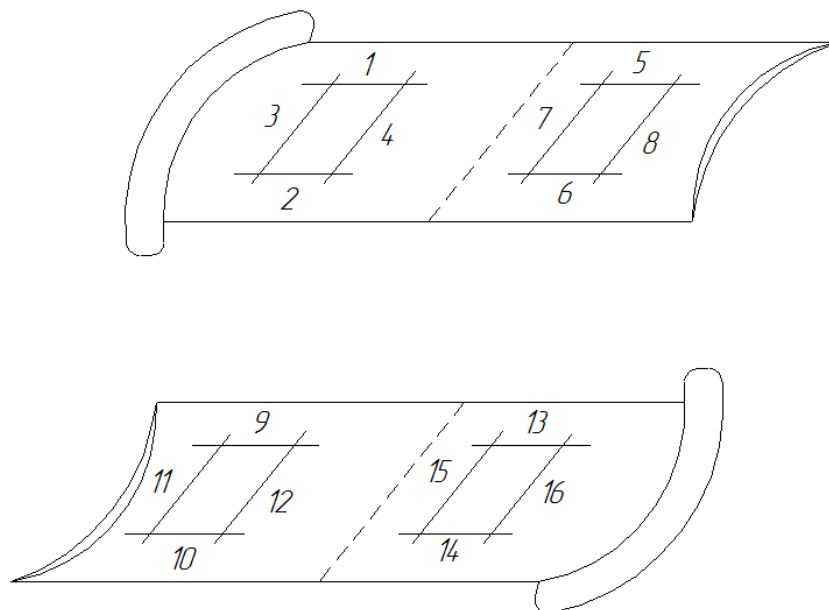


Рисунок 3.3 - Схема виміру шорсткості поверхні лопаток (1...16 – напрям та порядок вимірів)

Таблиця 3.2 – 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	0,18	0,19	1,75	1,75	0,19	0,21	1,58	1,99	0,1925	1,7675
	поперек вісі	0,48	0,31	1,58	1,53	0,29	0,29	1,50	1,69	0,3425	1,575
вихідна (УЗЗ)	вздовж вісі	0,18	0,17	1,38	1,53	0,17	0,22	1,44	2,03	0,185	1,595
	поперек вісі	0,35	0,30	1,72	1,58	0,27	0,39	1,54	2,36	0,3275	1,8

Зразки профілограм представлені на рис. 3.4-3.7.

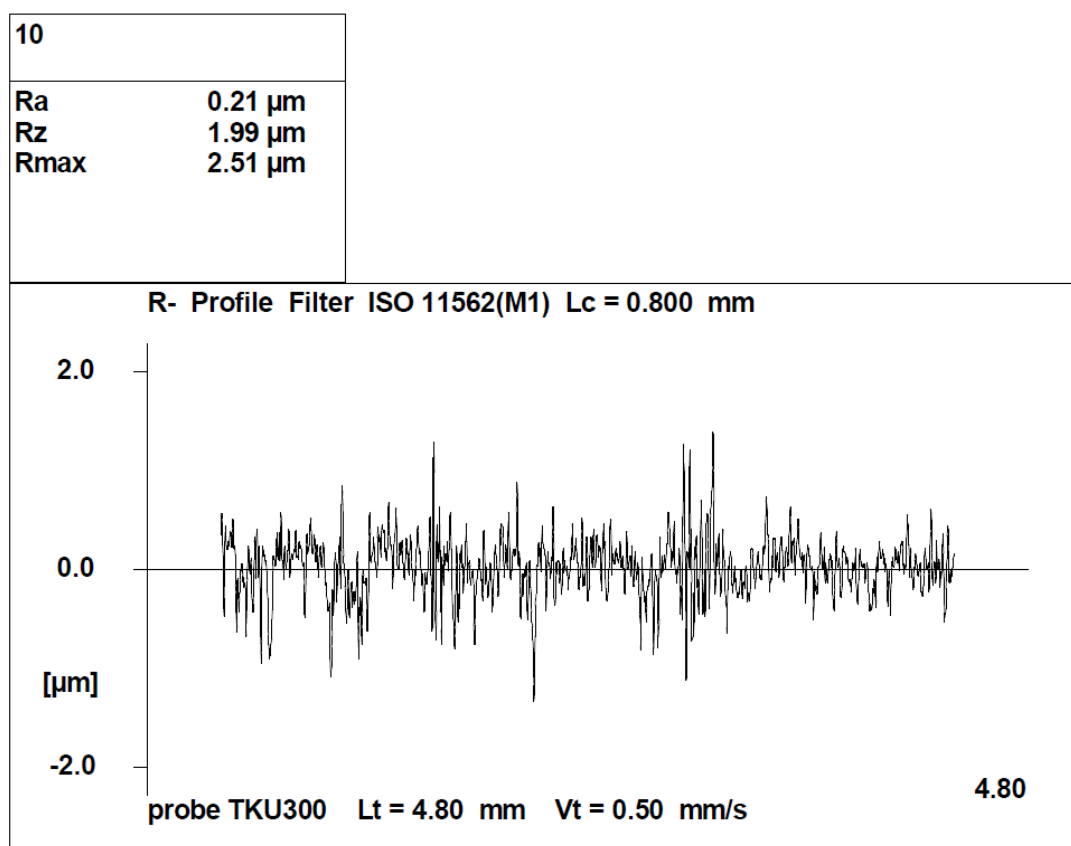


Рисунок 3.4 - Профілограма лопатки з покриттям (УЗЗ+Cu) вздовж вісі (№10 на схемі)

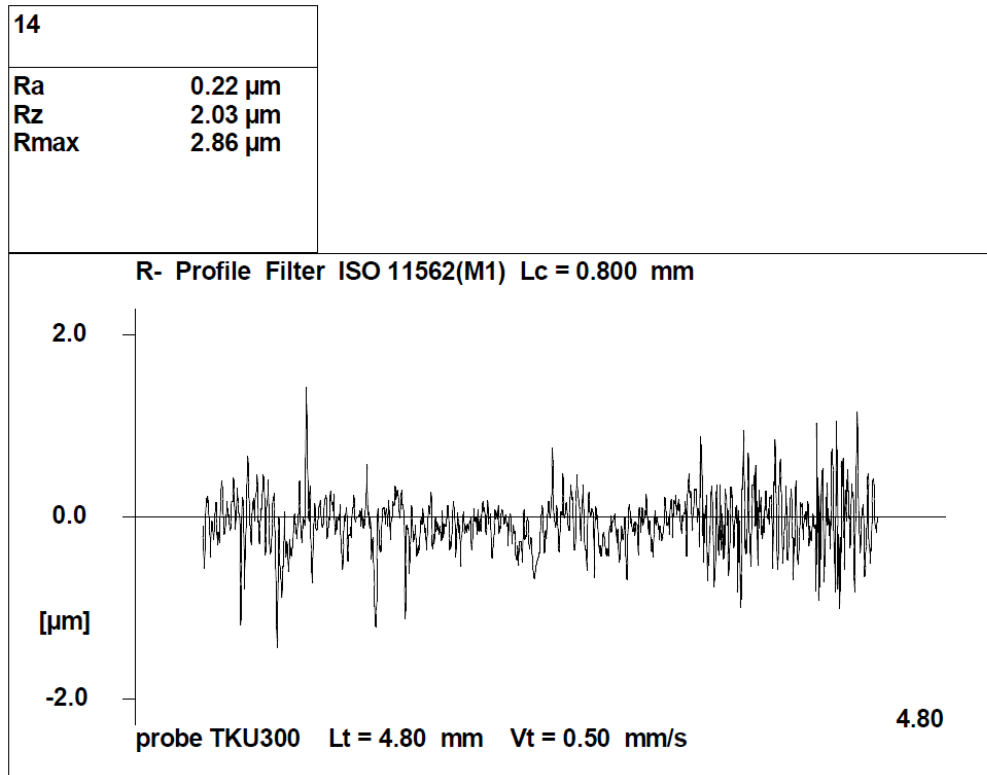


Рисунок 3.5 - Профілограма вихідної лопатки (УЗЗ) вздовж вісі (№14 на схемі)

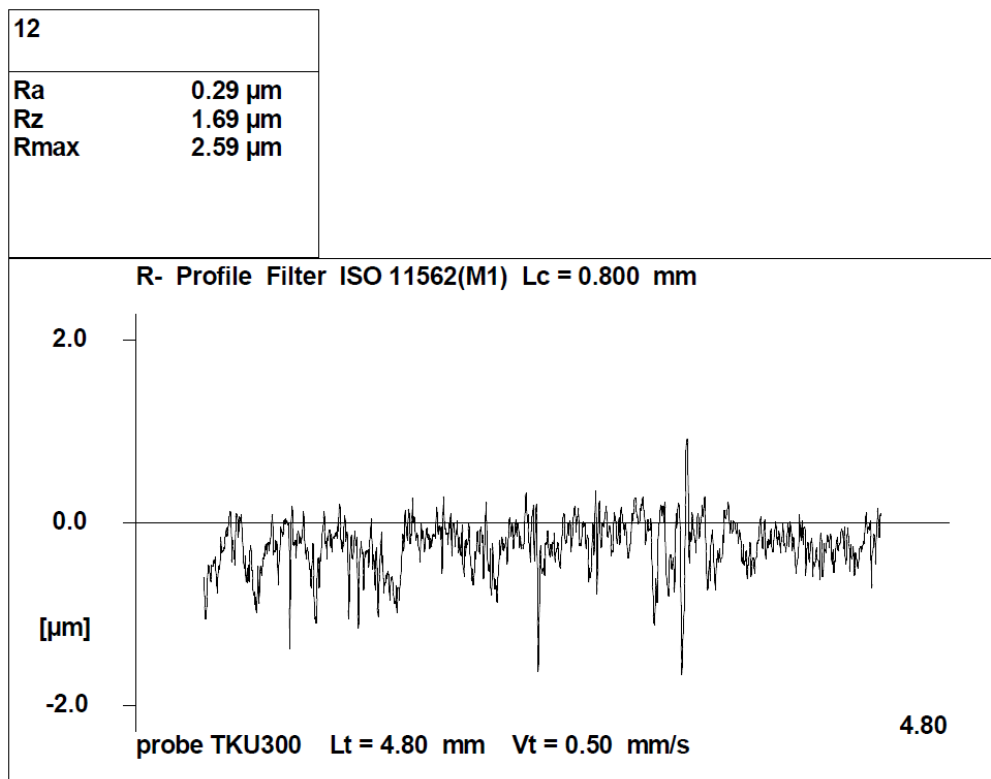


Рисунок 3.6 - Профілограма лопатки з покриттям (УЗЗ+Cu) поперек вісі (№12 на схемі)

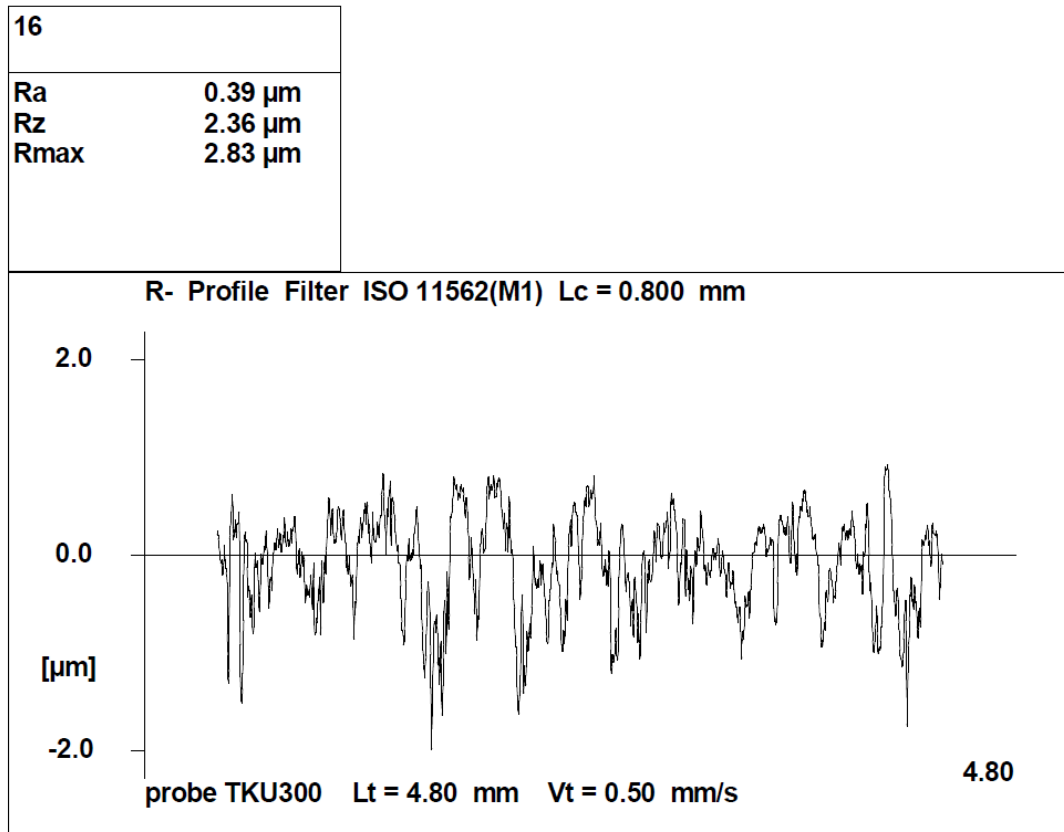


Рисунок 3.7 - Профілограма вихідної лопатки (УЗЗ) поперек вісі (№16 на схемі)

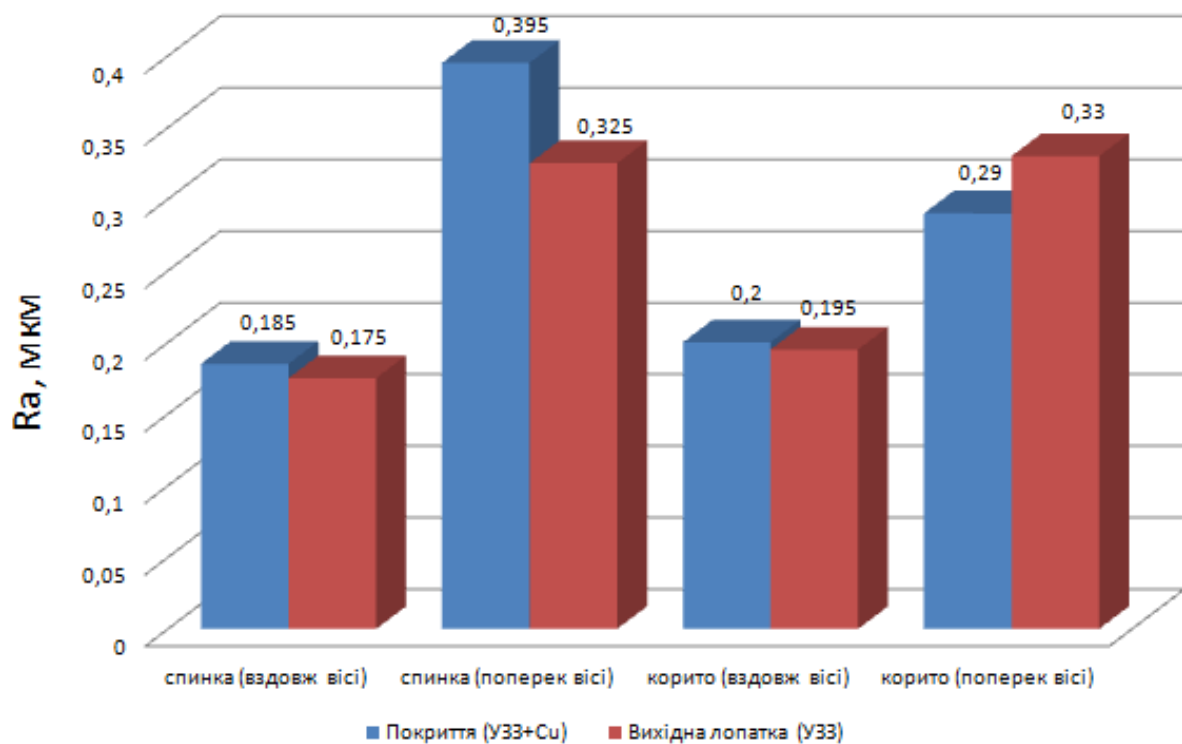


Рисунок 3.8 - Результати вимірів шорсткості лопаток вздовж та поперек вісі

За результатами отриманих вимірів параметрів шорсткості можна зробити висновок, що після покриття лопатки міддю якість поверхні практично не змінилася. Параметри шорсткості вздовж осі пера краще, ніж поперек. Середнє значення шорсткості покриття ($УЗЗ + Cu$) становить $0,2675 \text{ мкм}$, поверхні вихідної лопатки ($УЗЗ$) - $0,2563 \text{ мкм}$.

Зразки для вимірювання мікротвердості вирізали на електроерозійному верстаті з найбільш плоских ділянок профільної частини лопаток. На рис. 3.9 представлена схема виміру твердості зразків з покриттям міддю і без; виміри проводилися в трьох зонах і в перерізі у поверхні з кроком 30 мкм . Отримані результати представлені в табл. 3.5 та 3.6. Величину мікротвердості визначали як середнє значення п'яти відбитків індентора.

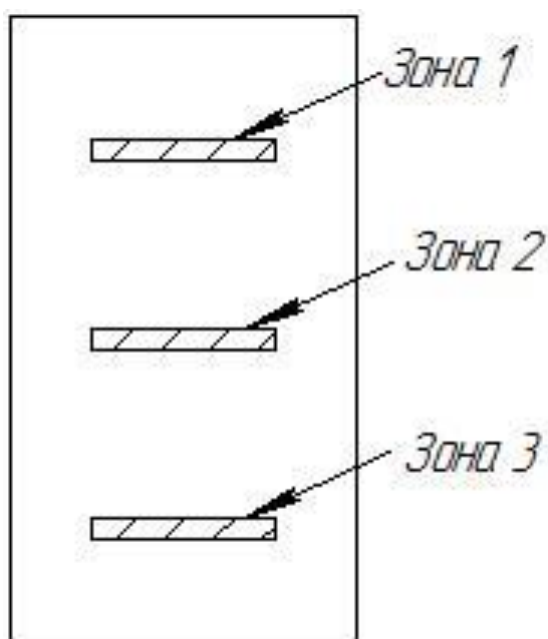


Рисунок 3.9 - Схема виміру мікротвердості поверхні зразків

Таблиця 3.3 – 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	412	0,01500	454	0,01429	428	0,01472
	2	413	0,01498	440	0,01452	417	0,01491
	3	436	0,01458	453	0,01431	429	0,01470
	4	443	0,01447	440	0,01452	423	0,01481
	5	426	0,01475	478	0,01393	425	0,01477
	Середнє	426	-	453	-	424	-
Зразок з покриттям (УЗЗ+Cu)	1	94	0,03141	91	0,01429	98	0,01472
	2	97	0,03092	93	0,01452	95	0,01491
	3	91	0,03192	106	0,01431	93	0,01470
	4	95	0,03124	87	0,0142	93	0,01481
	5	97	0,03092	103	0,01393	92	0,01477
	Середнє	95	-	96	-	94	-

Таблиця 3.4 - 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	382	0,01558	Зразок з покриттям (УЗЗ+Cu)	0,03	386	0,01550
	2	0,06	391	0,01540		0,06	389	0,01544
	3	0,09	381	0,01560		0,09	384	0,01554
	4	0,12	390	0,01542		0,12	393	0,01536
	5	0,15	385	0,01552		0,15	382	0,01558
	6	0,18	393	0,01536		0,18	390	0,01542

Отримані результати мікротвердості зразків в перерізі без покриття та з покриттям міддю практично не відрізняються, що свідчить про те, що даний метод нанесення покриттів не змінює твердість підшарової області лопаток. Дані мікротвердості поверхневого шару істотно відрізняються: після зміцнення кульками в ультразвуковому полі в результаті поверхневої пластичної

деформації твердість збільшується в середньому до 424 HV, покриття міді показало низькі значення твердості порядку 94 HV, що вимагає подальшого вивчення.

Результати випробувань на втому лопаток з покриттям міддю та залізом занесли в табл. 3.5 та 3.6 відповідно.

Таблиця 3.5 – Результати випробувань на втому лопаток з покриттям міддю

№ п.п	σ , МПа	$N \times 10^6$, цикл	Примітка
1	600	0,05	Зруйнована
2	500	0,1	Зруйнована
3	450	100	Не зруйнована
4	480	100	Не зруйнована
5	480	100	Не зруйнована
6	500	0,37	Зруйнована в місці дефекту покриття

Таблиця 3.6 – Результати випробувань на втому лопаток з покриттям сріблом

№ п.п	σ , МПа	$N \times 10^6$, цикл	Примітка
1	500	3,93	Зруйнована
2	480	68,0	Зруйнована
3	460	79,0	Зруйнована
4	480	43,39	Зруйнована
5	450	100,0	Не зруйнована
6	450	100,0	Не зруйнована

Результати дослідження втомної міцності лопаток з покриттям з наноструктурованої міді краще, ніж срібла. 50% лопаток покритих міддю

відпрацювали повну базу випробувань ($N = 100$ млн. циклів) без руйнування при напрузі 480 МПа, 30% лопаток покритих наноструктурованим сріблом (Ag + 6% Cd) «відстояли» 450 МПа без руйнування. Межа витривалості вихідних лопаток, остаточно оброблених УЗЗ 330 МПа, що говорить про позитивний вплив наноструктурованих покриттів на міцність від втоми.

Рентгеноструктурні дослідження проводили на зразках, покритих наноструктурованою міддю, сріблом і для порівняння вихідних після УЗЗ.

Дослідження проводились спільно з кафедрою «Фізичне матеріалознавство».

Зразки зняті в монохроматичному мідному випромінюванні з поверхневого шару лопатки. На рис. 3.10 приведена дифрактограма сплаву ВТЗ-1 після остаточної обробки УЗЗ. В структурі виявлені лінії α і β - фаз. Лінії мають значну ширину, що свідчить про наявність внутрішніх мікронапруг, викликаних пластичною деформацією поверхневого шару після обробки кульками в ультразвуковому полі.

Дифрактограма, знята з поверхневого шару лопатки з нанесеним покриттям міді показана на рис. 3.11. Наявність дифракційних ліній міді свідчить про кристалічну структуру покриття для використовуваної технології нанесення на поверхню лопатки. Покриття щільне, лінії α -фази від поверхневого шару титанового сплаву лопатки під покриттям дуже слабкі за інтенсивністю тому що вони практично поглинаються в покритті міді.

Особливістю структури покриттів, отриманих за даною технологією на лопатках з титанового сплаву ВТЗ-1, є утворення текстури в орієнтації зерен в покритті.

Для порівняння з лопаток був знятий шар покриття у вигляді порошку, для якого характерно хаотичне розташування кристалографічних напрямків в зернах, тобто практично безтекстурний. Дифрактограма для порошку міді показана на рис. 3.12.

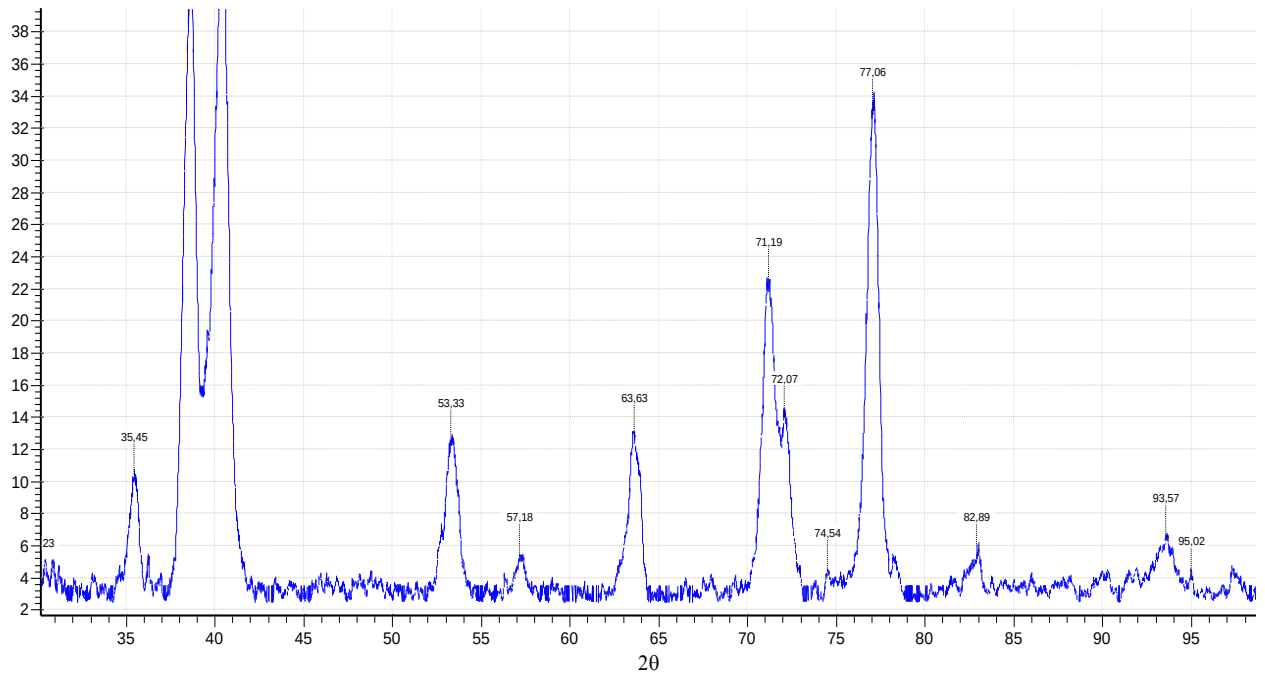


Рисунок 3.10 – Дифрактограма поверхневого шару лопатки після УЗЗ

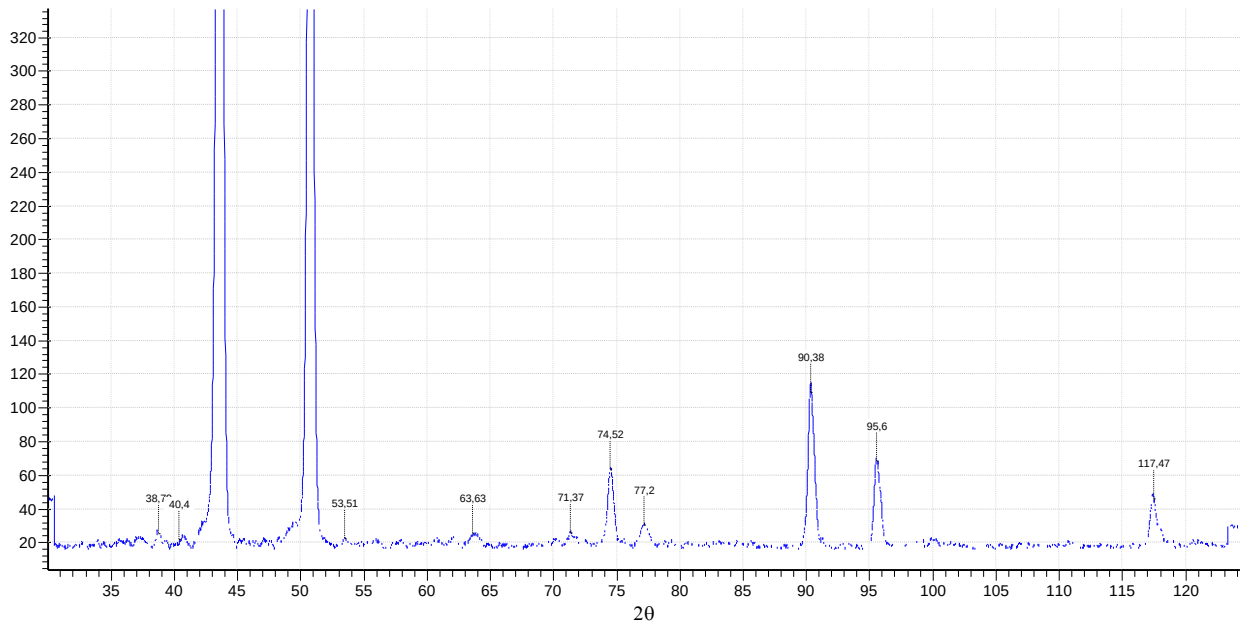


Рисунок 3.11 – Дифрактограма поверхневого шару лопатки з покриттям міддю

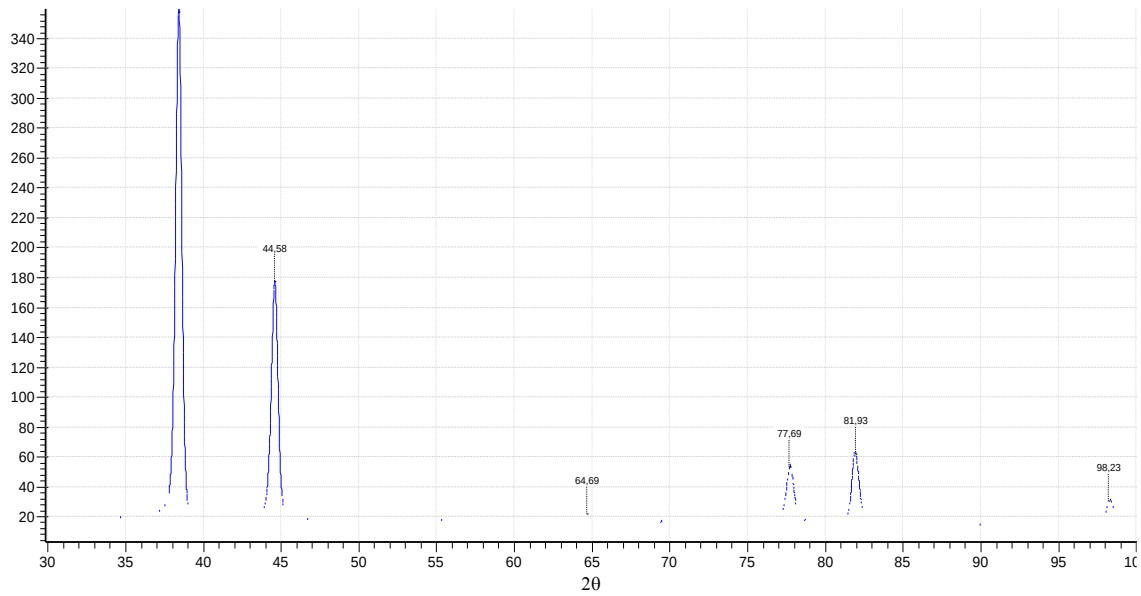


Рисунок 3.12 - Дифрактограма порошку міді

На рис. 3.13 представлена дифрактограма покриття срібла на лопатці.

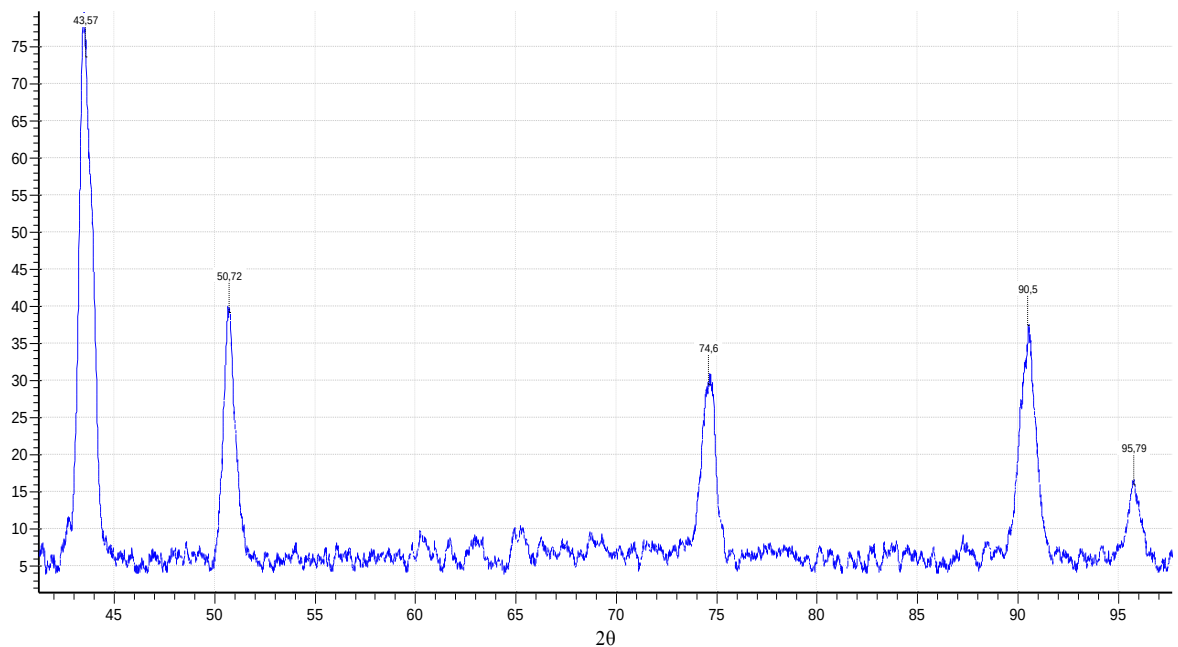


Рисунок 3.13 Дифрактограма покриття срібла на лопатці

На всіх дифрактограмах інтенсивності перших трьох ліній (111, 200 і 220) істотно розрізняються на дифракційних картинах покриття і для

порошкових зразків. Кількісні співвідношення інтенсивностей дифракційних ліній, обчислені після обробки дифрактограм, зведені в таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 - Співвідношення інтенсивностей (I) для перших трьох ліній дифрактограм

Матеріал	I_{111}/I_{220}	I_{200}/I_{220}
Покриття міді на лопатці	12,5	8,1
Порошок міді	2,6	1,3
Покриття срібла на лопатці	16,6	8,3
Порошок срібла	3,8	1,8

Істотне розходження в інтенсивності дифракційних ліній, отриманих від покриттів і порошків, свідчить про наявність переважного орієнтування в зернах покриттів, що дозволило зробити наступні висновки. У покритті більшість зерен щодо поверхні лопатки, в основному, орієнтоване кристалографічними напрямками $\langle 111 \rangle$ і, частково, $\langle 100 \rangle$. Аналогічно, такий висновок слід зробити і щодо покриття срібла (рис. 3.13 і табл. 3.7), що цілком зрозуміло, так як обидва метали мають ГЦК решітки, а утворення орієнтацій обумовлюється насамперед технологією отримання покриття і типом решітки. Слід зазначити, що утворення такої кристалографічної структури покриття буде покращувати зчеплення покриття з лопаткою і підвищувати зносостійкість, оскільки площині (111) в ГЦК решітці є найбільш щільноупакованими.

Проведено модальний аналіз в ANSYS Workbench для визначення частот коливання вихідної лопатки і лопатки з покриттям (УЗЗ + Cu). Для проведення даного аналізу побудована твердотільна модель вихідної лопатки (УЗЗ) і лопатки з покриттям (УЗЗ + Cu) товщиною 10 мкм в системі Siemens NX. Призначили покриттю властивості міді, а лопатці - титанового сплаву BT3-1.

При генерації кінцево-елементної сітки використовувався елемент Solid186 з однаковою густотою розбивки в моделях вихідної лопатки (УЗЗ) і

лопатки з покриттям (УЗЗ + Cu). Граничні умови в вигляді закріплення прикладали на замкову частину лопатки.

Математичне моделювання дає можливість візуально оцінити форми згинних коливань лопаток. Результати проведеного модального аналізу представлені в табл. 3.8. На рис. 3.14 наведена форма і частота першої згинної форми для вихідної лопатки (УЗЗ), на рис. 3.15 - відповідно для лопатки з покриттям (УЗЗ + Cu).

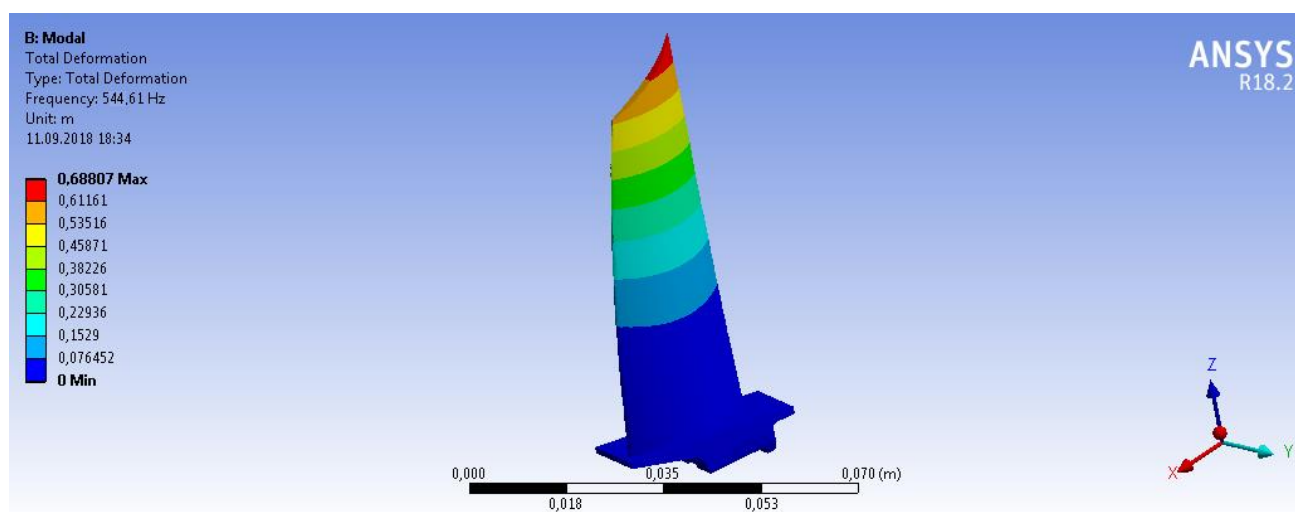


Рисунок 3.14 - Форма й частота першої згинної форми для вихідної лопатки (УЗЗ)

За результатами модального аналізу можна зробити висновок, що покриття з наноструктурованої міді не змінює частоту власних коливань вихідної лопатки. Результати даного аналізу узгоджуються з проведеними раніше дослідженнями (табл. 3.1)

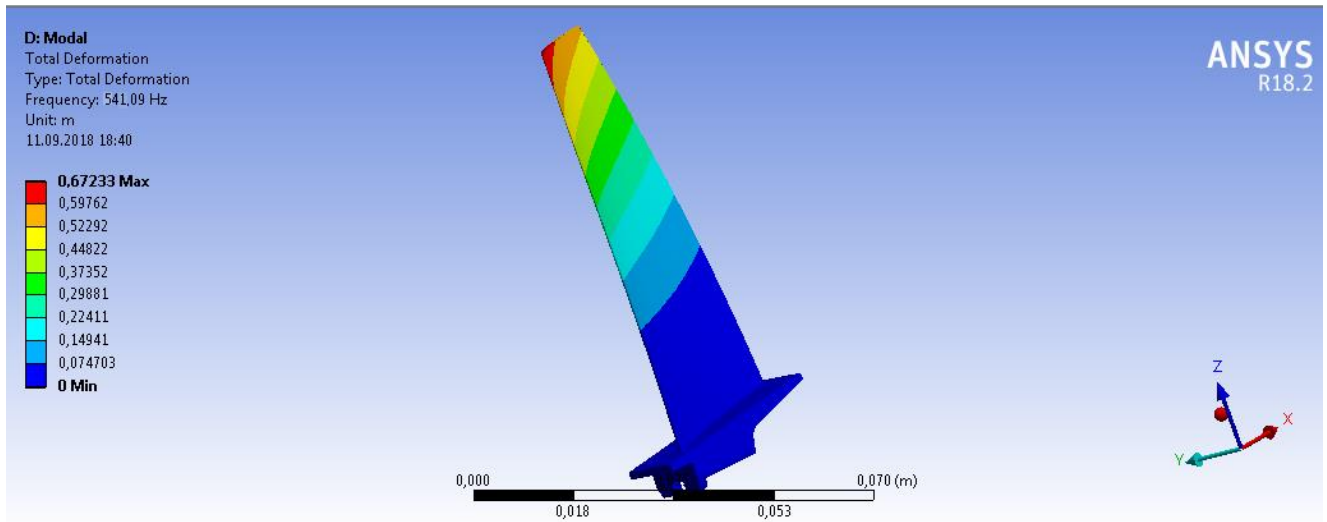


Рисунок 3.15 - Форма й частота першої згинної форми для лопатки з покриттям (У33+Cu)

Таблиця 3.8 – Розрахункові значення частот власних коливань моделей вихідної лопатки (У33) та лопатки з покриттям (У33+Cu)

Моди	Частота коливань, Гц	
	Вихідна лопатка (У33)	Лопатка з покриттям(У33+Cu)
1	544	541
2	1747	1730
3	2222	2210
4	4042	3968
5	4379	4315
6	5426	5389

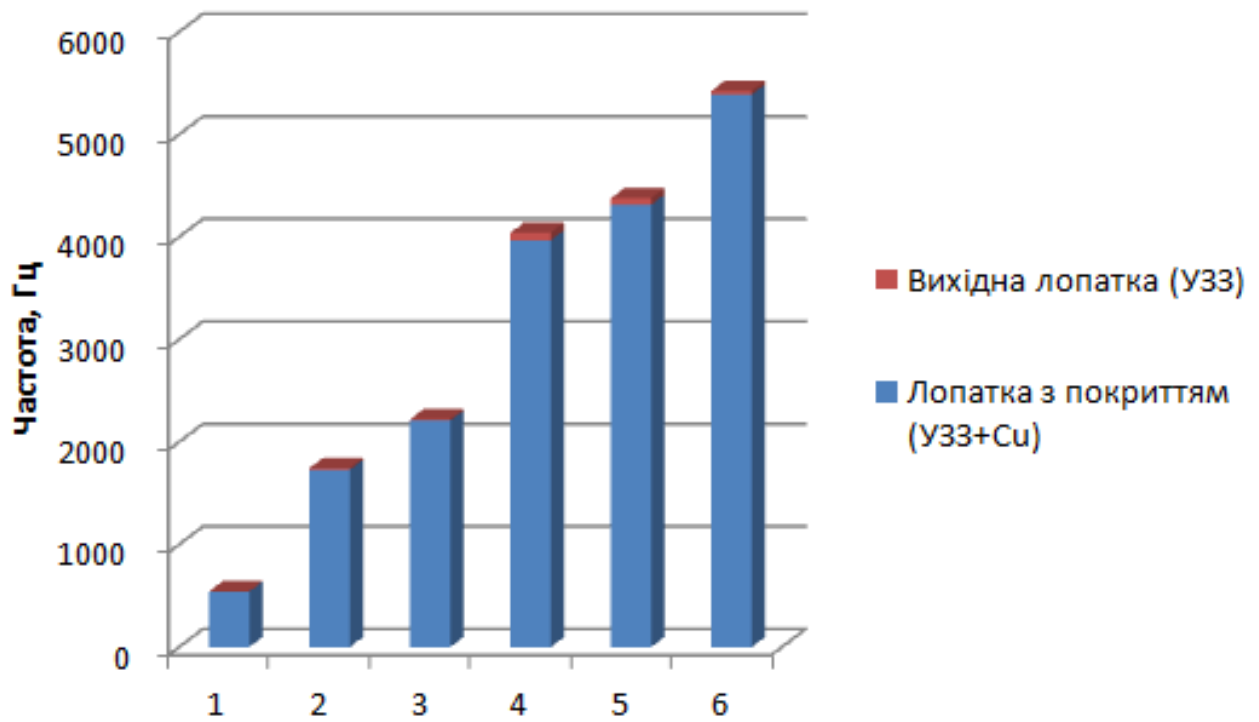


Рисунок 3.16 - Частоти власних коливань вихідної лопатки (УЗЗ) та лопатки з покриттям (УЗЗ+Cu) за результатами модального аналізу

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

В процесі виконання магістерської роботи були виконані такі види досліджень: випробування з визначення демпфуючої здатності та випробування на втому лопаток проводили на віброелектродинамічному стенді; на профілометрі вимірювали шорсткість поверхні лопатки з покриттям та без; рентгеноструктурні дослідження проводились на дифрактометрі; заміри твердості проводилися на мікротвердомірі; всі дослідження були оброблені за допомогою комп'ютерів.

4.1 Аналіз потенційних небезпек

Вимірювання шорсткості проводили на профілографі-профілометрі «Hommelwave T8000», а мікротвердість вимірювали на мікротвердомірі LECO LM-248AT. Робота на приладах, пов'язаних з електричним струмом вимагає чіткого виконання робіт з дотриманням техніки безпеки.

При використанні електроприладів існує небезпека ураження людини електричним струмом. Найбільш часто причиною поразки людини електрострумом є дотик його до неізольованих електродротів, до електропровідників з пошкодженою ізоляцією, а також до металевих конструктивних елементів машин, механізмів і апаратів, випадково опинилися під напругою. Іноді електропоразки відбуваються при користуванні несправними захисними засобами. Причиною також може бути виникнення крокової напруги на поверхні землі або підлоги, на якій стоїть людина, в результаті замикання проводу на землю або несправності заземлення. Одна з головних причин електротравм - слабе знання людьми правил електробезпеки.

Проходячи через організм людини, електрострум виробляє термічну, електролітичну, механічну і біологічну дію. При цьому можливі незворотні порушення функціональної діяльності життєво важливих органів людини.

Небезпечна і шкідлива дія на людину електроструму, електричної дуги і електромагнітних полів проявляється у вигляді електротравм і професійних захворювань.

Термічна дія струму проявляється опіками окремих ділянок тіла, нагріванням до високої температури тканин тіла, кровоносних судин, нервів, серця та інших органів, котрі знаходяться на шляху струму.

Електролітичне (електрохімічне) дія струму веде до розкладання органічних рідин (кров, лімфа і плазма) і порушення їх фізико-хімічного складу.

Механічна дія полягає в розшаруванні, розриві та інших механічних пошкодженнях тканин організму, зокрема, м'язової, стінок судин, судин легенів, внаслідок електродинамічного ефекту, а також миттєвого вибухоподібного утворення пари з тканинної рідини і крові внаслідок теплового дії електроструму.

Біологічна дія проявляється в подразненні і порушенні живої тканини, а також в порушенні внутрішніх біоелектричних процесів, що протікають в організмі і безпосередньо пов'язаних з його життєвими функціями. Це може супроводжуватися мимовільним, судинним скороченням м'язів, в тому числі м'язів серця і легенів. При цьому порушується кровообіг і робота органів дихання або повністю зупиняється їх діяльність.

Результат поразки людини електрострумом залежить від багатьох чинників: сили струму і часу його проходження через організм, характеристики струму (змінний або постійний), шлях струму в тілі людини, при змінному струмі - від частоти коливань.

Небезпека електроструму для людини зростає зі збільшенням тривалості впливу його на організм.

Випробування на втому проводили на віброелектродинамічному стенді ВЕДС-400, що дозволяє збуджувати та стабільно підтримувати коливання лопаток за основним тоном з необхідним рівнем навантаження. Дані

випробування супроводжуються високим рівнем шуму внаслідок збудження коливань.

В ході досліджень лопатку вводять в резонансну частоту приблизно 500 Гц та створюється звук інтенсивністю 120 дБ. Випробування проводять близько 40 годин.

Одним із шкідливих виробничих факторів є шум – безладне поєднання звуків різної частоти та інтенсивності (сили), що виникають при механічних коливаннях в твердих, рідких і газоподібних середовищах. Шум негативно впливає на організм людини, в першу чергу на центральну нервову і серцево-судинну системи. Тривалий вплив шуму знижує гостроту слуху та зору, підвищує кров'яний тиск, стомлює центральну нервову систему, в результаті чого послаблюється увага, збільшується кількість помилок в діях працівника, знижується продуктивність праці. Вплив шуму призводить до появи професійних захворювань і може стати також причиною нещасного випадку.

За тимчасовими характеристиками шум підрозділяється на постійний і непостійний (коливається в часі, переривчастий, імпульсний).

Постійним вважається шум, рівень якого за восьмигодинний робочий день змінюється в часі не більше ніж на 5 дБ, непостійним - більш ніж на 5 дБ. ГОСТ 12.1.003—83 встановлює гранично-допустимі умови постійного шуму на робочих місцях, при яких шум, діючи на працюючого протягом восьмигодинного робочого дня, не приносить шкоди здоров'ю. Нормування ведеться в октавних смугах частот зі середньгеометричними частотами 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 Гц.

Згідно з ГОСТ 12.1.003-83 «ССБТ. Шум. Общие требования безопасности» при роботі в лабораторії максимальний рівень шуму при частоті 500 Гц складає 58 дБ. При постійній дії шуму до 4-х годин максимальний рівень – 78 дБ; до 8-ми годин – 81 дБ. Тобто можна зробити висновок, що даний рівень шуму в лабораторії не припустим та потребує додаткових засобів захисту від шуму.

Виробничий шум порушує інформаційні зв'язки, що викликає зниження не тільки ефективності, але і безпеку діяльності людини, так як високий рівень шуму заважає почути застережливий сигнал небезпеки. Крім того, шум викликає звичайну втому. При дії шуму знижуються здатність зосередження уваги, точність виконання робіт, пов'язаних з прийомом і аналізом інформації, і продуктивність праці. При постійному впливі шуму працівники скаржаться на безсоння, порушення зору, смакових відчуттів, розлад органів травлення і т. д. У них відзначається підвищена схильність до неврозів. Енерговитрати організму при виконанні роботи в умовах шуму більше, тобто робота виявляється більш важкою. Шум, негативно впливаючи на слух людини, може викликати три можливих результати: тимчасово (від хвилини до декількох місяців) знизити чутливість до звуків певних частот, викликати пошкодження органів слуху або миттєву глухоту. Рівень звуку в 130 дБ викликає больове відчуття, а в 150 дБ призводить до ураження слуху при будь-якій частоті.

4.2 Заходи з забезпечення безпеки

Працівники до виконання досліджень обов'язково мають пройти інструктаж з техніки безпеки за НАОП 1.4.32-2.01-82 (ОСТ 11 090.028-82) "Інструкція з охорони праці. Порядок розроблення, оформлення та користування".

Так як всі дослідження оброблялись за допомогою комп'ютерів, то необхідно розглянути правила безпеки та загальні вимоги при роботі з комп'ютером.

Вимоги до обладнання і організації робочих місць користувачів ПК, згідно ДСанПіН 3.3.2.007-98 "Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин".

Вимоги до монітору згідно до вимог директиви ЕС 90/270 ЕЕС. Основним обладнанням робочого місця користувача комп'ютера є монітор, системний блок та клавіатура. Робочі місця мають бути

розташовані на відстані не менше 1,5 м від стіни з вікнами, від інших стін на відстані 1м, між собою на відстані не менше 1,5 м за ДБН В.2.2-28:2010 "Будинки і споруди. Будинки адміністративного та побутового призначення". Відносно вікон робоче місце доцільно розташовувати таким чином, щоб природне світло падало на нього збоку, переважно зліва.

Екран дисплея повинен бути розташованим перпендикулярно до напрямку погляду. Якщо він розташований під кутом, то стає причиною сутулості. Відстань від дисплея до очей повинна трохи перевищувати звичну відстань між книгою та очима. Перед екраном монітора, особливо старих типів, повинен бути спеціальний захисний екран. При його відсутності треба сидіти на відстані витягнутої руки від монітора. Фільтри з металевої або нейлонової сітки використовувати не рекомендується, тому що сітка спотворює зображення через інтерференцію світла. Найкращу якість зображення забезпечують скляні поляризаційні фільтри. Вони усувають практично всі відблиски, роблять зображення чітким і контрастним. Ще одним моментом, який стосується зору, є необхідність створення неоднорідного поля зору. Для цього можна розвісити на поверхнях (стінах) плакати та картини, виконані у спокійних тонах. Наприклад, пейзажі.

Робоча поза визначається ГОСТ 12.2.032-78. "ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования". Зручна робоча поза при роботі з комп'ютером забезпечується регулюванням висоти робочого столу, крісла та підставкою для ніг. Рациональною робочою позою може вважатися таке положення, при якому ступні працівника розташовані горизонтально на підлозі або підставці для ніг, стегна зорієнтовані у горизонтальній площині, верхні частини рук вертикальні.

Важливою є форма спинки крісла, яка повинна повторювати форму спини. Висота крісла повинна бути такою, щоб користувач не почував тиску на куприк або стегна. Крісло бажано обладнати бильцями. Його потрібно встановити так, щоб не треба було тягтися до клавіатури. Періодично

користувачу необхідно рухатися, вчасно змінювати положення тіла і робити перерви у роботі.

При напруженій роботі за комп'ютером щогодини необхідно робити перерву на 15 хвилин через кожну годину і треба займатися іншою справою. Декілька разів на годину бажано виконувати серію легких вправ для розслаблення. Максимальний час неперервної роботи - 4 години.

Кожні 2 роки повинен проводитись медичний огляд за рахунок роботодавця (Наказ міністерства охорони здоров'я України від 21 травня 2007р. №246 «Про затвердження порядку проведення медичного огляду працівників певних категорій»).

Вимоги електробезпеки при впливі електричних полів промислової частоти за ДСТУ 7237:2011.

Електроживлення електрообладнання приміщення з ПК здійснюється від мережі змінного струму напругою 220 В і частотою 50 Гц. Відповідно до вимог "ПУЕ-2014", електрообладнання в приміщенні з ПК, характеризується як електроустановки до 1000 В, тому згідно вимог глави 1.7 «ПУЕ» та ГОСТ 12.1.030-81 (2001) "ССБТ. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление", величина опору контуру захисного заземлення електрообладнання приміщення з ПК у будь-яку пору року не перевищує – 4 Ом.

Електробезпека повинна забезпечуватися:

- конструкцією електроустановок;
- технічними способами і засобами захисту;
- організаційними і технічними заходами.

Електроустановки і їх частини повинні бути виконані таким чином, щоб працюють не піддавалися небезпечним і шкідливим впливам електричного струму і електромагнітних полів, і відповідати вимогам електробезпеки.

Для забезпечення захисту від випадкового дотику до струмоведучих частин необхідно застосовувати такі способи і засоби: захисна оболонка; захисні огороження (тимчасові або стаціонарні); безпечне розташування струмоведучих частин; ізоляцію струмоведучих частин (робочу, додаткову,

посилену, подвійну); ізоляцію робочого місця; захисне вимкнення; запобіжну сигналізацію, блокування, знаки безпеки.

Для забезпечення захисту від ураження електричним струмом при дотику до металевих частин, які можуть опинитися під напругою в результаті пошкодження ізоляції, застосовують такі способи: захисне заземлення; занулення.

За безпечність конструкції, правильність вибору матеріалів, якість виконання, а також відповідність засобів захисту чинним в Україні нормативним документам повинні нести відповідальність керівники підприємств, установ, організацій (незалежно від форми власності), які виготовляють ці засоби захисту, орган, який видав сертифікат на виробництво і реалізацію захисних засобів, у тому числі і засобів захисту зарубіжного виробництва.

Основними засобами захисту від ураження електричним струмом є: забезпечення недоступності струмопровідних частин для випадкового дотику; використання електроенергії з безпечними рівнями напруги; усунення небезпеки ураження людей струмом при появі напруги на конструктивних частинах електроустаткування; використання індивідуальних засобів захисту від ураження електрострумом. Для попередження уражень електрострумом необхідно: чітко і в повному обсязі виконувати правила виконання робіт і технічної експлуатації.

4.3 Заходи з забезпечення виробничої санітарії та гігієни праці

Загальні санітарно-гігієнічні показники повітря в приміщенні при роботі в лабораторії повинні відповідати ГОСТ 12.1.005-88 "ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны". Оптимальні значення температури в холодну пору року при проведенні дослідницької роботи 18-20° С, в теплу пору року 21-23° С та мати відносну вологість 40-60%, швидкість

руху повітря в робочій зоні приміщення повинна бути не більше 0,2 м/с за ДСН 3.3.6.042-99 "Державні санітарні норми параметрів мікроклімату".

При розробці технологічних процесів, проектуванні, виготовленні та експлуатації машин, виробничих будівель і споруд, а також при організації робочого місця слід приймати всі необхідні заходи щодо зниження шуму, що впливає на людину на робочих місцях, до значень, що не перевищують допустимі:

- розробкою шумобезбечної техніки;
- застосуванням засобів і методів колективного захисту за ГОСТ 12.1.029-80;
- застосуванням засобів індивідуального захисту за ГОСТ 12.4.051-87.

Зони з рівнем звуку або еквівалентним рівнем звуку вище 65 дБА повинні бути позначені знаками безпеки по ГОСТ 12.4.026-76. Працюючи в цих зонах адміністрація зобов'язана забезпечувати засобами індивідуального захисту по ГОСТ 12.4.051-87.

На підприємствах, в організаціях і установах повинен бути забезпечений контроль рівнів шуму на робочих місцях не рідше одного разу на рік.

У стандартах і (або) технічних умовах на машини повинні бути встановлені граничні значення шумових характеристик цих машин.

Шумову характеристику слід вибирати з числа передбачених ГОСТ 23941-79.

Для зменшення шкідливого впливу виробничого шуму на працівників необхідно застосовувати звукоізоляцію та глушники шуму. Принцип звукоізоляції базується на тому, що більша частина звукової енергії, яка потрапляє на перешкоду, відбивається та лише незначна її частина проходить крізь неї. Також окрім звукоізоляції необхідно використовувати навушники.

Стан освітлення виробничих приміщень відіграє важливу роль для попередження виробничого травматизму. Багато нещасних випадків на виробництві стається через погане освітлення.

Природне освітлення - освітлення приміщень світлом неба (прямим або відбитим), яке проходить крізь світлові прорізи в зовнішніх огорожуючих конструкціях.

Робоче освітлення - освітлення, яке забезпечує нормовані освітлювальні умови (освітленість, якість освітлення) в приміщеннях і в місцях виконання робіт поза будинками

Суміщене освітлення - освітлення, за якого недостатнє за нормами природне освітлення доповнюється штучним.

Природне освітлення має важливе фізіолого-гігієнічне значення для працюючих. Воно сприятливо впливає на органи зору, стимулює фізіологічні процеси, підвищує обмін речовин та покращує розвиток організму в цілому. Сонячне випромінювання зігріває та знезаражує повітря, очищуючи його від збудників багатьох хвороб (наприклад, вірусу грипу). Окрім того, природне світло має і психологічну дію, створюючи в приміщенні для працівників відчуття безпосереднього зв'язку з довкіллям.

Природному освітленню властиві і недоліки: воно непостійне в різні періоди доби та року, в різну погоду; нерівномірно розподіляється по площі виробничого приміщення; при незадовільній його організації може викликати засліплення органів зору.

На рівень освітленості приміщення при природному освітленні впливають наступні чинники: світловий клімат; площа та орієнтація світлових отворів; ступінь чистоти скла в світлових отворах; пофарбування стін та стелі приміщення; глибина приміщення; наявність предметів, що заступають вікно як зсередини так і з зовні приміщення.

Оскільки природне освітлення непостійне впродовж дня, кількісна оцінка цього виду освітлення проводиться за відносним показником — коефіцієнтом природнього освітлення (КПО)

Згідно з вимогами ДБНВ.2.5-28-2006 «Природне і штучне освітлення» приміщення з постійним перебуванням людей повинно мати, як правило, природне освітлення. Без природного освітлення допускається проектування

приміщень, які визначені державними будівельними нормами на проектування будинків і споруд, нормативними документами з будівельного проектування будинків і споруд окремих галузей промисловості, затвердженими в установленому порядку, а також приміщення, розміщення яких дозволено в підвальних поверхах будинків.

Кількісною характеристикою освітлення є освітленість. Освітленість визначається як відношення світлового потоку, що падає на елемент поверхні, до площі цього елементу:

$$E = \frac{\Phi}{S}$$

де Φ – світловий потік;

S – площа елементу.

За одиницю освітленості прийнято люкс (лк).

Для розрахунку природної освітленості за вихідні дані візьмемо лабораторію розмірами 8х4х3 м з боковим освітленням.

Для нормування та розрахунку природного освітлення приміщень використовують коефіцієнт природної освітленості (КПО):

$$e = \frac{E_{вн}}{E_{зов}} \cdot 100$$

де e – коефіцієнт природної освітленості;

$E_{вн}$ – освітлення в даній точці приміщення, що створюється світлом небосхилу, лк;

$E_{зов}$ – освітленість зовнішньої горизонтальної поверхні, що створюється світлом відкритого небосхилу, лк.

При нормуванні природної освітленості визначаються: найменший розмір об'єкту розрізнення, відповідний йому розряд зорової роботи; нормований коефіцієнт природної освітленості.

За [43, с.12, дод. А] визначимо розряд та характеристику зорової роботи; КПО та розрахуємо e_n .

Так як для проведення вимірів необхідно дотримуватись точності, фокусуватись на достатньо малих об'єктах, то розряд зорової роботи приймаємо 3 (висока точність) та під розряд а.

За цими даними отримуємо КПО 2%.

Нормовані значення КПО визначається за формулою:

$$e_n = e_n^m \cdot m \cdot c$$

де e_n^m – нормоване значення КПО для 3 поясу світлового клімату [43, с.12];

$m = 0,9$ – коефіцієнт світлового клімату для України;

$c = 0,75$ – коефіцієнт сонячності клімату за [43, с.13, дод. В].

$$e_n = 2 \cdot 0,9 \cdot 0,75 = 1,35 \%$$

При розрахунку природного освітлення визначають сумарну площу вікон та ліхтарів, потрібних для забезпечення нормованого значення КПО на робочих місцях.

При боковому освітленні площі світлових прорізів розраховують за допомогою формули:

$$S_B = \frac{e_n \cdot K_3 \cdot \eta_e}{100 \cdot \tau \cdot r_1} \cdot S_n \cdot K_{БУД}$$

де S_B – площа вікон;

$K_3 = 1,3 \dots 1,5$ – коефіцієнт запасу;

$\eta_e = 10,5$ – світлова характеристика вікон за [43, с.14, дод. Д];

S_n – площа підлоги приміщень;

$K_{БУД} = 1,4$ – коефіцієнт затінення вікон будівлями, що стоять навпроти за [43, с.13, дод. Г];

$\tau_1 = 2 \dots 3,3$ – коефіцієнт, що враховує підвищення КПО при боковому освітленні за рахунок світла, відбитого від поверхонь приміщення;

τ – загальний коефіцієнт світлопропускання:

$$\tau = \tau_1 \cdot \tau_2 \cdot \tau_3 \cdot \tau_4 \quad (2.5)$$

де $\tau_1 = 0,8$ – коефіцієнт світлопропускання скла за [43, с.14, дод. Е];

$\tau_2 = 0,7$ – коефіцієнт, що враховує втрату світла у віконній рамі за [43, с.14, дод. Е];

τ_3 – коефіцієнт, що враховує втрати світла у несучих конструкціях (при боковому освітленні – 1; при верхньому – 0,8...0,9);

$\tau_4 = 1$ – коефіцієнт, що враховує втрати світла у сонцезахисних пристроях за [20, с.14, дод. Е].

$$S_B = \frac{1,35 \cdot 1,4 \cdot 10,5}{100 \cdot 0,56 \cdot 2,5} \cdot 32 \cdot 1,4 = 6,3 \text{ м}^2 \approx 6 \text{ м}^2$$

$$\tau = 0,8 \cdot 0,7 \cdot 1 \cdot 1 = 0,56$$

Розміри вікон приймаємо 2х3 м. Достатня кількість вікон на дану площу приміщення – 2 вікна.

4.4 Заходи з пожежної безпеки

Пожежна безпека повинна забезпечуватися шляхом проведення організаційних заходів та технічних засобів, спрямованих на запобігання пожежам, забезпечення безпеки людей, зниження можливих майнових втрат і зменшення негативних екологічних наслідків у разі їх виникнення,

створення умов для успішного гасіння пожеж згідно з НАПБ А.01.001-2014 "Правила пожежної безпеки в Україні".

Клас можливої пожежі (А, В, С, D, F, E) визначається згідно ДСТУ EN 2:2014 "Класифікація пожеж (EN 2:1992, EN 2:1992/A1:2004, IDT)" та категорії його пожежної небезпеки, відповідно до вимог ДСТУ Б В.1.1-36:2016 "Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою" та СНиП 2.09.02-85 "Производственные здания". Тобто указати до якої категорії виробництва з пожежної небезпеки (А, Б, В, Г, Д) належить об'єкт (дослідницька лабораторія, конструкторське бюро, дільниця, цех, тощо).

Відповідно до категорії виробництва з пожежної небезпеки і вимог ДБН В.1.1-7:2016 "Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги" визначають ступінь вогнестійкості приміщення.

Відповідно до вимог ДБН В.1.1-7:2016 "Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги", передбачити шляхи евакуації працівників на випадок пожежі (переходи, евакуаційні виходи).

Пожежа, яка може виникнути відноситься до класу пожеж А, це пожежі твердих речовин переважно органічного походження, горіння яких супроводжується тлінням (деревина, текстиль, папір) згідно ДБН В.1.1.7-2002 "Пожежна безпека об'єктів будівництва".

Причинами пожежі можуть бути: несправність електрообладнання (коротке замикання, перевантаження); тривале перевантаження двигунів, приводів; порушення ізоляції, потрапляння іскор або стружки з високою температурою на легкозаймисті матеріали або спецодяг.

Рекомендується для даної категорії приміщення і класу пожежі оснащувати приміщення порошковими вогнегасниками місткістю 5 л в кількості 1 шт згідно НАПБ Б.03.001-2004 "Типові норми належності вогнегасників". При чому гранична захищувана площа складає 900 м², що більш ніж достатньо для приміщення площею 32 м² в якому проводяться науково-дослідницькі роботи. В порошкових вогнегасниках джерелом гасіння є

сухий порошок. Призначаються для гасіння твердих, рідких та газоподібних речовин, а також для матеріалів, які тліють. Рекомендуються для гасіння електроустановок з напругою до 1 000 В. Зберігати потрібно у вертикальному стані в легкодоступному місці, захищеному від прямих сонячних променів і далеко від нагрівальних приладів.

На об'єктах з постійним або тимчасовим перебуванням на них 100 і більше осіб або таких, що мають хоча б одне окреме приміщення із одночасним перебуванням 50 і більше осіб (далі - об'єкти з масовим перебуванням людей), у будинках та спорудах (крім житлових будинків), котрі мають два поверхи і більше, у разі одночасного перебування на поверсі більше 25 осіб, а для одноповерхових - більше 50 осіб, мають бути розроблені і вивішені на видимих місцях плани (схеми) евакуації людей на випадок пожежі. Територія об'єкта, а також будинки, споруди, приміщення мають бути забезпечені відповідними знаками безпеки. Знаки безпеки, їх кількість, а також місця їх встановлення повинні відповідати ДСТУ ISO 6309:2007 "Протипожежний захист. Знаки безпеки. Форма та колір" (ISO 6309:1987, IDT) та ГОСТ 12.4.026-76 "ССБТ. Цвета сигнальные и знаки безопасности". З метою проведення заходів із запобігання виникненню пожеж та організації їх гасіння на підприємствах створюється добровільна пожежна охорона, для забезпечення функціонування якої утворюються пожежно-рятувальні підрозділи. Порядок функціонування добровільної пожежної охорони затверджено постановою Кабінету Міністрів України від 17 липня 2013 року № 564.15.

Усі працівники при прийнятті на роботу на робочому місці повинні проходити інструктажі з питань пожежної безпеки (далі - протипожежні інструктажі). Особи, яких приймають на роботу, пов'язану з підвищеною пожежною небезпекою, повинні попередньо (до початку самостійного виконання роботи) пройти спеціальне навчання (пожежно-технічний мінімум).

Керівник об'єкта та/або підприємства своїм розпорядчим документом визначає спеціальні місця для куріння, які необхідно позначити відповідним

знаком або написом, і місця, де встановлюють урну або попільницю з негорючих матеріалів.

Куріння за межами спеціально відведених місць забороняється.

4.5 Заходи з забезпечення безпеки у надзвичайних ситуаціях

Дії керівника промислового об'єкта при виникненні надзвичайної ситуації.

Керівники об'єктів повинні передбачити управління надзвичайними ситуаціями. Для завдання забезпечення безпеки людини в НС стратегія управління повинна включати здійснення 3-х цілей:

- запобігання причин виникнення;
- запобігання самих екстремальних ситуацій;
- пом'якшення, максимальне ослаблення наслідків НС. Стратегія

запобігання причин виникнення НС передбачає недопущення таких дій чи процесів, які несуть загрозу населенню. Дана стратегія здійснюється або відмовою від будівництва небезпечних об'єктів, або знищенням чи перепрофілюванням виробництв — джерел підвищеної небезпеки.

Друга стратегія — запобігання самої НС — передбачає недопущення виходу небезпечного процесу з-під контролю шляхом використання надійних аварійних систем, сигналізації, автоматики й інших заходів з підвищення надійності і стійкості роботи підприємств, а також шляхом заходів превентивної евакуації тощо.

Третя стратегія — пом'якшення наслідків — передбачає орієнтацію на ослаблення, локалізацію наслідків НС. Ця стратегія має пріоритет у керуванні стихійними лихами і ситуаціями «комбінованого» типу.

У практиці управління найбільший ефект дає спільне використання всіх трьох стратегій, особливо при промислових аваріях. У НС, викликаних стихійними лихами, пріоритет надається другій і третій стратегіям. Для

реалізації кожної зі стратегій управління необхідно розробляти і приймати комплекс превентивних та оперативних заходів.

- аналіз і встановлення зовнішніх та внутрішніх причин, які ведуть до катастрофи;
- прогнозування осередків ураження, втрат і збитків на підприємстві;
- заходи з підвищення стійкості;
- обґрунтування сил і засобів для проведення дій з локалізації вогнищ поразки і пошуково-рятувальних робіт;
- навчання формувань і громадян способам захисту;
- підготовка надійного КП управління. Оперативні:
 - ◆ оповіщення про НС;
 - ◆ проведення всіх видів розвідки й оцінка обстановки;
 - ◆ проведення екстрених захисних заходів (укриття в ЗС, евакуація);
 - ◆ використання сил постійної готовності для локалізації катастрофи;
 - ◆ надання першої медичної і першої долікарняної допомоги;
 - ◆ нарощування сил і засобів в ОП за рахунок залучення формувань підвищеної готовності;
 - ◆ термінове постачання потерпілих продовольством та іншими життєво необхідними засобами;
 - ◆ введення аварійно-відбудовних робіт.

При виникненні НС організовується надзвичайне управління, яке складається з чотирьох стадій ліквідації наслідків.

1. Стадія вжиття екстрених заходів. Мета — задіяти механізм надзвичайного управління і вчасно зреагувати на НС. Основні завдання початкової стадії: встановлення факту НС, попередня оцінка обстановки в зоні лиха і масштабів наслідків, мобілізація і встановлення оперативних завдань органам надзвичайного управління, віддача розпоряджень на залучення мобільних сил пожежної охорони, швидкої медичної допомоги, охорони

суспільного порядку й інших служб для допомоги потерпілим, сприяння місцевим органам влади в організації рятувальних робіт і локалізації зони нещастя власними силами; інформування населення та вищестоящих органів управління про НС і вжиті заходи. Тривалість початкової стадії — 1–10 годин.

2. Стадія оволодіння ситуацією й організації механізму надзвичайного управління в зоні лиха, у плануванні і проведенні рятувальної операції відповідного масштабу. Завдання: детально оцінити обстановку, терміново прийняти обґрунтоване рішення й уточнити план ліквідації наслідків НС; розрахувати необхідні сили і засоби, ресурси для всього комплексу робіт у зоні лиха, організувати чітку взаємодію всіх залучених сил і аварійних служб. Тривалість 2-ї стадії — від кількох годин до кількох діб.

3. Основна і визначальна стадія. Мета — перебороти надзвичайний характер ситуації: відновити безпеку населення в зоні лиха, ліквідувати загрозу життю і здоров'ю всім потерпілим, створити мінімально необхідні умови для життєдіяльності населення, що залишилося. Завдання: розгортання в найкоротший термін рятувальних робіт на всіх потерпілих об'єктах зони лиха, надання допомоги потерпілим для захисту їхнього життя, здоров'я і підтримка життєздатності в екстремальних умовах; евакуація потерпілих із зони нещастя та їх життєзабезпечення; термінове проведення аварійно-відбудовних робіт на системах водо-, тепло-, газо-, електросистемах і зв'язку в зоні лиха. Тривалість кілька діб — кілька тижнів.

4. Стадія відновлення, тобто економічна, соціальна, культурна й екологічна реабілітація зони лиха. Органи надзвичайного управління вичерпали свою роль і передають функції постійної дії місцевим органам управління. Розробляється спеціальна програма з черговістю комплексу заходів для реабілітації зони нещастя.

Основними відповідальними особами щодо забезпечення захисту робітників та службовців при аваріях зі СДОР є: головний інженер, черговий диспетчер, начальник штабу ЦОНС, начальники підрозділів (цехів), начальник газорятувальної служби.

- одержавши інформацію про аварію, прибуває на об'єкт і здійснює загальне керівництво ліквідацією наслідків і порятунок людей;
- інформує адміністрацію району (міста) про характер аварії, рятувальні та інші невідкладні роботи (РІНР);
- створює команду фахівців, яка бере участь разом з газорятувальною службою (ГРС) у ліквідації наслідків аварії.
- безпосередньо керує роботами по ліквідації наслідків аварії;
- ознайомившись з обстановкою, приступає до виконання заходів по плану ЦО мирного часу;
- ◆ керує діями пункту управління;
- ◆ перевіряє особовий склад ГРС, медслужби і контролює повноту оповіщення всіх посадових осіб;
- ◆ віддає розпорядження щодо локалізації аварії;
- ◆ дає вказівки на евакуацію РіС, з організації оточення району аварії і з інформації;
- ◆ періодично доповідає НЦО про обстановку в районі аварії.

Начальник штабу ЦОНС об'єкта:

- ◆ розробляє план захисту РіС від СДОР (разом з начальниками служб);
- ◆ підтримує постійну готовність сил і засобів ЦО до ліквідації наслідків аварії, організовує навчання;
- ◆ при виникненні аварії розгортає КП, віддає розпорядження на проведення заходів щодо захисту РіС; готує сили і засоби до ведення РІНР;
- ◆ ставить завдання на розвідку ОХЗ;
- ◆ оцінює обстановку і доповідає НЦО, готує пропозиції з проведення РІНР;
- ◆ здійснює контроль за своєчасним наданням медичної допомоги ураженим, їх евакуацією і виведенням з вогнища зараження.

◆ до прибуття безпосереднього керівника робіт з ліквідації наслідків аварії займається порятунком людей, локалізацією аварії (разом з начальником чергової зміни ГРС);

◆ прогнозує небезпечну зону поширення СДОР і подає сигнали;

◆ оповіщає особовий склад ГРС, протипожежної і медичної служб, командний склад, місцеві органи, РіС і дає рекомендації начальникам підрозділів (цехів) про напрямок виведення людей з небезпечної зони (з обов'язковим підтвердженням одержання інформації);

◆ інформує чергового штабу ЦОНС району і диспетчерів сусідніх підприємств про аварію;

◆ з прибуттям командирів НЧ ставить завдання на розвідку вогнища зараження;

◆ організовує своєчасне надання медичної допомоги. Керівництво роботами веде з КП. З прибуттям головного інженера і його заступників інформує їх про обстановку та виконує свої обов'язки.

Комплект документів, необхідних для роботи чергового диспетчера:

◆ посадові обов'язки;

◆ план з можливою обстановкою на ОГ, у випадку аварії; •

схема оповіщення КНС, РіС і населення при аварії;

• схема оцінки хімічної обстановки (стенд);

• картка-паспорт на об'єкт зі СДОР;

• варіанти текстів оповіщення.

Начальник підрозділу (цеху), у якому відбулася аварія:

◆ оповіщає РіС, чергового диспетчера;

◆ викликає ГРС;

◆ дає вказівки щодо припинення робіт і на аварійну зупинку цеху, заборони допуску людей у вогнище зараження, порятунку людей і локалізації аварії;

◆ контролює вихід людей з небезпечної зони в безпечному напрямку.

Управління підприємством і дії керівників при аваріях на радіаційно небезпечних об'єктах

При виникненні аварії на АЕС керівники об'єкта оповіщаються штабом ЦОНС району дислокації і районним відділенням міліції. Оповіщення керівників об'єктів (за списком) здійснюють диспетчер заводу (робочий час), а також черговий воєнізованої пожежної команди і начальник ВОХР. Здійснюється оповіщення робітників та службовців об'єкта і населення прилягаючих до об'єкта будинків по радіо, телебаченню, гучномовцях, а також з ПМГ.

Штаб ЦОНС об'єкта здійснює прогнозування радіаційної обстановки.

Розгортається діяльність комісії з надзвичайних ситуацій (КНС).

Виконуються заходи щодо захисту.

ВИСНОВКИ

На основі проведених досліджень дисипативних властивостей і характеристик поверхневого шару наноструктурованих покриттів з міді і срібла робочих лопаток ГТД, можна зробити наступні висновки:

- робочі лопатки компресора з титанового сплаву після УЗЗ з покриттям з міді та срібла мають більшу демпфуючу здатність, ніж вихідні лопатки без покриття; причому конденсати з наноструктурованої міді приводять до більшої дисипації енергії;

- результати вимірювання шорсткості поверхні лопаток, покритих наноструктурованою міддю, показали, що покриття не погіршує якість поверхні і не приводить до збільшення параметрів шорсткості;

- вимірювання мікротвердості в перерізі пера лопатки показали, що покриття пера наноструктурованою міддю не приводить до зміни твердості підшарової області і серцевини;

- випробування на міцність від втоми показали, що покриття пера лопаток з наноструктурованої міді і срібла, не приводить до зниження витривалості лопаток;

- рентгеноструктурні дослідження показали, що наноструктуровані покриття міді та срібла текстуровані й мають орієнтаційне розташування щільноупакованих площин (111) і, частково, площин (100), паралельно поверхні лопатки, що має забезпечувати хороше зчеплення покриття з поверхнею лопатки;

- результати модального аналізу в ANSYS показали, що покриття пера лопаток з наноструктурованої міді не змінює частоту власних коливань лопатки.

Таким чином, встановлено, що покриття пера лопаток наноструктурованою міддю приводить до значного підвищення демпфуючої здатності лопаток і забезпечує сприятливі характеристики поверхневого шару,

що дозволяє розглядати його в якості можливої складової композитних захисних покриттів лопаток ГТД.

Розглянули основні положення для забезпечення безпеки під час виконання даних досліджень та потенційні небезпеки при роботі з обладнанням, розрахували необхідний розмір та кількість вікон для природного освітлення лабораторії.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ

1. Матвеев В.В. Демпфирование колебаний деформируемых тел. / В.В. Матвеев - Киев: Наук. думка, 1985. - 263 с.
2. Фавстов Ю. К. Металловедение высокодемпфирующих сплавов. / Ю.К. Фавстов, Ю.Н. Шульга, А.Г. Рахштадт - М.: Металлургия, 1980. - 272 с.
3. Устинов А.И. Диссипативные свойства наноструктурированных материалов / А.И. Устинов // Пробл. прочности. – 2008. - №5. – С.97-103.
4. Богуслаев В. А. Наноматериалы и нанотехнологии / В. А. Богуслаев, А. Я. Качан, Н. Е. Калинина, В.Ф. Мозговой, В.Т. Калинин // г. Запорожье, АО «Мотор Сич», - 2014. – 208 с.
5. Борисенко Є.В. Нанoeлектроника: Учеб. Пособие для студентов. В 3 ч. Ч. 2. Нанотехнология / Є. В. Борисенко, А. І. Воробйова // Минск: БГУИР. - 2003. - 76 с.
6. Борисенко Є.В. Нанoeлектроника: Учеб. Пособие для студентов. В 3 ч. Ч. 1. Основы нанoeлектроники. Минск: БГУИР. - 2003. - 76 с.
7. Андрієвський Р. А. Наноструктурные материалы: учеб.пособие для студ. / Р. А. Андрієвський, А. В. Рагуля // М.: Вид. центр «Академія». - 2005. - 192 с.
8. Матвеев В.В. Демпфирование колебаний деформируемых тел. Киев: Наукова думка, 1985. 264 с.
9. Адаменко А.Я. Демпфирующая способность парных рабочих лопаток газотурбинных двигателей в условиях воздействия центробежных сил и температуры: дис. канд. техн. наук. Киев, 1984. 238 с.
10. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Вибропоглощающие свойства конструкционных материалов: справ. Киев: Наукова думка, 1971. 376с.
11. Писаренко Г.С., Каминер А.А. Аэродинамическое демпфирование колебаний лопаток турбомашин. Киев: Наукова думка, 1991. 302 с.

12. Репецкий О.В. Компьютерный анализ динамики и прочности турбомашин. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 1999. 301 с.
13. Матвеев В.В., Яковлев А.П., Балюк А.Д., Ржавин Л.Н. Исследование демпфирующих свойств замкового соединения компрессорных лопаток при повышенной температуре // Термопрочность материалов и конструктивных элементов. Киев: Наукова думка, 1967. Вып. 4. С. 396–401.
14. Sordellet D.J., Kim J.S., Besser M.F. Dryslidin go fpoly-grained quasicrystalline and crystalline Al–Cu–Fe alloys //Mat. Res. Soc. Symp. Рос. 1999. V. 553. P. 459–470.
15. 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.
16. Мубояджян С.А., Помелов Я.А. Защитные покрытия для лопаток компрессора ГТД /В сб.: Авиационные материалы и технологии. Вып. «Высокожаропрочные материалы для современных и перспективных газотурбинных двигателей и прогрессивные технологии их производства». М.: ВИАМ. 2003. С. 116–131.
17. Способ получения литого трубного катода из сплавов на основе алюминия для ионно-плазменного нанесения покрытий: пат. 2340426 Рос. Федерация; опубл. 16.04.2007.
18. Способ получения литых трубных изделий из сплавов на основе никеля и/или кобальта: пат. 2344019 Рос. Федерация; опубл. 16.04.2007.
19. Кашапов О.С., Павлова Т.В., Ночовная Н.А. Влияние режимов термической обработки на структуру и свойства жаропрочного титанового сплава для лопаток КВД //Авиационные материалы и технологии. 2010. №2. С. 8–14.
20. Сибилева С.В., Каримова С.А. Обработка поверхности титановых сплавов для обеспечения адгезионных свойств (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2013. №S2. С. 25–35.

21. Мубояджян С.А., Александров Д.А., Горлов Д.С., Егорова Л.П., Булавинцева Е.Е. Защитные и упрочняющие ионно-плазменные покрытия для лопаток и других ответственных деталей компрессора ГТД //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 71–81.
22. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий //Авиационные материалы и технологии. 2013. №S2. С. 3–10.
23. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Ионное травление и модифицирование поверхности ответственных деталей машин в вакуумно-дуговой плазме // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. №SP2. С. 149–163.
24. Сплав на основе титана: пат. 2426808 Рос. Федерация; опубл. 20.08.2011.
25. Бецофен С.Я., Смирнов В.Г., Ашмарин А.А., Шафоростов А.А. Количественные методы описания текстуры и анизотропии свойств сплавов на основе титана и магния // Титан. 2010. №2. С. 16–22.
26. Мубояджян С. А., Горлов Д. С., Щепилов А.В., Коннова В.И. Исследование демпфирующей способности ионно-плазменных покрытий // Авиационные материалы и технологии. 2014. №S5. С. 67 - 72.
27. Устинов А.И., Мовчан Б.А., Скородзиевский В.С. Исследование демпфирующей способности плоских образцов из титанового сплава Ti–6%Al–4%V с покрытиями из олова и иттрия // Проблемы прочности. 2001. №4. С. 55–61.
28. Токарь И.Г., Зиньковский А.П., Матвеев В.В. К вопросу о возможностях повышения демпфирующей способности рабочих лопаток современных газотурбинных двигателей // Проблемы прочности. 2003. №4. С. 58–68.
29. Горлов Д. С., Щепилов А.В., Заклякова О. В., Гаджихалилова С. И. Влияние типа покрытия на демпфирующую способность // Труды ВИАМ. 2018. №68. С.120 - 129.

30. Горлов Д.С., Щепилов А.В. Исследование демпфирующей способности композиции «сплав–покрытие» после испытаний на жаростойкость и коррозионную стойкость // Авиационные материалы и технологии. 2017. №4 (49). С. 62–69. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-62-69.

31. Андриевский Р. А. Размерные эффекты в кристаллических материалах. Механические и физические свойства/ Р. А. Андриевский, А. М. Глезер // Физика металлов и металловедение. – 200. - 89, №1. – с.91 - 112.

32. Мовчан Б. А. Исследование структуры и свойств толстых вакуумных конденсатов никеля, титана, вольфрама, окиси алюминия и двуокиси циркония / Б. А. Мовчан, А. В. Демчишин // Физика металлов и металловедение. - 1969. - 28, № 4. - С.653-660.

33. Устинов А.И. Изучение диссипативных свойств однородных материалов, осажденных в виде покрытий. Сообщение 1. Метод определения амплитудной зависимости истинного декремента колебания материала покрытия / А.И. Устинов, В.С. Скордзиевский, Н.С. Косенко // Пробл. прочности. - 2007. - № 6. - С. 134-143.

34. Устинов А.И. Изучение диссипативных свойств однородных материалов, осажденных в виде покрытий. Сообщение 2. Конденсаты меди с различными характеристиками микроструктуры/ А.И. Устинов, В.С. Скордзиевский, Н.С. Косенко // Пробл. прочности. - 2008. - № 2. - С. 149-159.

35. Устинов А. И. Демпфирующая способность покрытий Co-Ni и Co-Fe, полученных методом электронно-лучевого осаждения / А.И. Устинов, Б.А. Мовчан, Ф. Лемке, В.С. Скордзиевский // Вибрации в технике и технологиях. - 2001. - № 4. - С. 123 - 126.

36. Устинов А.И. О возможностях наноструктурированных покрытий для снижения динамической напряженности конструктивных элементов машин / А.И. Устинов, А.П. Зиньковский, И.Г. Токарь, В.С. Скордзиевский // - Автоматическая сварка. — 2010. — № 1. — С. 15-21.

37. Зиньковский А.П. Демпфирующая способность конструктивных элементов с наноструктурными покрытиями / А.П. Зиньковский, И.Г. Токарь// Вестник двигателестроения. – 2009. - №2. – С.37-41.

38. Устинов А. И. Влияние температуры подложки на микро- и субструктуру вакуумных конденсатов меди / А. И. Устинов, Е. В. Фесюн, Т. В. Мельниченко, С. М. Романенко // Сов. электрометаллургия. - 2007. - № 4. - С. 19 - 26.

39. ОСТ 100870-77 Лопатки газотурбинного двигателя (ГТД). Методы испытания на усталость. – М.: Изд-востандартов, 1977. – 34 с.

40. ГОСТ 9450-76 (СТ СЭВ 1195-78) Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. – М.: Изд-востандартов, 1993. – 33 с.

41. ГОСТ 25.502-79 Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость. – М.: Изд-востандартов, 1986. – 25 с.

42. Методичні вказівки до виконання розділу «Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях» в магістерських дипломних роботах зі спеціальності 131 «Прикладна механіка»(спеціалізація «Технологія машинобудування»); 133 «Галузеве машинобудування» (спеціалізація «Металорізальні верстати та системи); 134 «Авіаційна та ракетно-космічна техніка» (спеціалізація «Авіаційні двигуни та енергетичні установки»,«Технології виробництва авіаційних двигунів та енергетичних установок») / Укл. : В.І. Шмирко – Запоріжжя: ЗНТУ, 2018 –28 стор.

43. Методичні вказівки до практичної роботи «Дослідження природної освітленості виробничих приміщень» з дисципліни «Основи охорони праці» для студентів всіх форм навчання /Укл. О.В. Коробко, Ю.В. Якімцов, Ю.І.Троян. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2016. – 14 с.

44. Шоботов В. М. Цивільна оборона: Навчальний посібник. - Київ. Центр навчальної літератури. - 2006. - 438 с.

45. Пухальська Г.В., Щербина М.А. Особенности рассеивания механической энергии наноструктурированными материалами // Збірник тез

доповідей щорічної науково-практичної конференції серед студентів, викладачів, науковців, молодих учених і аспірантів. 16–20 квітня 2018 року. – с. 194-195.

46. Пухальська Г.В., Підгорський К.Н., Гликсон І.Л., Степанова Л.П., Щербина М.А. Исследование диссипативных свойств и характеристик поверхностного слоя наноструктурированных покрытий пера лопаток // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. - №1. - 2018 рік. - с. 6-15.