

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет митної справи матеріалів, матеріалів та технологій

(повне найменування факультету)

Кафедра матеріалознавства

(повна найменування кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «БАКАЛАВР»

**Відновлення зносостійких поверхонь лопаток
авіаційного двигуна шляхом нанесення захисних
покриттів / Renewal of wear-resistant surfaces of aircraft
engine blades by applying coating protection спеціальність**

132 Матеріалознавство

(шифр і назва спеціальності)

освітня програма Матеріалознавство

(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ПМ-41
Тарасюк Анна Миколаївна

(підпис)

Керівник:
к.т.н., доцент
Зайчук Наталія Петрівна

(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
«__» _____ 2025 р.

к.т.н., доцент

Гарант освітньої програми:

к.т.н., професор

Кашицький Віталій Павлович

(підпис)

Луцьк – 2025 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет митної справи, матеріалів та технологій

Кафедра матеріалознавства

Ступінь вищої освіти: бакалавр

Галузь знань: 13 Механічна інженерія

Спеціальність: 132 Матеріалознавство

Освітня програма: Матеріалознавство

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Мельничук М.Д.

“ 11 ” лютого 2025 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Тарасюк Анкі Миколаївні

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Відновлення зносостійких поверхонь
лопаток авіаційного двигуна шляхом нанесення
двухшарного покриття

керівник роботи к.т.н, доцент Зайчук Наталія Тетрівна

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від “04” лютого 2025 року № 461-02

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи
« 5 » червня 2025р.

3. Вихідні дані до роботи хімічний склад та властивості ВТ45-1;
Внр-16 та решітку; умови роботи лопаток ГТД;
методичні рекомендації: типовий технологічний процес нанесення твердого покриття

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно

розробити) 1. Теоретично обґрунтування з технічного мовлення,
з характеристика досліджуваного матеріалу, у. Фізико-хімічні
властивості, 5 Аналіз результатів роботи; 6. висновки
і практичні рекомендації

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

12 слайдів, формат А4
слайд 1- мета роботи; слайд 2- хімічний склад сплаву, слайд 3-
хімічний склад матеріалів напайки града 5-6 - фторопластичні
розширення, слайд 6-8 - мікроструктури розширення,
слайд 9-10 - порівняння фізико-механічних властивостей,
слайд 11- висновки

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Н. контроль	Месісєва С.В. к.т.н	11.06.25 	12.06.25

7. Дата видачі завдання «М» лютого 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1	Технічне оформлення	6.05.2025	виконано
2	Технологічна карта	6.05.2025	виконано
3	Характеристика досліджуваних зразків	20.05.2025	виконано
4	Фізико-хімічні властивості досліджуваних зразків	20.05.2025	виконано
5	Аналіз результатів дослідження	3.06.2025	виконано
6	Графічна частина	3.06.2025	виконано

Здобувач вищої освіти

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

(підпис)

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Тарасюк А.М. Назва теми: «Відновлення зносостійких поверхонь лопаток авіаційного двигуна шляхом нанесення захисних покриттів»

Кваліфікаційна робота бакалавра ОП «Матеріалознавство» спеціальності 132 Матеріалознавство. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2025.

Кваліфікаційна робота бакалавра складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку літератури, додатків.

У дипломній роботі запропоновано технологічний процес відновлення лопаток авіаційних двигунів методом нанесення твердосплавних покриттів. Проведено дослідження структури покриття та встановлено зміни хімічного складу.

Основні рішення, прийняті в дипломній роботі скеровані на забезпечення працездатності лопаток з титанових сплавів, які можна ремонтувати також вивчення структури напаяного шару, його хімічного складу, планування методу нанесення покриття.

Загальний обсяг роботи: 54 сторінок, 5 розділів та висновки, 15 рисунків, 7 таблиць, 31 літературних джерел.

Ключові слова: лопатки газотурбінного двигуна, титановий сплав, зносостійкість, захисні покриття, реліт, технологічний процес.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР 0325.00.00.000 ПЗ			
Розробив		Тарасюк			Відновлення зносостійких поверхонь лопаток авіаційного двигуна шляхом нанесення захисних покриттів / Renewal of wear-resistant surfaces of aircraft engine blades by applying coating protection	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевірив		Зайчук					3	54
Н. Контр		Мисковець			ЛНТУ, каф. матеріалознавства, гр. ПМ-41			
Затв.		Мельничук						

ABSTRACTS

Tarasuk A.M. Title: “ Renewal of wear-resistant surfaces of aircraft engine blades by applying coating protection”

Bachelor's thesis in Materials Science, specialty 132 Materials Science. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2025.

The bachelor's thesis consists of an introduction, four chapters, conclusions, a list of references, and appendices.

The thesis proposes a technological process for restoring aircraft engine blades by applying hard alloy coatings. The structure of the coating was studied and changes in its chemical composition were established.

The main decisions made in the thesis are aimed at ensuring the operability of titanium alloy blades that can be repaired, as well as studying the structure of the brazed layer, its chemical composition, and planning the coating application method.

Total volume of work: 54 pages, 5 chapters and conclusions, 15 figures, 7 tables, 31 references.

Keywords: gas turbine engine blades, titanium alloy, wear resistance, protective coatings, relit, technological process.

					БП 0325.00.00.000 ПЗ	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 ТЕХНІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ	8
1.1. Особливості підбору матеріалів для лопаток авіаційних двигунів	8
1.2. Основні причини виходу з ладу лопаток авіаційних двигунів	9
1.3. Основні шляхи покращення властивостей авіаційних лопаток	16
1.3.1. Використання захисних покриттів	11
1.3.2. Поверхнева обробка	12
1.4. Можливості ремонту шляхом нанесення покриттів	13
1.5. Відновлення титанових лопаток напайкою зносоустійкого матеріалу	15
1.6. Висновки та постановка задачі досліджень	18
РОЗДІЛ 2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	20
2.1. Опис об'єкту досліджень	20
2.2. Дослідження структури та властивостей матеріалу поверхневих шарів	24
2.3. Метод безперервного втиснення індентора та склерометрія	26
2.4. Методи вимірювання твердості на «Мікрон-гамма»	28
РОЗДІЛ 3 ХАРАКТЕРИСТИКА ДОСЛІДЖУВАНИХ ЗРАЗКІВ	31
3.1. Результати фрактографічного аналізу	31
3.1.1. Аналіз зразка без покриття	31
3.1.2. Аналіз зразка з дефектною напайкою	32
3.1.3. Аналіз зразка з якісною напайкою	33
3.2. Результати металографічних досліджень	34
РОЗДІЛ 4 ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ДОСЛІДЖУВАНИХ ЗРАЗКІВ	40
4.1. Аналіз результатів фрактографічного аналізу	74

					БР 0325.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

РОЗДІЛ 5 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	45
5.1. Аналіз мікроструктури	45
5.2. Аналіз результатів, отриманих на «Мікрон-гамма»	48
ВИСНОВКИ	50
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	52
ДОДАТОК	

					БР 0325.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

ВСТУП

Під час польоту літак зазнає різноманітних навантажень – від статичних до динамічних і вібраційних. Найбільш навантаженими є двигуни, зокрема газові турбіни газотурбінних двигунів (ГТД), які працюють в особливо складних умовах.

У сучасних двигунах часто використовують лопатки з бандажними полицями, які допомагають зменшити рівень напружень, що виникають через вібрації. Завдяки цьому збільшується загальний термін служби та надійність двигуна. Лопатки мають складну форму, включаючи як зовнішній профіль, так і внутрішню порожнину, й піддаються значним навантаженням:

- статичним (наприклад, від тиску газів),
- динамічним (через дію відцентрових сил),
- змінним навантаженням, що поєднують вібрацію з іншими впливами,
- а також різким температурним змінам під час запуску та зупинки двигуна.

Окрім механічних навантажень, деталі ГТД експлуатуються в умовах високих температур і агресивного середовища. Продукти згоряння пального та мастил містять активні елементи, як-от водень, сірка, хлор і натрій. Вони можуть викликати:

- зниження міцності матеріалу при довготривалому нагріванні до ~ 1000 К,
- газову корозію поверхні,
- структурні пошкодження через водневе насичення та інші механізми,
- появу мікротріщин, що веде до втомного руйнування.

Щоб забезпечити необхідну довговічність, лопатки виготовляють зі спеціальних жароміцних сплавів, які витримують високі температури й складні умови експлуатації. Під час вибору матеріалів враховують

						Арк.
						7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР 0325.00.00.000 ПЗ	

температурний режим роботи, рівень напружень, зокрема на поверхні, а також інші чинники, які впливають на термін служби деталі.

У зоні контакту бандажних полиць часто виникає підвищений знос і втомні тріщини через тертя та вібрації. При підвищенні температури і збільшенні ресурсу двигуна ці пошкодження стають інтенсивнішими, що знижує ефективність роботи турбіни та скорочує термін служби її деталей.

Тому для надійної та довготривалої роботи таких компонентів важливо розробляти методи, що підвищують жаростійкість і зносостійкість поверхневих шарів.

					БР 0325.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

РОЗДІЛ 1

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

1.1. Особливості підбору матеріалів для лопаток авіаційних двигунів

Лопатки авіаційних двигунів є критичними елементами турбомашин, які працюють у надзвичайно складних умовах – при високих температурах, значних механічних навантаженнях, агресивному газовому середовищі та циклічних термічних навантаженнях. Матеріали, з яких виготовляють лопатки, повинні забезпечувати поєднання високої жароміцності, корозійної стійкості, зносостійкості та тривалої втомної міцності.

У сучасних газотурбінних двигунах найчастіше використовують жароміцні нікелеві сплави (так звані суперсплави), серед яких найбільш поширеними є Inconel718, René 80, CMSX-4, MAR-M247. Вони використовуються завдяки високій жароміцності, стійкості до повзучості та окислення. Ці сплави мають складну багатофазну структуру з γ -матрицею на основі нікелю, зміцненою дисперсними включеннями γ' -фази ($\text{Ni}_3(\text{Al},\text{Ti})$) та карбідами. Їх жароміцність забезпечується за рахунок повільної дифузії, стабільної структури при високих температурах і високої стійкості до повзучості [1]. Широко застосовуються в гарячих зонах турбін літаків.

Для холодніших частин компресора використовують титанові сплави, зокрема Ti-6Al-4V. Вони мають добру питому міцність, корозійну стійкість і меншу щільність порівняно з нікелевими сплавами. Зокрема Ti-6Al-4V, використовуються в компресорних секціях завдяки високій питомій міцності, корозійній стійкості та низькій щільності. Однак температура їх ефективного використання обмежена приблизно 600 °C [2].

У перспективних конструкціях застосовують також композитні матеріали – зокрема керамо-металеві або волокнисті армовані композити на

					БР 0325.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

основі карбіду кремнію (SiC/SiC). Такі матеріали демонструють високу термостійкість і низьку масу, однак мають високу вартість і складність у виготовленні [3]. Керамічні композити на основі SiC/SiC застосовуються в перспективних конструкціях завдяки високій термостійкості та низькій масі.

Матеріал лопаток вибирають з урахуванням робочої температури, рівня навантаження, хімічної активності газового потоку та вимог до ресурсу. Крім основного матеріалу, все частіше застосовують захисні покриття, що підвищують термічну, окисну і зносостійкість поверхні без зміни масивної основи.

1.2. Основні причини виходу з ладу лопаток авіаційних двигунів

Незважаючи на високу надійність сучасних матеріалів і технологій виготовлення, лопатки авіаційних двигунів зазнають поступового руйнування внаслідок поєднання кількох чинників. Основними механізмами пошкодження є: високотемпературне окислення, корозія, втома та повзучість, знос різного роду та руйнування, причиною якого можуть бути дефекти та робоче середовище.

Високотемпературне окислення та корозія виникають при роботі в зоні згорання лопатки піддаються впливу гарячих газів із температурою понад 1000 °С. Навіть найкращі нікелеві сплави поступово окислюються, що призводить до утворення оксидних плівок, втрати елементів легування та зниження механічної міцності. Особливо небезпечна так звана корозія гарячих солей (hot salt corrosion) при наявності домішок сірки, хлору або натрію у повітрі [4]. Високотемпературне окислення та корозія призводять до утворення оксидних плівок, втрати елементів легування та зниження механічної міцності.

Повзучість та термопружна втома виникають внаслідок тривалої дії високих температур і навантажень, що спричиняє поступову пластичну

					БР 0325.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

деформацію матеріалу. Тривала дія високих температур і навантажень спричиняє поступову пластичну деформацію матеріалу (повзучість). Крім того, часті пуски та зупинки двигуна спричиняють циклічне теплове розширення і стискання, що зумовлює термопружну втому [5]. У зонах концентраторів напружень це призводить до накопичення мікротріщин і зрештою до руйнування.

Абразивний і ерозійний знос спричиняються частинками пилу, піску або кристалічних включень, що потрапляють у повітряний потік, викликаючи ерозію поверхонь лопаток [6]. Частинки пилу, піску або кристалічних включень, що потрапляють у повітряний потік, викликають ерозію поверхонь лопаток, особливо на передній крайці. Це зменшує аеродинамічну ефективність і спричиняє зростання навантаження на інші елементи двигуна.

Фретинг і вібраційне руйнування найчастіше можна виявити у місцях контакту між лопатками і диском або між суміжними лопатками. Вони зазнають мікроскопічних коливань при роботі двигуна. Це спричиняє фретинг – локальний знос і ініціацію тріщин у приповерхневій зоні [7].

Технологічні дефекти та недосконалості покриттів можуть значно зменшити ресурс лопатки, особливо при складних термомеханічних режимах. Недостатня якість лиття, дефекти структури або тріщини в покриттях можуть значно зменшити ресурс лопатки, особливо при складних термомеханічних режимах [8].

Комплексний вплив наведених факторів обумовлює необхідність не лише розробки нових матеріалів, але й удосконалення методів поверхневої інженерії, зокрема нанесення зносо- і теплозахисних покриттів, які можуть відновити та подовжити ресурс лопаток авіаційних двигунів.

					БР 0325.00.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.3. Основні шляхи покращення властивостей авіаційних лопаток

Покращення експлуатаційних характеристик лопаток авіаційних двигунів є ключовим напрямом у підвищенні ефективності та надійності авіаційної техніки. Основні шляхи вдосконалення включають різного роду покриття, що підвищують теплостійкість, зносостійкість захист від корозії та ерозії. Окрім того сучасні методи поверхневої обробки також можуть сприяти удосконаленню властивостей поверхні завдяки покращенню структури сплавів шляхом мікропластичної деформації поверхневих шарів, тощо.

1.3.1. Використання захисних покриттів

Застосування захисних покриттів дозволяє значно підвищити термостійкість, зносостійкість та корозійну стійкість лопаток. Серед основних типів покриттів можна виокремити теплозахисні покриття, антикорозійні покриття, ерозійно-стійкі, та інші.

Теплозахисні покриття забезпечують термічну ізоляцію, зменшуючи теплове навантаження на основу лопатки. Зазвичай складаються з керамічних матеріалів, наприклад, стабілізований ітрієм оксид цирконію.

Антикорозійні покриття захищають від окислення та корозії при високих температурах. Прикладом може бути покриття типу MeCrAlY, де Me – нікель, кобальт або їх сплави.

Ерозійно-стійкі покриття призначені для підвищення стійкості до механічного зносу, викликаного частинками пилу чи піску в повітряному потоці.

Використання сучасних матеріалів, таких як монокристалічні суперсплави на основі нікелю, дозволяє підвищити жароміцність та зменшити схильність до утворення тріщин. Крім того, вдосконалення конструкції лопаток, зокрема застосування внутрішніх каналів для охолодження, сприяє зниженню температурного навантаження.

						Арк.
						12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР 0325.00.00.000 ПЗ	

1.3.2. Поверхнева обробка

Методи поверхневої обробки, такі як дробоструминна обробка (shot peening), дозволяють індукувати залишкові стискаючі напруження, що підвищує втомну міцність та зменшує ймовірність утворення тріщин.

У сучасній авіаційній промисловості відновлення зносостійких поверхонь лопаток авіаційних двигунів є критично важливим завданням для забезпечення їхньої довговічності та надійності. Останні дослідження зосереджені на вдосконаленні методів ремонту та застосуванні захисних покриттів, що дозволяє ефективно відновлювати пошкоджені компоненти та підвищувати їхні експлуатаційні характеристики.

Одним із перспективних підходів є використання гібридних технологій, які поєднують термічне напилення з подальшим спіканням та алюмініуванням. Зокрема, застосування нікель-хром-силіцієвих сплавів (NiCrSi) як наповнювачів у поєднанні з покриттями типу NiCoCrAlY дозволяє досягти високої адгезії та зносостійкості. Цей метод забезпечує ефективне відновлення тріщин та пошкоджень у лопатках з монокристалічних суперсплавів, таких як Inconel 718, зменшуючи час обробки до менш ніж 30 хвилин порівняно з традиційними методами, які можуть тривати до 36 годин [9, 10].

Іншим інноваційним методом є застосування лазерного наплавлення для локального ремонту термобар'єрних покриттів. Цей підхід дозволяє відновлювати пошкоджені ділянки без необхідності повного видалення існуючого покриття, що знижує ризик блокування охолоджувальних каналів та зменшує витрати часу та ресурсів [11].

Крім того, впровадження адитивного виробництва (3D-друку) у процеси ремонту лопаток відкриває нові можливості для відновлення складних геометричних форм та структур. Це дозволяє точно відновлювати пошкоджені ділянки, зменшуючи матеріальні витрати та час ремонту, а також

					БР 0325.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

забезпечує високу точність та відповідність відновлених компонентів до оригінальних специфікацій [12].

У сфері покриттів, новітні дослідження зосереджені на розробці багатошарових термобар'єрних систем, які поєднують шари стабілізованого ітрієм оксиду цирконію та гадолінієвого цирконату. Такі системи демонструють підвищену стійкість до високотемпературного впливу та агресивних середовищ, що дозволяє збільшити термін служби лопаток.

Загалом, сучасні методи ремонту та використання покриттів у лопатках авіаційних двигунів спрямовані на підвищення ефективності, зниження витрат та забезпечення високої надійності компонентів. Інтеграція новітніх технологій, таких як гібридні процеси, лазерне наплавлення та адитивне виробництво, відкриває нові горизонти у сфері відновлення та захисту критичних елементів авіаційних двигунів.

1.4. Можливості ремонту шляхом нанесення покриттів

У сучасній авіаційній промисловості відновлення зносостійких поверхонь лопаток авіаційних двигунів є критично важливим завданням для забезпечення їхньої довговічності та надійності. Останні дослідження зосереджені на вдосконаленні методів ремонту та застосуванні захисних покриттів, що дозволяє ефективно відновлювати пошкоджені компоненти та підвищувати їхні експлуатаційні характеристики.

Ремонт лопаток авіаційних двигунів за допомогою нанесення захисних покриттів є ефективним методом відновлення їх експлуатаційних характеристик [1, 13]. Основні технології включають:

- Термічне напилення.
- Холодне газодинамічне напилення.
- Детонаційне напилення.
- Електростатичне напилення.

						Арк.
						14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР 0325.00.00.000 ПЗ	

Методи термічного напилення, такі як плазмове напилення та високошвидкісне киснево-паливне напилення (HVOF), дозволяють наносити покриття з високою адгезією та низькою пористістю. Це забезпечує ефективний захист від зносу та корозії [14].

Cold Spray – цей метод дозволяє наносити покриття без нагрівання основного матеріалу, що мінімізує термічні деформації та зберігає механічні властивості лопатки. Холодне напилення ефективно для відновлення геометрії та властивостей зношених ділянок [15].

Детонаційне напилення забезпечує нанесення щільних та зносостійких покриттів з високою адгезією. Цей метод ефективний для відновлення поверхонь, що зазнають високих механічних навантажень [16].

Електростатичне напилення дозволяє рівномірно наносити покриття на складні геометричні поверхні, забезпечуючи високий рівень контролю товщини та якості покриття.

Одним із перспективних підходів є використання гібридних технологій, які поєднують термічне напилення з подальшим спіканням та алюмініванням. Зокрема, застосування нікель-хром-силіцієвих сплавів (NiCrSi) як наповнювачів у поєднанні з покриттями типу NiCoCrAlY дозволяє досягти високої адгезії та зносостійкості. Цей метод забезпечує ефективне відновлення тріщин та пошкоджень у лопатках з монокристалічних суперсплавів, таких як Inconel 718, зменшуючи час обробки до менш ніж 30 хвилин порівняно з традиційними методами, які можуть тривати до 36 годин [10, 17-19].

					БР 0325.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

1.5. Відновлення титанових лопаток напайкою зносостійкого матеріалу

Компресорні лопатки газотурбінних двигунів, виготовлені з титанових сплавів, зазнають інтенсивного абразивного, ерозійного й ударного зносу в умовах дії високошвидкісного повітряного потоку з твердими включеннями. Титан, незважаючи на його високу корозійну стійкість і питому міцність, має обмежену твердість і зносостійкість. Ці недоліки особливо критичні у зоні вхідної кромки лопаток, яка є найбільш вразливою до пошкоджень. Одним із перспективних методів локального зміцнення є напайка зносостійкого матеріалу на поверхню лопатки. Такий підхід дозволяє значно збільшити термін служби вузлів без суттєвого впливу на масу чи аеродинамічний профіль деталі.

Напайка передбачає локальне нанесення тугоплавкого зносостійкого матеріалу на певну зону деталі. У випадку лопаток – це зазвичай вхідна кромка. Застосовують тверді сплави на основі кобальту (типу Stellite), нікелю (типу NiCrBSi) або комплексних систем, легованих хромом, молібденом, бором і вольфрамом. Матеріал напайки повинен бути сумісним із титановою основою, мати високу твердість, термостійкість, а також стійкість до окиснення та ерозії.

Процес напайки зазвичай проводять у вакуумі або інертному середовищі за допомогою лазерного, індукційного або електронно-променевого джерела тепла, що дозволяє зменшити зону термічного впливу та уникнути утворення крихких інтерметалідних фаз.

Титанові сплави мають низькі характеристики зношування, що призводить до необхідності вирішення питань збільшення ресурсу роботи деталей, які виготовляються з даних матеріалів, а також проблеми зміцнення і ремонту зношуваних поверхонь. Це в першу чергу відноситься до контактних поверхонь бандажних полиць лопаток компресора ГТД. Аналіз стану контактних поверхонь після певного напрацювання деталей в складі двигуна

						Арк.
						16
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР 0325.00.00.000 ПЗ	

показує, що зношування може досягати 1 мм і більше [14]. По мірі збільшення зношування зменшується натяг між лопатками і бандажні полиці отримують можливість більш вільно переміщатися одна відносно одної як вздовж, так і в поперек контактної поверхні. В кінці кінців може відбутися напуск бандажних полиць двох поруч розміщених лопаток, тому зміцнення контактних поверхонь титанових лопаток є важливим завданням.

Деякі з проблем, пов'язаних зі зношуванням титанових лопаток, можуть бути ефективно вирішені шляхом застосування нового композиційного матеріалу ВТН-1. Цей матеріал являє собою композицію з твердих частинок карбиду вольфраму (реліту) та припою на титановій основі ВПр16, який виконує роль в'язучої фази [21]. Завдяки поєднанню високої твердості армувальних частинок WC з високою адгезією до підкладки, що досягається за рахунок металевого зв'язку між компонентами композиції, матеріал забезпечує надійне з'єднання з титановою деталлю та виявляє високу зносостійкість під час експлуатації.

Для реалізації процесу напайки матеріалу ВТН-1 була розроблена спеціалізована установка, що включає вакуумну камеру, індукційний нагрівач на основі високочастотного генератора та систему вакуумування [22]. В камеру одночасно завантажуються до 40...50 лопаток. Перед напайкою на знежирену поверхню бандажної полиці наносять пастоподібну суміш, що складається з порошків реліту та припою ВПр16 у масовому співвідношенні 1:1. Ця суміш замішується на 5...6 % розчині акрилової смоли БМК-5 у розчиннику типу Р-5 або Р-648. На відміну від методів плазмового чи детонаційного напилення, підготовка поверхні у цьому випадку не потребує додаткової механічної обробки (шліфування, абразивного очищення) і може проводитися безпосередньо після фрезерування.

Після створення у камері вакууму до рівня 8×10^{-1} Па її об'єм заповнюється інертним газом — аргоном. Процес напайки здійснюється шляхом індукційного нагрівання деталей струмами високої частоти за

					БР 0325.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

допомогою індуктора, встановленого всередині камери. Температурний контроль під час напайки забезпечується фотопірометром, що дозволяє досягти стабільних параметрів процесу та якісного з'єднання наплавленого шару з титановою основою. 1.5 Висновки та постановка задачі досліджень

У сучасних газотурбінних двигунах (ГТД) широкого застосування набули бандажовані лопатки турбін, оскільки використання бандажних полиць забезпечує зменшення амплітуди змінних напружень, спричинених вібраційними навантаженнями. Це, у свою чергу, сприяє підвищенню довговічності та надійності роботи вузлів турбіни. Проте в умовах тривалої експлуатації, особливо за високих температур і вібрацій, контактні ділянки полиць зазнають значного зношування, що є критичнішим порівняно з іншими зонами, такими як перо або замок лопатки.

Підвищення робочих температур і ресурсних вимог до сучасних авіаційних двигунів супроводжується інтенсифікацією зносних процесів на контактних поверхнях. Це обмежує тривалість їх експлуатації та знижує надійність конструкції. Впродовж служби лопаток спостерігається виникнення типових дефектів, серед яких:

- розвиток втомних тріщин у тілі деталі або по поверхневих шарах;
- пошкодження поверхні внаслідок високотемпературної газової корозії;
- інтенсивне зношування контактних зон під дією тертя та вібрацій.

Попри високу питому міцність і корозійну стійкість, титанові сплави, зокрема сплав ВТЗ-1, мають обмежену зносостійкість. Це зумовлює необхідність розробки ефективних технологій підвищення ресурсу деталей з титану, зокрема шляхом модифікації їх поверхні. Особливо актуальним є зміцнення контактних поверхонь бандажних полиць компресорних лопаток, які працюють у складних умовах тертя, вібрації та високих температур.

					БР 0325.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

1.6. Висновки та постановка задачі

На основі аналізу сучасного науково-практичного досвіду ремонтних підприємств авіаційної галузі, одним з економічно доцільних та технологічно ефективних методів відновлення функціональних властивостей лопаток залишається зварювання. Водночас останні дослідження, зокрема в галузі поверхневої інженерії та матеріалознавства, доводять перевагу локального зміцнення зношуваних зон за допомогою напайки шарів жаро- та зносостійких матеріалів. Особливо ефективними є композиційні наплавні покриття, зокрема на основі карбідів (WC, TiC) та інтерметалідів, які демонструють високу термостійкість і зносостійкість у середовищах, характерних для ГТД.

Сучасні дослідження [22...23] показують, що для зміцнення титанових поверхонь доцільно використовувати композиційні матеріали, які забезпечують високу адгезію до титану та мають стабільну мікроструктуру при температурах до 800–900 °С. Одним із таких рішень є напайка композиційного матеріалу ВТН-1, що містить карбід вольфраму в зв'язці на основі титанових припоїв. Такі системи мають високу зносостійкість, низьку схильність до тріщиноутворення та зберігають цілісність шару при циклічних теплових навантаженнях. Метою роботи бакалавра було дослідження впливу напайки зносостійкого матеріалу на властивості та структуру поверхонь бандажних полицок лопаток компресора з аналізом впливу напайки зносостійкого матеріалу на структурний стан поверхні бандажних полицок компресорних лопаток. Проведене порівняння мікроструктури та елементного складу поверхонь титанової основи сплаву ВТЗ-1 у вихідному стані та після напайки дозволяє оцінити оптимальні поєднання механічних, фізичних і технологічних характеристик, необхідних для підвищення зносостійкості поверхні та збільшення ресурсу експлуатації лопаток.

					БР 0325.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

Для досягнення поставленої мети в процесі роботи були поставлені наступні завдання:

– дослідити мікроструктуру зразків, виготовлених зі сплаву ВТЗ-1 та зразків з напайкою зносостійкого матеріалу (реліту);

– провести спектральний аналіз хімічного складу зразків, виготовлених із титанового сплаву ВТЗ-1 та хімічного складу напайки;

– провести дослідження механічних властивостей зразків, виготовлених із титанового сплаву ВТЗ-1 та зразків з напайкою реліту;

– на основі отриманих результатів провести порівняльну характеристику досліджуваних зразків та встановити вплив напайки зносостійкого матеріалу на комплекс властивостей поверхні бандажних полицок.

					БР 0325.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

РОЗДІЛ 2

ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

2.1. Опис об'єкту досліджень

Виготовлення лопаток газотурбінних двигунів (ГТД) має важливе значення для авіаційного двигунобудування. Це пояснюється складністю геометрії пера і хвостовика, високими вимогами до точності виготовлення, використанням дорогих та дефіцитних матеріалів, великою серійністю виробництва, необхідністю застосування спеціалізованого обладнання, а також значною трудомісткістю технологічного процесу.

Лопатки компресора істотно відрізняються за розмірами та конструктивними особливостями, проте всі вони повинні відповідати вимогам галузевих стандартів, що базуються на багаторічному досвіді проектування та експлуатації. Об'єктом дослідження є компресорна лопатка ГТД, креслення якої подано у додатку А. До її основних елементів належать перо, хвостовик і бандажні полицьки.

Перо має просторову конфігурацію зі змінним профілем по довжині. Поперечні перерізи пера повернуті відносно один одного, що формує закручення пера до 60° . Воно характеризується малою товщиною, незначною кривизною та суттєвим перепадом товщини від периферії до комлевої частини. Хвостовик за формою відповідає типу «ластівчин хвіст» і має плоскі робочі поверхні.

У сучасних конструкціях ГТД бандажування лопаток турбін застосовується з метою зменшення вібраційних навантажень, що дозволяє підвищити надійність і ресурс роботи. Проте в умовах експлуатації через тертя та вібрацію на поверхнях контактування полицьок виникає інтенсивне зношування, переважно в зонах бандажного з'єднання.

						Арк.
						21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР 0325.00.00.000 ПЗ	

Матеріали, з яких виготовляють лопатки компресора, повинні забезпечувати високу міцність при температурах до 600 °С і корозійну стійкість. Найбільш поширеними є леговані сталі та титанові сплави. Останні мають перевагу завдяки поєднанню високих механічних властивостей, термічної стабільності, стійкості до окислення й малої густини, що дозволяє зменшити масу двигуна. До найбільш вживаних належать сплави ВТ3-1, ВТ5, ВТ8, ВТ9 і ВТ18.

Сплав ВТ3-1 належить до системи Ti-Al-Cr-Mo-Fe-Si. Він характеризується структурою типу ($\alpha+\beta$), що забезпечує термічну стабільність і хорошу пластичність. Після загартування з температури 970 °С формується голчастий мартенсит α' , який при старінні розпадається на суміш α - і β -фаз. Це сприяє зміцненню сплаву. У відпаленому стані сплав може експлуатуватись при температурі 400 °С необмежений час, а при 450 °С – до 3000 годин. Після термічного зміцнення сплав працює при 400 °С до 1000 годин, а при 450 °С – до 500 годин. Матеріал добре зварюється, що також є важливою перевагою.

Незважаючи на це, титанові сплави мають низьку зносостійкість, особливо у зонах контактного навантаження, як-от бандажні полицьки. Підвищення ресурсу таких елементів можливе шляхом напайки зносостійкого матеріалу. Одним з ефективних рішень є застосування композиційного матеріалу на основі карбиду вольфраму (реліту) з використанням припою ВПр16 як в'язучої фази.

Реліт представляє собою литий карбід вольфраму WC-WC₂, який отримують шляхом плавлення, дроблення або розпилення розплаву. Він забезпечує високу твердість, зносостійкість та термічну стабільність при температурах експлуатації, що дозволяє збільшити ресурс деталей у 2–4 рази.

Припій ВПр16, виготовлений методами порошкової металургії, має титанову основу і характеризується високою жаростійкістю, корозійною стійкістю, задовільною технологічністю та міцністю шва, порівнянною з основним матеріалом.

						Арк.
						22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР 0325.00.00.000 ПЗ	

Композиційний матеріал на основі реліту та ВПр16 поєднує високу твердість армуючих частинок з надійним металевим зв'язком з титановою підкладкою, що забезпечує зносостійкість та довговічність поверхні.

Для дослідження впливу напайки на структуру та властивості лопаток були виготовлені зразки зі сплаву VT3-1 (таблиця 2.1) без покриття, з дефектною та якісною напайкою. Візуальні відмінності між варіантами наведено на рисунку 2.1, де зображено відповідні бандажні полицки компресорної лопатки після нанесення зносостійкого матеріалу.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад сплаву VT3-1, %

Ti	Al	Mo	Cr	Fe	Si
Основа	6,0	2,3	2,0	0,5	0,3

Титанові сплави характеризуються недостатньою зносостійкістю, що зумовлює необхідність підвищення довговічності деталей, виготовлених із цих матеріалів, а також актуалізує питання зміцнення та відновлення зношених поверхонь. Найбільш вразливими у цьому контексті є контактні зони бандажних полиць лопаток компресора газотурбінного двигуна. Одним із перспективних підходів до подовження ресурсу таких елементів є нанесення зносостійкого композиційного покриття, сформованого шляхом напайки матеріалу на основі карбиду вольфраму (реліту) із застосуванням припою ВПр16, який виконує роль в'язучої фази.

Реліт, що представляє собою литий карбід вольфраму системи WC–WC₂, отримується шляхом плавлення з подальшим подрібненням або розпиленням розплаву для формування зернистої структури (таблиця 2.2). Цей матеріал зберігає високу твердість і опір деформації навіть при підвищених температурах, що у поєднанні з прийнятною міцністю робить його ефективним для підсилення поверхонь деталей, які працюють в умовах інтенсивного абразивного зношування. Використання реліту дозволяє

						Арк.
						23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР 0325.00.00.000 ПЗ	

подовжити експлуатаційний термін таких елементів у 2...4 рази, що підтверджено практичними результатами



а



б

Рисунок 2.1 – Бандажні полицки лопатки компресора ГТД з дефектною (а) та якісною (б) напайкою зносостійкого матеріалу

Таблиця 2.2 – Хімічний склад реліту, %

W	C		Домішки, не більше	
	загальний	вільний	Fe	Si
95,5 – 96,0	3,7 – 4,0	0,05, не більше	0,2	0,07

Припій ВПр16 на титановій основі (таблиця 2.3), виготовляється методом порошкової металургії. Припій забезпечує високу корозійну стійкість паяних з'єднань, мінімальну ерозію, технологічність та жаростійкість міцнісні властивості шва не нижчі від властивостей основних матеріалів.

Таблиця 2.3 – Хімічний склад припою ВПр16, %

Ti	Cu	Zr	Ni	Домішки, не більше	
				O	Ca
Основа	21,0 – 24,0	11,0 – 14,0	8,0 – 10,0	0,3	0,1

Отриманий композиційний матеріал поєднує високу твердість армуючих частинок карбиду вольфраму з надійним з'єднанням як між самими

частинками, так і з основою – титановою деталлю. Це забезпечується завдяки використанню в'язучого матеріалу, який під час взаємодії з армуючими компонентами формує міцний металевий зв'язок. Така структура визначає високу експлуатаційну надійність і працездатність нанесеного покриття.

Для аналізу впливу напайки на структуру й властивості бандажних полицок лопатки були виготовлені зразки трьох типів:

- зразок із титаново-алюмінієвого сплаву ВТЗ-1 без покриття;
- зразок із бандажної полицки, на яку нанесене покриття з реліту з наявними дефектами;
- зразок із бандажної полицки з якісно виконаною напайкою реліту.

2.2. Дослідження структури та властивостей матеріалу поверхневих шарів

У рамках дослідження впливу експлуатаційних навантажень і технологічних операцій на властивості титанових сплавів було проведено комплексний аналіз структури та властивостей матеріалу із залученням фрактографічних, металографічних та фізико-механічних методів.

Одним з ключових етапів є фрактографічний аналіз, який дозволяє вивчити характер зламів, встановити механізми руйнування та ідентифікувати зміни, що виникають внаслідок дії зовнішніх чинників, таких як висока температура, тривале навантаження та локальні термічні впливи. Для цього застосовано скануючий електронний мікроскоп РЕММА-102А, що поєднує можливості електронної мікроскопії високої роздільної здатності з рентгенівським мікроаналізом [26]. Завдяки широкому діапазону збільшень (від 5 до 300 000 разів) і чутливому рентгеноспектральному аналізу, стало можливим точно виявляти зміни на поверхні досліджуваних зразків, ідентифікувати фазові включення та визначати елементний склад локальних ділянок. Дослідження зразків виконували при збільшеннях до 1000 разів, що

						Арк.
						25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР 0325.00.00.000 ПЗ	

забезпечувало належну глибину різкості та чітке зображення рельєфу поверхні.

Для структурного аналізу застосовано методи оптичної металографії. Зразки у вигляді мікрошліфів готували за класичною методикою: шліфуванням, поліруванням і травленням, що дозволяло отримати дзеркально гладку поверхню без спотворень. Дослідження мікроструктури проводили на мікроскопі МИМ-10 при збільшеннях до 500 разів. На шліфах аналізували розмір та форму зерен, характер міжзеренних меж, а також розподіл вторинних фаз. Вивчення проводили як на нетравлених, так і на травлених шліфах, для чого використовували реактив Кроля. Особливу увагу приділено зразкам з бандажних полицок, які експлуатувались в умовах значного тертя та температурних навантажень.

Металографічні дослідження дали змогу оцінити морфологію та просторове розташування структурних складників, виявити наявність мікродфектів, таких як пори, тріщини та включення. Макроструктурний аналіз із застосуванням малих збільшень дозволив додатково виявити крупні дефекти, що формуються на етапах термообробки чи механічної обробки [27].

Оцінку фізико-механічних характеристик поверхневого шару матеріалу здійснено за допомогою приладу «Мікрон-гамма», який працює за принципом безперервного втиснення індентора з фіксацією залежності навантаження від глибини проникнення. Отримані криві навантаження $P=f(h)$ містять детальну інформацію про пружнопластичні властивості матеріалу на мікрорівні. Метод дозволяє не лише визначити мікротвердість, а й проаналізувати особливості деформування під індентором, що є критично важливим при дослідженні зон, змінених унаслідок напайки або термічного впливу [28].

Комплексне застосування зазначених методів забезпечило всебічне уявлення про зміну структури та властивостей матеріалу в умовах експлуатації та локальної термообробки. Дослідження підтвердили, що поєднання електронної мікроскопії, оптичної металографії та механічного

						Арк.
						26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР 0325.00.00.000 ПЗ	

аналізу дає змогу встановити як макроскопічні, так і мікроскопічні причини зміни працездатності титанових сплавів.

2.3. Метод безперервного втиснення індентора та склерометрія

Метод безперервного втиснення надає можливість проводити дослідження мікротвердості матеріалів у режимах малих і надмалих навантажень. Він дозволяє аналізувати кінетику руху індентора з метою вивчення мікродеформацій, фіксувати явища мікроповзучості, визначати зміни властивостей матеріалу за глибиною проникнення, а також оцінювати крихкість і пружні характеристики на основі діаграми занурення (рисунок 2.2).

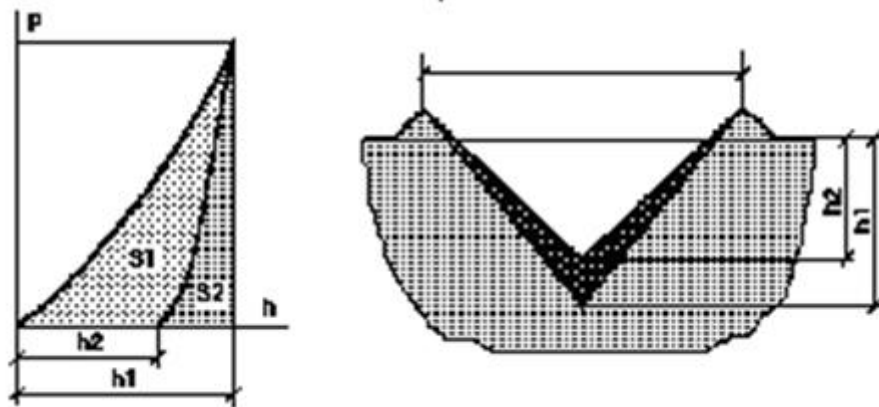


Рисунок 2.2 – Діаграма навантаження і переріз відбитку

Якщо на шляху сканування індентора поверхня представлена комбінацією твердих (дрібних L2) та м'яких (великих L1) ділянок, обробка трибограми – графіка залежності глибини занурення від часу – як випадкового процесу із побудовою спектральної щільності дає змогу отримати узагальнену характеристику міцності поверхні. Спектральний аналіз дозволяє зробити висновки щодо кількості, розмірів і міцності окремих ділянок уздовж траєкторії індентора.

						Арк.
						27
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР 0325.00.00.000 ПЗ	

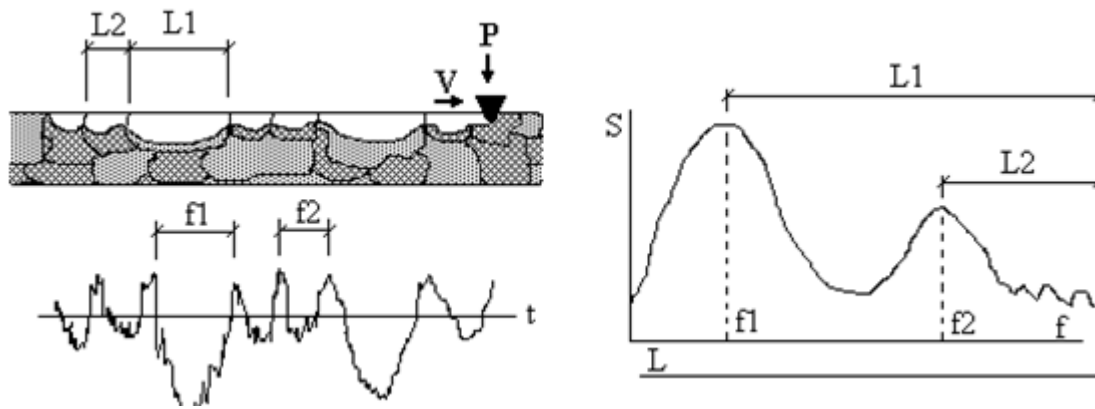


Рисунок 2.3 – Модель, що пояснює принцип дії методу сканування

Площа під кривою навантаження (S_1) відображає роботу, витрачену індентором на подолання опору матеріалу, а площа під кривою розвантаження (S_2) – енергію, що повертається завдяки пружному відновленню властивостей матеріалу. Оцінювання повзучості ґрунтується на побудові залежності глибини занурення індентора h від часу витримки T під сталою силою, а градієнт міцності визначається за графіком зміни твердості H залежної від навантаження.

Метод сканування, зображений на рисунку 2.3, передбачає безперервну реєстрацію опору переміщенню індентора по поверхні за фіксованого навантаження. Аналіз статистичних залежностей між опором окремих мікрооб'ємів матеріалу і їх здатністю до контактної деформації з використанням теорії випадкових процесів забезпечує комплексну оцінку стану поверхневого шару. Такий підхід дозволяє визначати середню міцність уздовж шляху сканування, оцінювати ступінь неоднорідності й варіативність міцнісних характеристик, а також моделювати мікромеханізми тертя і зношування, зокрема мікрорізання, мікроковзання тощо.

Глибше розуміння стану поверхневого шару забезпечується за допомогою сканувального режиму індентування, в якому реєструється зміна опору руху індентора по поверхні під заданим навантаженням. Цей підхід дає

									Арк.
									28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР 0325.00.00.000 ПЗ				

змогу встановити статистичні зв'язки між опорами локальних мікрооб'ємів до контактної деформації, що дозволяє проводити комплексну оцінку механічного стану поверхні. Наприклад, при аналізі зношування інструментальних сталей після експлуатації можна виявити ділянки зниження міцності або накопичення залишкових деформацій. Застосування методів теорії випадкових процесів для обробки отриманих даних відкриває можливості для моделювання елементарних актів тертя й зношування, таких як мікрорізання, мікроковзання та мікроруйнування, що мають критичне значення в умовах абразивного чи контактного зношування.

2.4. Методи вимірювання твердості на «Мікрон-гамма»

Сучасні прилади для інструментального індентування, зокрема „Мікрон-гамма”, забезпечують автоматизоване визначення твердості матеріалів з подальшим виведенням результатів на монітор комп'ютера. Вимірювання здійснюються одночасно за методом Мейєра та методом Мартенса, що дозволяє отримати розширену інформацію про механічні властивості поверхневих шарів. Ці методи є основоположними у визначенні характеристик опору матеріалу локальній деформації, що виникає під дією індентора з визначеними параметрами навантаження та швидкістю втискування.

Поняття твердості, в узагальненому вигляді, визначається як відношення прикладеного навантаження до площі контакту, сформованої в результаті пружнопластичного деформування матеріалу. При цьому в залежності від підходу розрізняють два типи твердості. Невідновлена твердість базується на аналізі пружних деформацій і визначається за глибиною проникнення індентора під навантаженням. Відновлена твердість, навпаки,

						Арк.
						29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР 0325.00.00.000 ПЗ	

характеризується за геометричними параметрами відбитку після розвантаження, зокрема за його поперечним розміром.

Вимірювання мікротвердості здійснюється в умовах, коли розмір сліду від індентора є меншим за характерний розмір мікроструктурного елементу матеріалу, наприклад, зерна або субзерна. У таких випадках реалізується залежність мікротвердості від розміру відбитку за дотримання умов механічної подібності, що дозволяє робити висновки про локальні механічні неоднорідності структури [29].

У свою чергу, твердість за Мейером інтерпретується як середній контактний тиск у межах відбитку і найточніше передає фізичну суть твердості як опору матеріалу проникненню. Кількісно твердість за цим методом зазвичай перевищує значення стандартної твердості, оскільки базується на реальній площі контакту, розрахованій для конкретної геометрії індентора. Формула для визначення твердості за Мейером має вигляд:

$$H_M = F/P = 4P / \pi \cdot d^2,$$

де P прикладене навантаження;

$F = 0,25 \cdot \pi \cdot d^2$ – площа проекції відбитку на поверхню.

Історично склалося, що у вимірюванні твердості паралельно розвивалися два підходи – оцінка за глибиною проникнення та за поперечним розміром залишкового відбитку. Обидва методи ще у 1890 році були запропоновані Альфредом Мартенсом, що свідчить про їхню тривалу історію та взаємодоповнюючий характер [30]. У сучасних дослідженнях пріоритет надається методам, що дозволяють одночасно реєструвати обидва параметри, оскільки це забезпечує глибший рівень інтерпретації результатів. Визначення відновленої та невідновленої твердості в одному циклі випробування дозволяє точніше охарактеризувати механічну поведінку матеріалу як у пружній, так і в пластичній області, що особливо важливо при дослідженнях матеріалів з тонкими поверхневими шарами або покриттями [31].

						Арк.
						30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР 0325.00.00.000 ПЗ	

РОЗДІЛ 3

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Результати фрактографічного аналізу

3.1.1. Аналіз зразка без покриття

На рисунку 3.1 представлено зображення поверхні нешліфованого зрізу зразка з титанового сплаву ВТЗ-1 отримане в електронному мікроскопі РЕММА 102, який об'єднує функції растрового електронного мікроскопа високого роздільної здатності і рентгенівського мікроаналізатора і використовується для дослідження рельєфу і проведення рентгенівського мікроаналізу елементного складу речовини за довжинами хвиль і енергіями квантів характеристичного рентгенівського випромінювання.

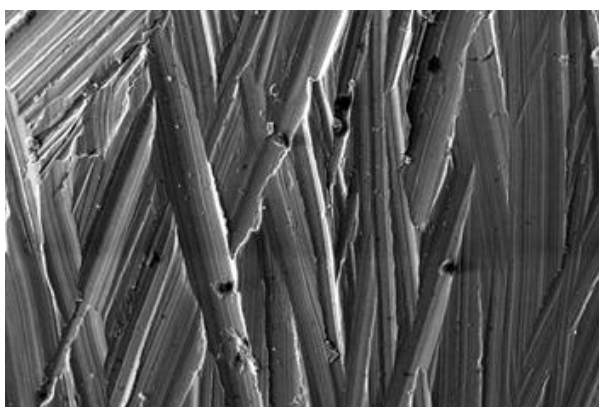


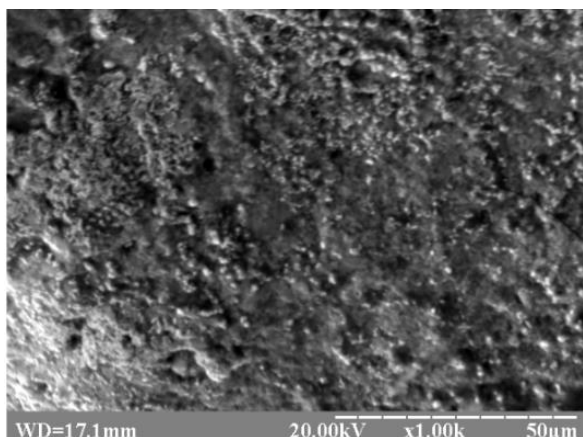
Рисунок 3.1 – Зображення зрізу титанового сплаву ВТЗ-1 $\times 80$

Як видно з рисунку забарвлення в основному однорідне. Також є ділянки у вигляді невеликих за формою включень. На поверхні зрізу видно риси і подряпини, які вказують, що матеріал є в'язким і пластичним.

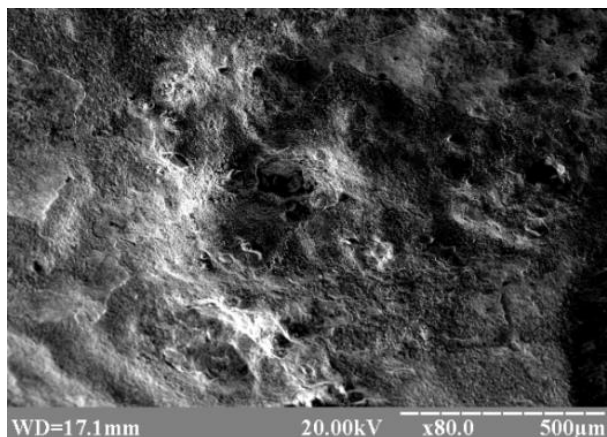
					БР 0325.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

3.1.2. Аналіз зразка з дефектною напайкою

На рисунках 3.2, 3.3 представлені зображення поверхні дефекту покриття.



а



б

Рисунок 3.2 – Поверхня дефектної ділянки

Як видно з рисунку, є ділянки з різним забарвленням, від дуже темних, сірих і до світлих ділянок, різної шорсткості і форми, а також є подекуди невеликі тріщини (які не проходять на товщину покриття). Можливо, ці тріщини виникають у момент швидкого охолодження поверхневого шару покриття після його швидкого розплавлення і через дію стимулюючих сил відбувалося швидке розтріскування поверхні.

В деяких місцях взагалі можна побачити явний контур застиглих деформованих частинок. На поверхні також чітко помітно окремі рівні темні ділянки покриття, що мають явну зернисту структуру. Спостерігається також присутність западин з сильно рельєфним дном і темними і світлими ділянками.

					БР 0325.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

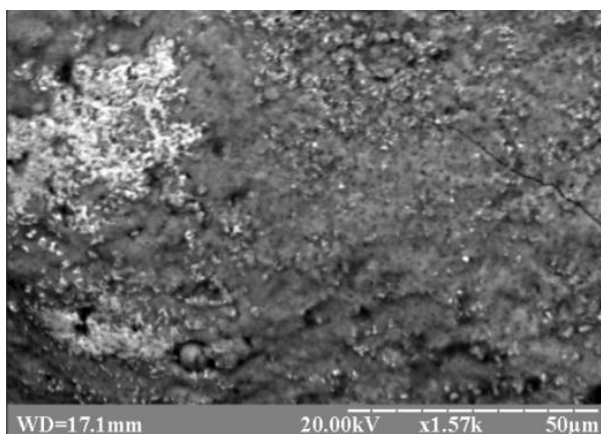


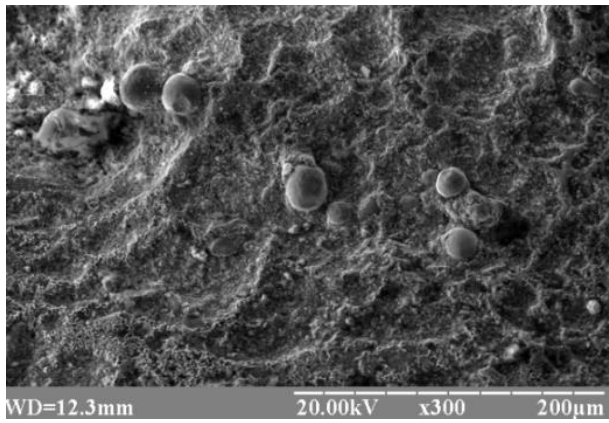
Рисунок 3.3 – Характерна ділянка поверхні напайки з дефектом в режимі COMPO:

- 1 – сіра,
- 2 – світла
- 3 – зачищена ділянки

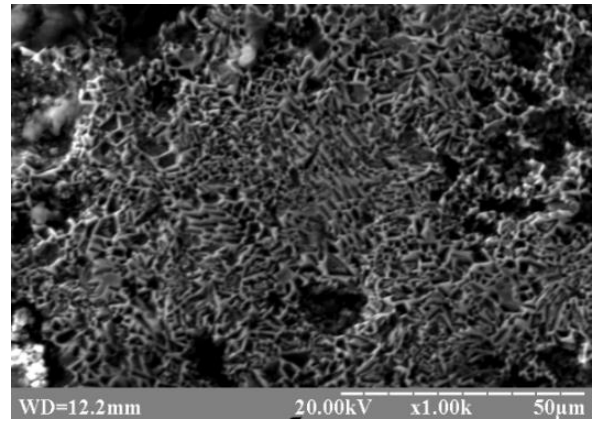
3.1.3. Аналіз якісної напайки

На рисунку 3.4 а, б представлені зображення поверхні зразків з покриттям напайкою, одержані при різних збільшеннях. Як видно з рисунку, є ділянки з різним забарвленням, різної шорсткості і форми. Також є ділянки (рисунок 3.4 б) у вигляді невеликих за формою застиглих краплин, здуття і "кратерів". Судячи з характеру мікрорельєфу поверхні, навіть на таких малих збільшеннях (рисунок 3.4 а), можна наголосити на наявності дуже високої шорсткості. Часткове оплавлення деяких частинок порошку і їх подальша високошвидкісна деформація на поверхні підкладки є причиною формування поверхні у вигляді застиглої лави. В деяких місцях взагалі можна побачити явний контур застиглих деформованих частинок. Спостерігається також присутність западин з сильно рельєфним дном.

					БР 0325.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33



а



б

Рисунок 3.4 – Структура поверхні напайки при різних збільшеннях

3.2. Результати металографічних досліджень

Оптична металографія була обрана як основний метод для аналізу мікроструктури досліджуваних матеріалів. Спостереження проводилися з використанням оптичного мікроскопа типу МИМ-10 при максимальному збільшенні до 500 крат, що дозволило детально оцінити стан міжзеренних границь, геометрію та розміри зерен, а також особливості морфології та просторового розподілу вторинних фаз.

Об'єктом дослідження слугував титановий сплав ВТЗ-1, мікроструктуру якого вивчали на мікрошліфах, виготовлених як із зразків основного матеріалу, так і з елементів конструкції – зокрема, з бандажних полицок. На одну з полицок було нанесено зносостійке покриття на основі реліту, причому для порівняння досліджували зону з якісним покриттям та зону з дефектним нанесенням.

Підготовка мікрошліфів до спостереження включала хімічне травлення поверхні зразків, яке здійснювалось із застосуванням реактиву Кроля. Процедура проводилася за кімнатної температури шляхом нанесення краплі травника на поверхню шліфа на 10...15 секунд. Після травлення зразки

					БР 0325.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

промивали проточною водою та висушували фільтрувальним папером для запобігання невизначеності структури.

Завдяки проведеним металографічним дослідженням вдалося охарактеризувати морфологічні особливості структури: кількість, форму, розміри й просторову орієнтацію фазових складників. Окрім того, було виявлено структурні зміни, спричинені дифузійним очищенням сплаву за різних температур, а також мікроскопічні дефекти суцільності матеріалу, зокрема мікротріщини, порожнини та пористість.

Типова структура титанового сплаву ВТЗ-1 (рисунок 3.5) відповідає двофазній системі, що складається з α - і β -фаз. Основним структурним елементом є зерна первинної β -фази сферичної форми зі світлим оптичним тоном, які оточені пластинчастими виділеннями α -фази. У процесі охолодження α -фаза формується переважно вздовж границь зерен β -фази. У результаті травлення α -фаза виявляється значно інтенсивніше, що дозволяє чітко візуалізувати її розташування та взаємозв'язок з β -фазою.

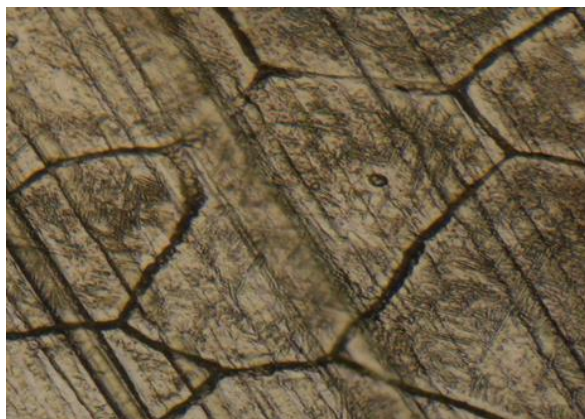


Рисунок 3.5 – Мікроструктура зразка титанового сплаву ВТЗ-1 $\times 100$

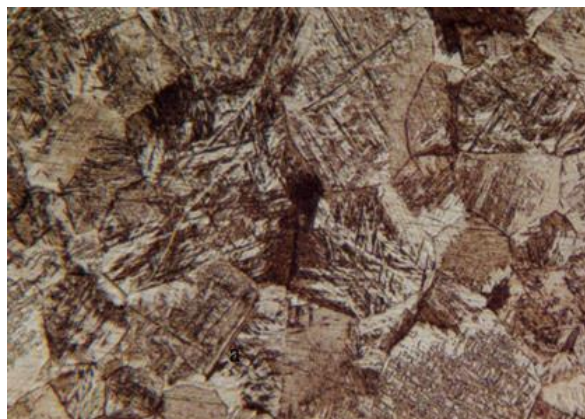
					БР 0325.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

Структура в основному однорідна, хоча помітно деяку неоднорідність: локальні скупчення легуючих елементів або невеликого розміру пори.

Структура вихідного сплаву ВТЗ-1 бандажних поличок лопатки під напайкою реліту (рисунок 3.6) значно відрізняється від структури хвостовика (рисунок 3.5).



а



б

Рисунок 3.6 – Мікроструктура титанового сплаву ВТЗ-1 бандажних поличок під дефектною (а $\times 200$) та якісною (б $\times 100$) напайками.

На протравленому шліфі сплаву ВТЗ-1 під дефектною напайкою (рисунок 3.6 а) помітні риски, які залишились після полірування, через те що титановий сплав є досить м'яким матеріалом, також на місце шліфування могли потрапити частки твердого реліту, який пошкодив шліф і полірування не могло виправити їх. На шліфі бандажної полички під якісною напайкою теж помітні риски, хоча вони значно менші. На фотографії (рисунок 3.6, а) також видно дуже крупні зерна. Сплав має голчасту схожу на мартенситну загартовану структуру, голки мають різні напрямки росту, перетинаються та ламаються при досягненні границь зерен та сусідніх колоній. В структурі сплаву під дефектною напайкою зерна мають чіткі, сильно окислені границі, також присутні невеликі пори чи інші дефекти, їх скупчення можна помітити на границях зерен.

Мікроструктура релітової напайки двофазна: світлі крупні зерна карбіду вольфраму и протравлені темні ділянки припою ВПр16. Світлі зерна –

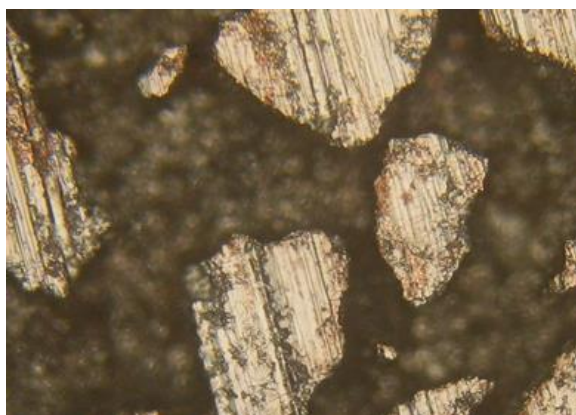
									Арк.
									36
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР 0325.00.00.000 ПЗ				

локальні скупчення порошку реліту – мають високу твердість і міцність, твердий розчин WC в припої – менш твердий, але більш в'язкий, служить в'язучим.

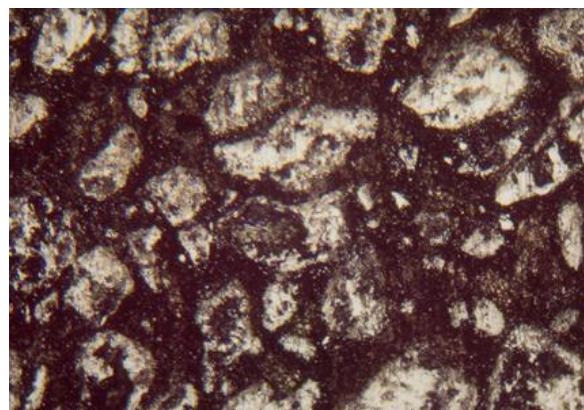
Дефектна напайка (рисунок 3.6, а) має неоднорідну структуру: великі нерівномірно розподілені зерна реліту, оточені підвищеною кількістю припою. На зернах реліту спостерігаються сліди корозії.

Якісна напайка (рисунок 3.6, б) характеризується рівномірним розподілом реліту та достатньою кількістю припою. Вона покриває всю поверхню досліджуваного зразка утворює щільне якісне бездефектне покриття, яке забезпечує високу твердість та міцність в процесі роботи лопатки.

З рисунку 3.7 а видно, що зерна реліту, на відміну від припою не протравились, зважаючи на те, що травлення проводилось реактивом Кролля призначеним для визначення структури титанових сплавів.



а



б

Рисунок 3.7 – Мікроструктура дефектної напайки (а \times 200), якісної (б \times 100)

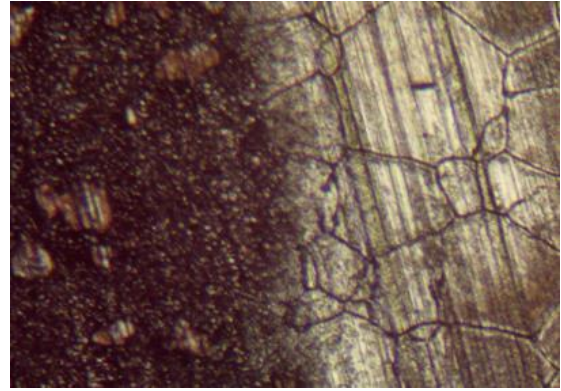
На рисунку 3.7 б видно, що припій має дрібнозернисту структуру, яка складається з β -фази.

На рисунках 3.8, а та 3.8, б представлені фотографії перехідних зон: напайка – основний метал, для дефектної та якісної напайок відповідно.

					Арк.	
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР 0325.00.00.000 ПЗ	37



а



б

Рисунок 3.8 – Мікроструктура перехідної зони дефектної напайки (а) та якісної (б). $\times 100$

На межі між дефектною напайкою та основним металом (рисунок 3.8, а) спостерігається нерівномірний контактний шар, який містить численні порушення суцільності у вигляді пор і мікротріщин. Структура реліту в цій зоні відзначається неоднорідністю: зерна мають різний розмір та хаотичне розташування, що свідчить про недосконалість технології напайки. Покриття не забезпечує повного перекриття поверхні, у результаті чого в окремих ділянках виявляються зерна основного матеріалу.

Натомість на зображенні, наведеному на рисунку 3.8 (б), видно, що межа між якісно нанесеним покриттям і основним металом чітка, рівномірна та не містить видимих дефектів. Хоча поблизу зони сполучення відзначається зменшення кількості частинок реліту, самі зерна мають малий розмір і розміщені не зовсім рівномірно, що може бути пов'язано з особливостями теплового впливу під час напайки.

Узагальнений аналіз виявлених структурних особливостей та їхнього впливу на якість з'єднання покриття з основою розглядається у наступному розділі.

					БР 0325.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

РОЗДІЛ 4

ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ДОСЛІДЖУВАНИХ ЗРАЗКІВ

Дослідження фізико-механічних характеристик матеріалів здійснювалися за допомогою багатofункціонального приладу «Мікрон-гамма», який забезпечує автоматичну реєстрацію навантаження (P) на індентор та відповідної глибини його проникнення (h) у поверхню зразка в реальному часі. Результати подаються у вигляді діаграми навантаження у координатах $P=f(h)$, що дає змогу аналізувати процес деформування матеріалу під час навантаження.

Використане програмне забезпечення дозволяє не лише візуалізувати експериментальні результати, але й автоматично формувати таблиці зі згрупованими значеннями характеристик, частина з яких отримана безпосередньо в процесі вимірювання, а частина обчислена на основі вбудованих математичних моделей.

Під час аналізу зразка з дефектним покриттям з реліту було зафіксовано зменшену глибину проникнення індентора порівняно із зразком з основного сплаву ВТЗ-1. Окрім цього, спостерігалось деяке розсіювання експериментальних даних. Для дефектного зразка характерні нижчі значення площі під кривою навантаження ($A_{об}$), що свідчить про меншу роботу деформування, водночас площа під кривою розвантаження ($A_{уп}$) є більшою, що може вказувати на підвищений вклад пружної деформації.

У разі дослідження зразка з якісною напайкою було виявлено три ділянки, де фіксувалася особливо мала глибина проникнення індентора. Це може свідчити про те, що в зазначених точках індентор контактував із твердими зернами реліту, які мають підвищену опірність до локального втискування. Для глибшого розуміння механізмів, що визначають реакцію

					БР 0325.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

різних зон матеріалу на індентацію, доцільним є подальший аналіз у комплексі з мікроструктурними дослідженнями

Результати вимірювання мікротвердості показано в таблицях 4.1, 4.2, 4.3.

Таблиця 4.1 – Мікротвердість для зразка з титанового сплаву VT3-1

Точка уколу	Відновлена мікротвердість H, ГПа	Невідновлена мікротвердість H _c , ГПа
1	3,46	3,91
2	3,13	3,75
3	3,23	3,76
4	3,83	4,13
5	3,99	4,39

Як видно з таблиці 4.1, зразок зі сплаву VT3-1 володіє невисокими значеннями як відновленої так і невідновленої мікротвердості. Відновлена твердість є дещо нижчою ніж невідновлена для всіх зразків, так як її вимірюють після розвантаження пластичного відбитку.

Таблиця 4.2 – Мікротвердість для зразка з дефектом

Точка уколу	Відновлена мікротвердість H, ГПа	Невідновлена мікротвердість H _c , ГПа
1	4,10	4,50
2	3,91	4,89
3	4,54	5,08
4	4,12	4,47
5	4,14	4,87

Мікротвердість зразка з дефектною напайкою (таблиця 4.2) має дещо вищі значення ніж зразок зі сплаву ВТЗ-1, хоча і нижчі ніж зразок з якісною напайкою (таблиця 4.3).

Таблиця 4.3 – Мікротвердість для зразка з якісною напайкою реліту

Точка уколу	Відновлена мікротвердість Н, ГПа	Невідновлена мікротвердість Н _ц , ГПа
1	4,46	5,49
2	5,06	5,79
3	5,06	5,36
4	5,39	5,82
5	4,19	5,10

Зразок з якісною напайкою реліту характеризується найвищими з досліджуваних зразків значеннями мікротвердості, що безперечно забезпечується рівномірним розподілом зерен реліту, які мають високі значення мікротвердості (таблиця 4.4).

Таблиця 4.4 – Мікротвердість зерен реліту

Точка уколу	Відновлена мікротвердість Н, ГПа	Невідновлена мікротвердість Н _ц , ГПа
1	17,88	20,21
2	18,64	21,02
3	14,91	16,84

Графіки порівняння значень відновленої та невідновленої мікротвердості визначені для різних зразків представлені на рисунку 4.1, значення мікротвердості зерен реліту на графіку не представлені.

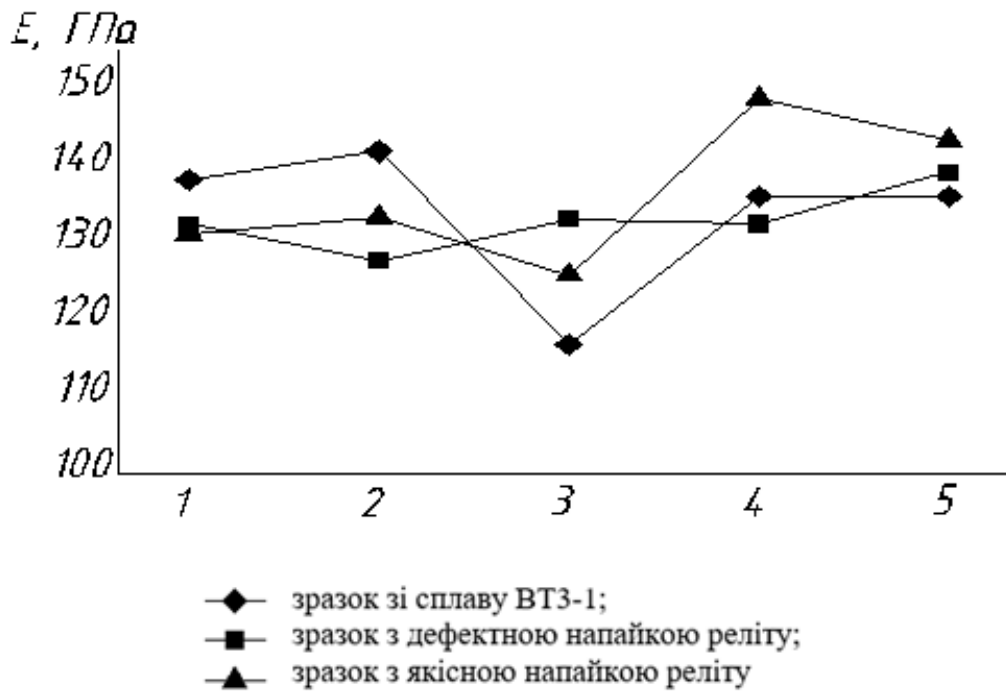


Рисунок 4.2 – Порівняння значень модулів пружності досліджуваних зразків

На рисунку 4.3 зображено порівняння показників пластичності, на графіку також спостерігається неоднорідний розподіл значень по поверхнях зразків. Можна помітити, що зразок зі сплаву VT3-1 володіє найвищою пластичністю, а зразок з якісною напайкою – найменшою.

Графіки порівняння меж міцності зразків (рисунок 4.4) показують дещо менший розкид результатів досліджень. З рисунку однозначно можна сказати, що найвищу міцність має зразок з якісною напайкою реліту, а найнижчу – зразок з дефектом.

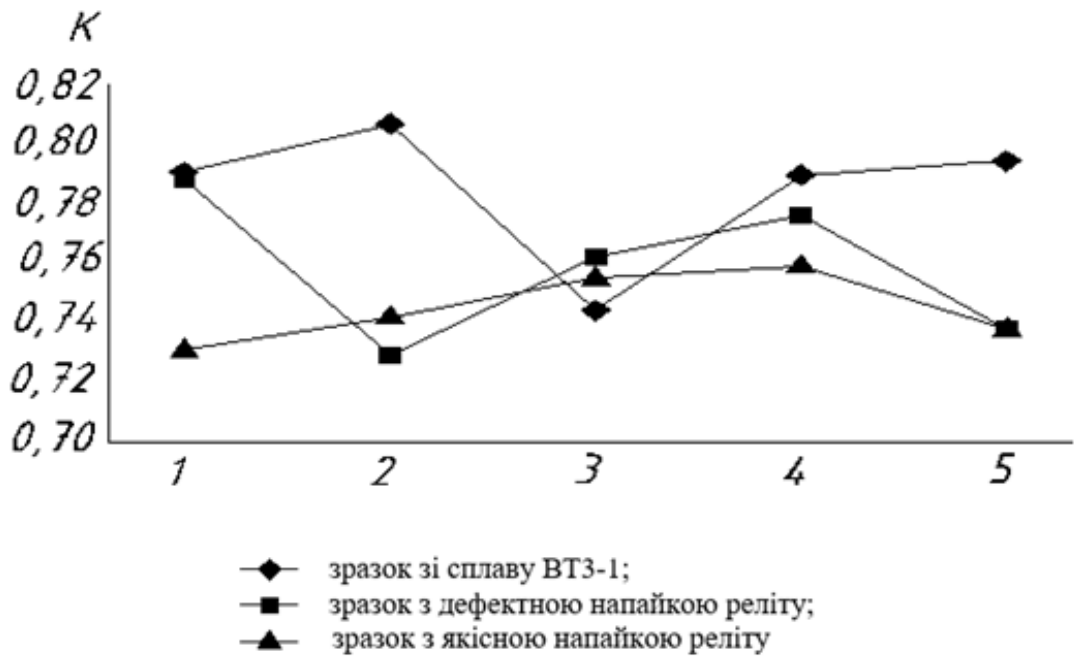


Рисунок 4.3 – Порівняння значень показників пластичності досліджуваних зразків

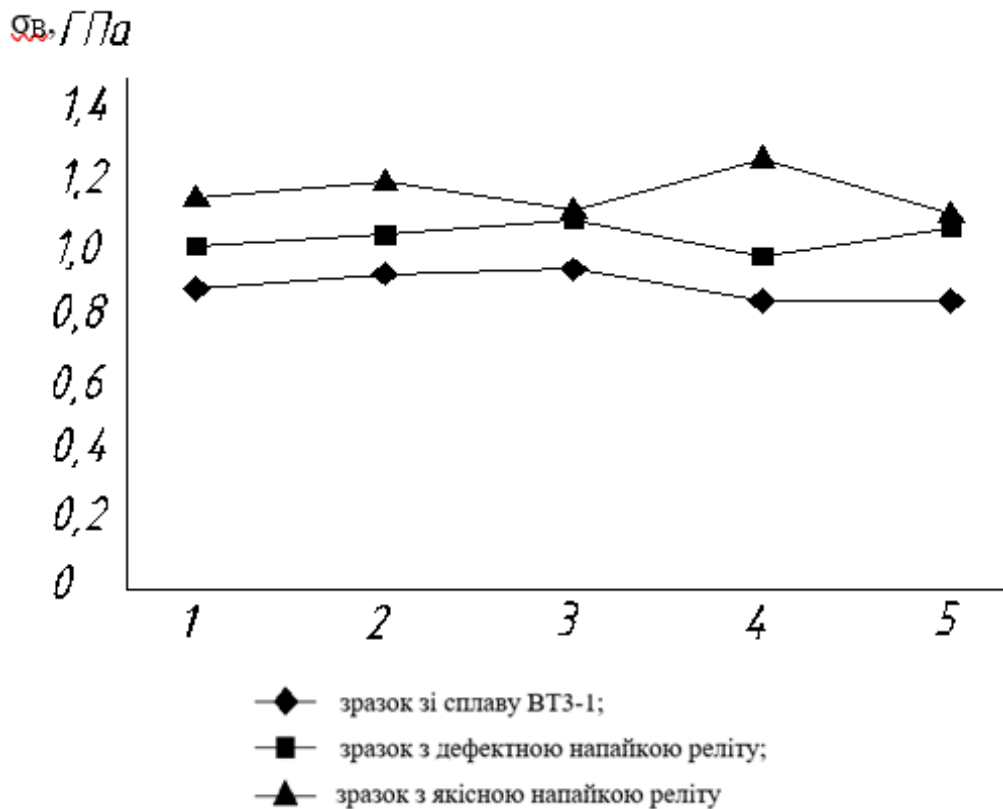


Рисунок 4.4 – Порівняння значень меж міцності досліджуваних зразків

РОЗДІЛ 5

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

5.1. Аналіз мікроструктури

Мікроструктуру титанового сплаву ВТЗ-1 досліджували на мікрошліфах, виготовлених з основи різними методами, а також у зоні бандажних полицок, де здійснювалась напайка зносостійкого матеріалу — реліту. Зразки для аналізу структури готували відповідно до стандартних методик металографії. Основним методом дослідження була оптична металографія із застосуванням мікроскопа МІМ-10 при збільшенні до 500 разів. За результатами цих досліджень визначали морфологію, розміри, форму, кількість і розташування структурних складників, а також вивчали структурні зміни, спричинені дифузійним очищенням сплаву за різних температур. Окрім того, було виявлено мікроскопічні дефекти — тріщини, пори та порожнини.

Зразки, отримані з хвостовика лопатки, мають типовий для сплаву ВТЗ-1 двофазний ($\alpha+\beta$) тип структури. У мікроструктурі видно дрібні зерна β -фази сферичної форми, оточені α -фазою, яка протравлюється значно інтенсивніше. Сплави з ($\alpha+\beta$)-структурою ефективно застосовуються у відповідальних конструкціях, що працюють під значними навантаженнями при помірно високих температурах.

Підвищений вміст алюмінію, а також легування оловом, цирконієм, молібденом, хромом, вольфрамом і ванадієм забезпечує сплавам високу міцність і жароміцність. Додавання β -стабілізаторів запобігає охрупченню через виділення фази Ti_3Al і водночас покращує технологічну пластичність. Зміцнення ($\alpha+\beta$)-сплавів досягається завдяки легуванню твердих розчинів та дисперсному твердненню в процесі термічної обробки.

						Арк.
						45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР 0325.00.00.000 ПЗ	

Окрім міцності, такі сплави повинні також характеризуватися високою тріщиностійкістю, втомною міцністю та стійкістю до окислення і дії солей. Необхідні властивості вони набувають після кінцевої термічної обробки — загартування й старіння, які підбираються залежно від умов експлуатації деталей. Варто зазначити, що високу ефективність зміцнення забезпечує термічна обробка лише для матеріалів із рівноважною дрібнозернистою структурою.

Загалом структура зразків є однорідною, хоча в деяких зонах виявлено локальні неоднорідності – скупчення легуючих елементів або пори невеликого розміру. Такі дефекти формуються під час лиття під тиском за умов високих швидкостей охолодження та обмежених розмірів перерізу –газові включення не встигають вийти з металу. Подібні дефекти є незначними й практично не впливають на експлуатаційні характеристики.

Структура матеріалу в зоні напайки на бандажній полиці істотно відрізняється від пера і хвостовика, які не зазнавали теплового впливу. На мікрослїфі спостерігаються слїди полірування, що пояснюється м'якістю титанового сплаву або потраплянням твердих частинок релїту під час шліфування. Для уникнення подібних дефектів доцільно використовувати електролітичне полірування.

На знімках мікроструктури в зоні напайки помітні крупні зерна з чіткими межами, що утворилися під час СВЧ-нагрїву, який спричиняє інтенсивне зростання зерна в титанових сплавах. У зоні дефектної напайки границі зерен мають характерне травлення через скупчення пор і мікродефектів. Структура основного металу після напайки набуває голчастого, подібного до мартенситного, вигляду внаслідок швидкого охолодження на повітрі.

Порівняння перехідних зон між якісною і дефектною напайкою засвідчує, що у першому випадку перехід є рівномірним і бездефектним, тоді

									Арк.
									46
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР 0325.00.00.000 ПЗ				

як у другому – спостерігаються порушення суцільності, включаючи пори й тріщини.

Мікроструктура напаяного шару реліту є двофазною: світлі крупні кристали WC та темні протравлені ділянки припою ВПр16. Тверді зерна WC забезпечують зносостійкість, а припій виконує функцію в'язучого шару, будучи більш в'язким. Під час напайки не відбувається фазових змін, що могли б порушити структуру армуючих частинок, тож частки реліту повинні бути рівномірно розподілені та добре з'єднані з основним металом через припій.

У випадку дефектної напайки структура порушена: зерна реліту розміщені нерівномірно, оточені надлишком припою з дрібнозернистою β -структурою. Частинки реліту майже не протравлюються реактивом Кролля, призначеним для титанових сплавів, через що на них видно лише сліди корозії. У деяких зонах спостерігається недостатнє покриття – наявна ділянка основного металу та газова пора до 1 мм із гладкими стінками.

Причини дефектів різні. Газова пористість пов'язана з недостатньою чистотою компонентів шихти, недотриманням режимів підготовки або якістю аргону. Важливо ретельно знежирювати поверхню та перевіряти якість захисного газу на контрольному зразку. За наявності ознак окиснення газ потрібно замінити. Інший фактор – дефіцит рідкої фази. Якщо об'єм армуючих частинок перевищує кількість припою, утворюється нещільне покриття. Це можливо при неправильному співвідношенні порошоків реліту і припою, або за тривалого зберігання суміші, коли через різницю густини реліт осідає. Для уникнення цього рекомендується використовувати невеликі об'єми пасти, які ретельно перемішуються перед нанесенням.

Якісна напайка відзначається рівномірним розподілом частинок реліту та достатнім вмістом припою. Покриття повністю перекриває поверхню й утворює суцільний, твердий та міцний шар.

					БР 0325.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

Особливо важливим є вертикальний розподіл армуючих частинок у покритті. Через більшу густину карбіду вольфраму порівняно з припоєм він осідає в нижніх шарах під час напайки, що спричиняє неоднорідність. Також частки можуть зміщуватися внаслідок дії електромагнітного перемішування при індукційному нагріванні. Проте на товщині шару до 0,3 мм розподіл частинок, як правило, є близьким до рівномірного.

5.2. Аналіз результатів, отриманих на «Мікрон-гамма»

У межах виконання кваліфікаційної роботи було застосовано метод мікромеханічних випробувань, який ґрунтується на неперервній реєстрації параметрів процесу втиснення індентора у матеріал. Метод дозволяє фіксувати навантаження, глибину занурення індентора та час навантаження, що дає змогу досліджувати властивості приповерхневих шарів з високою просторовою роздільністю. Як об'єкти аналізу були використані зразки, виготовлені з титанового сплаву ВТ3-1, відібрані з різних зон компресорної лопатки. Зокрема, досліджено зразки з бандажної полицки з якісною напайкою реліту, зношеної полицки з дефектом типу «крапля», а також зразки з хвостовика, які не зазнавали істотного зношування.

Актуальність вивчення фізико-механічних властивостей приповерхневих шарів зумовлена тим, що саме ці зони найчастіше зазнають дії контактних навантажень у процесах тертя, втоми, зношування, а також при механічній обробці. Метод випробувань на мікротвердість є одним із найбільш інформативних засобів контролю таких властивостей.

У даній роботі було застосовано прилад «Мікрон-гамма», який забезпечує точне вимірювання глибини відбитку під час навантаження та дозволяє будувати діаграми типу «навантаження – глибина занурення» (P-h). Такий підхід дає змогу проводити випробування за малих навантажень, що є

									Арк.
									48
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР 0325.00.00.000 ПЗ				

критично важливим для дослідження тонких шарів покриттів та зон з локальними структурними змінами.

Метод кінетичної мікротвердості, реалізований на «Мікрон-гамма», дозволяє оцінити не лише традиційні характеристики твердості, але й отримати додаткові параметри, пов'язані з пластичною деформацією, релаксаційною поведінкою матеріалу та пружністю. Зокрема, вимірюється як «невідновлена твердість» (Н_ц) – за глибиною відбитку під навантаженням, так і «відновлена твердість» – за розміром залишкового пластичного відбитку після зняття навантаження. Врахування пружного компонента деформації є суттєвим для точного визначення механічної відповіді приповерхневих шарів.

Результати мікромеханічного аналізу показали, що зразок із якісною напайкою реліту має підвищену твердість порівняно з іншими зонами. Проте, хоча очікувалось значно вище значення твердості через присутність реліту, було виявлено, що механічні властивості підвищуються головним чином завдяки рівномірному розподілу твердих часток реліту в об'ємі припою. Через різницю густини (реліт має у 2,5 раза вищу густину порівняно з припоєм) частки реліту схильні до осідання під час процесу напайки, що призводить до збагачення нижніх шарів покриття та збіднення верхніх.

Виявлене зменшення твердості у верхніх шарах, обумовлене зниженням вмістом реліту, є двозначним явищем. З одного боку, воно знижує ефективність зміцнення, але з іншого – полегшує механічну обробку напаяної поверхні, що може бути технологічно доцільним. Отже, структуру і властивості напаяного шару доцільно розглядати як градієнтні, з урахуванням неоднорідного розподілу зміцнювальних фаз.

						Арк.
						49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР 0325.00.00.000 ПЗ	

ВИСНОВКИ

У результаті мікромеханічного аналізу, проведеного за допомогою індентаційного приладу «Мікрон-гамма», встановлено ефективність використання методу неперервного втиснення індентора для вивчення фізико-механічних властивостей приповерхневих шарів матеріалів. Метод дозволив не лише кількісно оцінити мікротвердість матеріалу, а й виявити особливості структурної неоднорідності напаяних шарів, зокрема вміст і розподіл твердих включень реліту у припої.

Зразки, вирізані з ділянок лопатки компресора із напаяним покриттям, продемонстрували підвищені значення твердості порівняно із зразками, не підданими зношуванню, що свідчить про ефективність реліту як зміцнювальної фази. Разом з тим встановлено, що нерівномірний розподіл реліту, спричинений його високою густиною та осіданням у процесі напайки, призводить до формування градієнтної структури покриття – збагачення твердими частками у нижніх шарах і збіднення у верхніх. Така особливість формування мікроструктури безпосередньо впливає на функціональні властивості поверхні.

Хоча зменшення твердості у верхніх шарах може обмежувати захисну здатність покриття в умовах інтенсивного тертя, воно водночас полегшує механічну обробку деталі після напайки. Отже, результати свідчать про необхідність контролю складу напаяної пасти, режимів напайки та товщини покриття для досягнення бажаного балансу між зносостійкістю та оброблюваністю. Отримані дані можуть бути використані для оптимізації технології зміцнення компресорних лопаток шляхом локальної напайки зносостійких матеріалів.

При виконанні ремонтних робіт варто було б врахувати наступні рекомендації.

						Арк.
						50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР 0325.00.00.000 ПЗ	

Оптимізувати склад напаяної пасти, що дозволить зменшити вміст припою у складі пасти або модифікувати його склад з метою зниження ефекту осідання часток реліту. Це сприятиме рівномірному розподілу твердих часток по товщині напаяного шару та збереженню високої твердості у приповерхневій зоні.

Контролювати товщину напаяваного шару, так як обмеження товщини покриття дозволяє уникнути надмірного збіднення верхніх шарів релітом і забезпечує баланс між зносостійкістю та технологічністю обробки.

Застосовувати контроль якості після напайки. А саме, використання мікромеханічного аналізу (наприклад, прилад «Мікрон-гамма») дозволяє оцінити розподіл твердості по глибині шару і своєчасно виявити зони знижених механічних властивостей.

Регулювати режими напайки (температура, час, швидкість нагріву) – це дасть змогу впливати на кінетику осідання реліту та покращити однорідність структури напаяного шару.

Оскільки верхній шар є м'якшим, варто орієнтувати параметри шліфування та полірування з урахуванням зміни твердості по товщині шару для запобігання надмірному зняттю матеріалу або пошкодженню основи.

					БР 0325.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. High-Temperature High-Strength Nickel-Base Alloys. A Practical Guide to the Use of Nickel-containing Alloys. №393. – Nickel Institute, Published 2020.
2. <https://www.carpentertechnology.com/blog/titanium-alloys-aerospace>.
3. Pierre Fenetaud, Sylvain Jacques. SiC/SiC ceramic matrix composites with BN interphase produced by gas phase routes: An overview Open Ceramics, Volume 15, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.oceram.2023.100396>.
4. Hassan, Mohamed & Sindi, Waheeb & Mohamed, Ahmed & Backar, Ahmed. (2024). Failure analysis of gas turbine in first stage turbine blades in an urban power plant. Journal of Engineering and Thermal Sciences.
5. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/aero-engine-blade>.
6. <https://www.scribd.com/document/816227236/11-2-3-2-Turbine-Damage-Aeroengine-Safety>.
7. Vakada, Nagabhushana Rao & Kumar, I. & Katuru, Bala & Madhulata, N & Gurajarapu, Naresh. (2014). Failure mechanisms in turbine blades of a gas turbine Engine -an overview. 10. 48-57.
8. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/aeroengine>.
9. Nicolaus, M.; Rottwinkel, B.; Alfred, I.; Möhwald, K.; Nölke, C.; Kaierle, S.; Maier, H.J.; Wesling, V. Future regeneration processes for high-pressure turbine blades. CEAS Aeronaut. J. 2018, 9, 85–92.
10. Nicolaus, M.; Möhwald, K.; Maier, H.J. Thermally Sprayed Nickel-Based Repair Coatings for High-Pressure Turbine Blades: Controlling Void Formation during a Combined Brazing and Aluminizing Process. Coatings 2021, 11, 725. <https://doi.org/10.3390/coatings11060725>.
11. Mauer Georg, Vaßen, Robert. Coatings with Columnar Microstructures for Thermal Barrier Applications/- Advanced Engineering Materials. Adv. Eng. Mater. VL – 22. 2022. <https://doi.org/10.1002/adem.201900988>.

						Арк.
						52
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР 0325.00.00.000 ПЗ	

12. <https://aeroplanetech.com/turbine-blade-repair/>.
13. Ułanowicz, L.; Dudziński, A. Heat-Resistant Protective Coatings Applied to Aircraft Turbine Blades by Supersonic Thermal Spraying and Diffusion-Aluminizing. *Coatings* 2024, 14, 1554. <https://doi.org/10.3390/coatings14121554>.
14. https://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_spraying.
15. https://en.wikipedia.org/wiki/Cold_spraying.
16. https://en.wikipedia.org/wiki/Detonation_spraying.
17. https://en.wikipedia.org/wiki/Electrostatic_spray-assisted_vapour_deposition.
18. https://en.wikipedia.org/wiki/Shot_peening.
19. Nicolaus, M., Möhwald, K., Maier, H.J. (2025). Near Net Shape Turbine Blade Repair Using a Joining and Coating Hybrid Process. In: Seume, J.R., Denkena, B., Gilge, P. (eds) *Regeneration of Complex Capital Goods*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-51395-4_7.
20. Pauzi, A.A.; Ghazali, M.J.; W. Zamri, W.F.H.; Rajabi, A. Wear Characteristics of Superalloy and Hardface Coatings in Gas Turbine Applications—A Review. *Metals* 2020, 10, 1171. <https://doi.org/10.3390/met10091171>.
21. He, X., Liu, R., Chen, G., Liu, Z. (2022). Microstructure and properties of Ni-based coatings on titanium alloy using laser cladding. *Surface and Coatings Technology*, 433, 128158. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.128158>.
22. Wang, J., Zhou, H., Zhang, H., et al. (2021). Surface modification of titanium alloys for aerospace applications: A review. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 5911–5931.
23. Wang, X., Guo, L., Zhang, W. (2022). Microstructure and properties of Ti-based composite coatings reinforced with WC particles by laser cladding. *Surface and Coatings Technology*, 437, 128360.
24. Qin, R., Li, Y., Yan, Z. et al. (2023). Advanced repair techniques for titanium alloy components in aero-engines: trends and perspectives. *Journal of Manufacturing Processes*, 88, 106–120.

						Арк.
						53
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР 0325.00.00.000 ПЗ	

25. ASTM E3-11. Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. ASTM International, 2020.
26. Goldstein, J. I., Newbury, D. E., Joy, D. C., et al. Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis. Springer, 4th ed., 2018.
27. Smith, W. F., Hashemi, J. Foundations of Materials Science and Engineering. McGraw-Hill, 6th ed., 2021.
28. ISO 14577-1:2015. Instrumented indentation test for hardness and materials parameters – Part 1: Test method.
29. Fischer-Cripps, A.C. (2011). Nanoindentation (3rd ed.). Springer.
30. Oliver, W.C., & Pharr, G.M. (2004). Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology. Journal of Materials Research, 19(1), 3–20. <https://doi.org/10.1557/jmr.2004.19.1.3>.
31. Yousaf, A., et al. (2021). Mechanical performance of functionally graded TiN coatings: An in-depth nanoindentation study. Surface and Coatings Technology, 426, 127762.

					БП 0325.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54