

Міністерство освіти і науки України
Луцький національний технічний університет
Факультет митної справи, матеріалів, технологій та гостинності

Кафедра матеріалознавства

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «БАКАЛАВР»

**Удосконалення технології зміцнення
бандажних лопаток жароміцних сплавів
методом поверхневої обробки /
Improvement of the technology for
strengthening heat-resistant alloy bandage
blades by surface treatment**

132 Матеріалознавство

(шифр і назва спеціальності)

освітня програма Індустріальний інжиніринг і менеджмент

(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ПМ(ПМ)-41
Януль Іван Андрійович

(підпис)

Керівник:
д.т.н., професор
Єфременко Василь Георгійович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
«__» _____ 2026 р.
Гарант освітньої програми:
к.т.н., доцент
Гусачук Дмитро Анатолійович

(підпис)

Луцьк – 2026 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет митної справи, матеріалів, технологій та гостинності

Кафедра матеріалознавства

Ступінь вищої освіти: бакалавр

Галузь знань: 13 Механічна інженерія

Спеціальність: 132 Матеріалознавство

Освітня програма: Індустріальний інжиніринг і менеджмент

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Імбирович Н.Ю.

“03” січня 2026 року

З А В Д А Н Н Я НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Януль Івану Андрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи *Удосконалення технології зміцнення бандажних лопаток жароміцних сплавів методом поверхневої обробки / Improvement of the Technology for Strengthening Heat-Resistant Alloy Blade Bands Using Surface Tre*
керівник роботи *Єфременко Василь Георгійович, д.т.н., професор*,

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від 05.06.25 року № 540/01-02

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи «23» травня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи *Хімічний склад та механічні властивості жароміцних сталей та сплавів; типова технологія вакуумно-дугового нанесення покриттів; умови роботи бандажних лопаток; методичні вказівки.*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) *вступ; розділ 1 Огляд технічної літератури; розділ 2 Технологічна частина; розділ 3 Характеристика матеріалу лопатки; розділ 4 Аналіз структури та мікротвердості; Висновки; Список використаних джерел; Додатки*

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

1. Титульна сторінка - 1 л. ф. А4, 2. Актуальність теми - 2 л. ф. А4,

3. Вибір припою - 1 л. ф. А4,

4. Послідовність технологічних процесів напайки - 1 л. ф. А4,

5. Мікроструктура IN738LC - 1 л. ф. А4,

6. Мікроструктура перехідної ділянки та припою - 1 л. ф. А4,

7. Мікротвердість ділянок напайки - 1 л. ф. А4,

8. Висновки - 1 л. ф. А4.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Н. контоль</i>	<i>Мисковець С.В., доцент</i>	<i>03.01.26</i>	<i>23.05.26</i>

7. Дата видачі завдання «03» січня 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
<i>1</i>	<i>Вступ, розділ 1 Огляд технічної літератури.</i>	<i>05.05.26</i>	
<i>2</i>	<i>Розділ 2 Технологічна частина.</i>	<i>12.05.26</i>	
	<i>Розділ 3 Характеристика матеріалу лопатки.</i>		
<i>3</i>	<i>розділ 4 Аналіз структури та мікротвердості.</i>	<i>19.05.26</i>	
	<i>Висновки. Додатки.</i>		
	<i>Графічна частина</i>		

Здобувач вищої освіти Януль І.А.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи Єфременко В.Г.
(підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Януль І. А. Назва теми: «Удосконалення технології зміцнення бандажних лопаток жароміцних сплавів методом поверхневої обробки»

Кваліфікаційна робота бакалавра ОП «Матеріалознавство» спеціальності 132 Матеріалознавство. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2026.

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

У кваліфікаційній роботі удосконалено технологічний процес напайки твердосплавного матеріалу на поверхню бандажної полиці для забезпечення експлуатаційних властивостей лопаток шляхом заміни матеріалу припою та твердосплавного матеріалу.

Основні рішення, прийняті в роботі направлені на забезпечення комплексу необхідних властивостей та розробку технологічного процесу, дослідження структури матеріалу напаяної ділянки.

Загальний обсяг роботи: 50 сторінок, 4 розділи та висновки, 10 рисунків, 6 таблиць, 27 літературних джерела.

Ключові слова: бандажна полиця, твердосплавна напайка, припій, технологічний процес, вакуумно-дугова напайка.

					БР 2826.00.00.000 ПЗ				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Удосконалення технології зміцнення бандажних лопаток жароміцних сплавів методом поверхневої обробки / Improvements in the technology for strengthening heat-resistant alloy bandage blades by surface treatment	Літ.	Арк.	Акрушів	
Розробив	Януль								
Перевірив	Єфременко						3	50	
						ЛНТУ, каф.матеріалознавства, гр. ПМ(ПМ)-41			
Н. Контр	Мисковець								
Затв.	Імбірович								

ABSTRACTS

Yanul I. A. Thesis Title: “Improvement of the Technology for Strengthening Heat-Resistant Alloy Blade Bands Using Surface Treatment”

Bachelor’s thesis in the educational program “Industrial Engineering and Management,” specialty 132 Materials Science. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2026.

The bachelor’s thesis consists of an introduction, four chapters, conclusions, a bibliography, and appendices.

In this thesis, the technological process of brazing carbide material onto the surface of a blade blade is improved to ensure the operational properties of the blades by replacing the brazing material and the carbide material.

The main solutions adopted in the thesis are aimed at ensuring a set of necessary properties and developing a technological process, as well as investigating the structure of the material in the brazed area.

Total volume of the thesis: 50 pages, 4 chapters and conclusions, 10 figures, 6 tables, 27 references.

Keywords: bandage shelf, carbide brazing, brazing alloy, manufacturing process, vacuum arc brazing.

					БП 2826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	8
1.1. Конструкція, призначення та застосування бандажних лопаток	8
1.2. Умови експлуатації та механізми руйнування лопаток	11
1.3. Жароміцні сплави для виготовлення бандажних лопаток	13
1.4. Методи поверхневого зміцнення жароміцних сплавів	15
1.5. Твердосплавні матеріали та їх властивості	17
1.6. Висновки та постановка завдань	19
РОЗДІЛ 2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	21
2.1. Вакуумно-дугова напайка	21
2.2. Розробка технологічного процесу твердосплавної напайки бандажних лопаток	23
2.3. Вибір припою	27
2.4. Вибір основного твердосплавного матеріалу	29
2.5. Устаткування для напайки	32
РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ МАТЕРІАЛУ ЛОПАТКИ	35
3.1. Характеристика об'єкта дослідження	35
3.2. Аналіз структури IN738LC	37
РОЗДІЛ 4 АНАЛІЗ СТРУКТУРИ ТА МІКРОТВЕРДОСТІ НАПАЯНОГО ШАРУ	39
4.1. Аналіз мікроструктури	39
4.2. Аналіз мікротвердості напаяного шару та контроль якості	42
ВИСНОВКИ	45
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	47
ДОДАТКИ	

ВСТУП

У сучасних газотурбінних двигунах широкого застосування набули бандажовані робочі лопатки турбін, використання яких дозволяє суттєво знизити рівень змінних напружень, що виникають під дією вібраційних навантажень. Наявність бандажних полиць сприяє підвищенню жорсткості лопаткового апарата, зменшенню коливань та забезпечує збільшення ресурсу роботи й надійності газотурбінних двигунів у цілому. Лопатки турбіни належать до найбільш відповідальних елементів конструкції ГТД та характеризуються складною геометрією зовнішнього профілю і внутрішніх порожнин системи охолодження.

У процесі експлуатації лопатки працюють в умовах одночасної дії значних статичних, динамічних та циклічних навантажень. До основних факторів навантаження належать відцентрові сили, термомеханічні напруження, вібраційні впливи та знакозмінні навантаження, які виникають у процесі роботи двигуна. Особливо несприятливими є режими запуску та зупинки двигуна, під час яких спостерігаються форсовані переходи до робочих температур і швидкостей обертання.

Додатково слід враховувати, що елементи гарячого тракту газотурбінних двигунів експлуатуються при високих температурах у середовищі продуктів згоряння палива та мастильних матеріалів. Такі середовища містять активні компоненти, зокрема водень, сірку, хлор, натрій та інші хімічно агресивні сполуки, які негативно впливають на стан поверхневих шарів матеріалу. У результаті цього відбувається розвиток високотемпературної газової корозії, структурної деградації матеріалу, водневої крихкості та накопичення пошкоджень, пов'язаних із вакансійними та дислокаційними механізмами.

Тривала робота лопаток у високотемпературних газових потоках, температура яких може перевищувати 1000 °С, призводить до обмеження довготривалої міцності матеріалу та поступового розвитку мікропошкоджень.

					БР 2826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Підвищення робочих температур та збільшення ресурсу сучасних авіаційних двигунів сприяє інтенсифікації процесів зношування і руйнування контактних поверхонь бандажних поличок. Утворення зазорів у зоні контакту призводить до зміни газодинамічних параметрів ступенів турбіни, погіршення технічних характеристик двигуна та зниження його експлуатаційної надійності.

Для забезпечення необхідного ресурсу роботи лопатки виготовляють із складнолегованих жароміцних нікелевих сплавів, здатних зберігати механічні властивості при тривалому високотемпературному навантаженні. При виборі матеріалу враховують температурний інтервал експлуатації, характер розподілу напружень, умови роботи поверхневих шарів, тривалість експлуатації вузлів та вплив факторів, що знижують конструкційну міцність і довговічність деталей.

Для забезпечення працездатності та відновлення експлуатаційних характеристик бандажних лопаток необхідним є раціональний вибір технології ремонту, матеріалів для відновлення та способів формування зносостійких контактних поверхонь, здатних ефективно працювати в умовах високотемпературного контактного навантаження та фретинг-зношування.

					БР 2826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Конструкція, призначення та застосування бандажних лопаток

Бандажні лопатки є відповідальними елементами лопаткових апаратів турбомашин, у яких на периферійній частині пера передбачено спеціальний конструктивний елемент – бандаж. Бандаж виконує не лише геометричну або ущільнювальну функцію, а й бере участь у формуванні динамічної поведінки лопаткового вінця, оскільки контакт між сусідніми бандажами створює додаткове тертя, яке знижує амплітуди коливань лопаток. У сучасній літературі бандажні розглядаються як один із типових способів фрикційного демпфування в турбомашинах, особливо для робочих лопаток, схильних до високочастотної втоми [1].

Конструктивно бандажна лопатка складається з хвостовика, замкової частини, пера, полиці та верхнього бандажа. Хвостовик забезпечує кріплення лопатки в диску, перо сприймає газодинамічне навантаження, а бандаж формує контактну взаємодію між сусідніми лопатками. Саме контактні поверхні бандажа є найбільш вразливими до фретинг-зносу, локального пластичного деформування, окиснення та зародження мікротріщин за умов циклічного навантаження (рисунок 1.1). Для таких зон доцільним є локальне поверхневе зміцнення, зокрема твердосплавною напайкою, оскільки зношування концентрується не по всій лопатці, а переважно на контактних ділянках бандажа.

За сферою застосування бандажні лопатки можна поділити на кілька основних груп (таблиця 1).

					БР 2826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.1 – Застосування бандажних лопаток

Сфера застосування	Тип лопаток	Основні умови роботи	Характерні проблеми
Авіаційні газотурбінні двигуни	Робочі лопатки турбін і компресорів	Висока температура, великі відцентрові сили, вібрації	Високочастотна втома, фретинг, окиснення
Енергетичні газові турбіни	Лопатки турбін середніх і останніх ступенів	Тривала робота за сталих і змінних режимів	Знос бандажа, термічна втома, повзучість
Парові турбіни	Довгі робочі лопатки низького тиску	Вологопарове середовище, циклічні навантаження	Корозійна втома, ерозія, контактний знос
Компресори	Лопатки з проміжними або кінцевими бандажами	Вібрації, контакт сусідніх лопаток, нижчі температури	Фретинг-знос, розхищення контактів
Наземні газотурбінні установки	Робочі лопатки енергетичних і приводних турбін	Довготривала експлуатація, пуски-зупинки	Зношування, ремонтпридатність, деградація покриттів

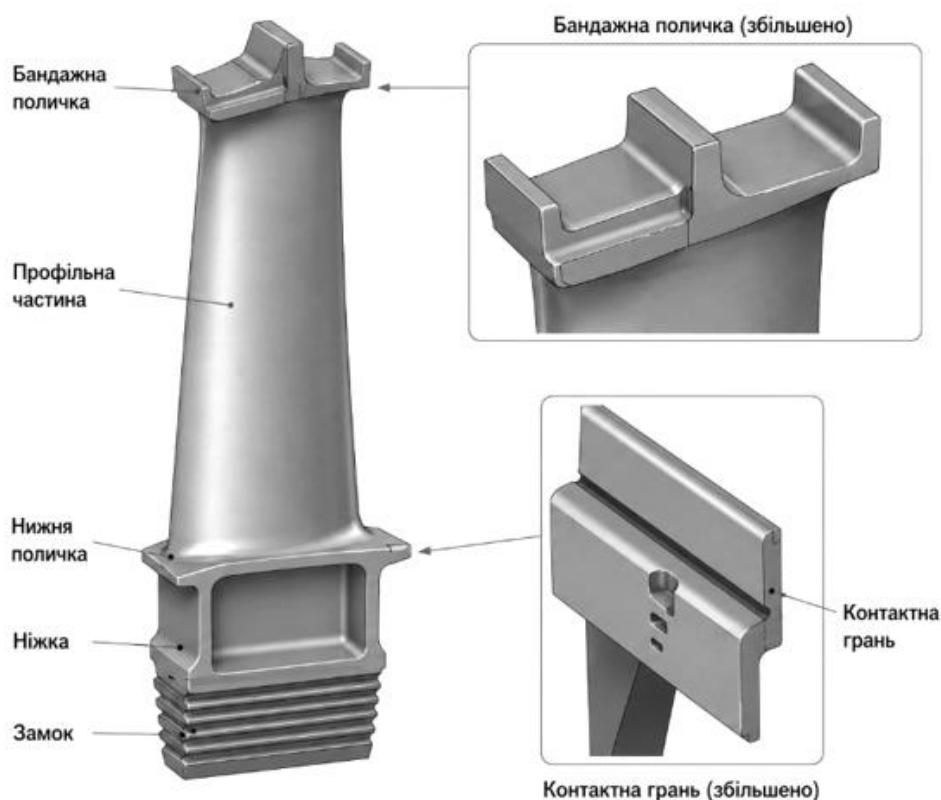


Рисунок 1.1 – Ескіз бандажної лопатки

У газотурбінних двигунах бандажне з'єднання підвищує жорсткість лопаткового вінця та зменшує рівень коливань за рахунок контакту суміжних

лопаток. Контактні сили в зоні бандажа мають складний тривимірний характер і суттєво впливають на вимушені коливання лопаток. Це означає, що бандаж не можна розглядати лише як геометричне завершення пера: він є функціональним елементом, який визначає міцність, ресурс і вібраційну надійність лопатки [2]. У парових турбінах бандажування особливо важливе для довгих робочих лопаток, які мають підвищену схильність до коливань. Взаємне зачеплення або контакт бандажів знижує резонансні амплітуди, але водночас створює локальну зону інтенсивного тертя і фретинг-зносу. Таким чином, конструктивне рішення, яке зменшує вібрації, одночасно формує нову критичну ділянку – контактну поверхню бандажа [3, 4].

Основні конструктивні елементи (рисунки 1.1) бандажної лопатки це:

- перо лопатки – аеродинамічний профіль, який перетворює енергію потоку газу або пари в механічну роботу.
- бандаж – периферійна частина лопатки, що контактує з бандажами сусідніх лопаток і формує замкнений або напівзамкнений лопатковий вінець.
- контактні – поверхні бандажа – ділянки, де виникають тертя, мікропереміщення та фретинг-знос. Саме вони є найбільш перспективними зонами для твердосплавного зміцнення.
- замкова частина/хвостовик – елемент кріплення лопатки в диску, який сприймає значні відцентрові та циклічні навантаження.
- полиці та ущільнювальні елементи – зменшують перетікання робочого середовища та підвищують ККД ступеня.

Типові режими навантаження бандажних лопаток подано у таблиці 1.2.

					БР 2826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.2 – Приклади навантажень у бандажних лопатках

Вид навантаження	Джерело виникнення	Наслідки для бандажа
Термічне	Висока температура газового або парового потоку	Окиснення, термічна втома, зміна властивостей поверхні
Циклічне	Пуски-зупинки, змінні режими роботи, вібрації	Втомне пошкодження, зародження тріщин
Контактне	Взаємодія сусідніх бандажів	Фретинг-знос, локальне наклепування, пошкодження напайки
Відцентрове	Обертання ротора	Розтягувальні напруження у пері та хвостовику
Газодинамічне	Дія потоку газу або пари	Згинальні напруження, коливання пера

1.2. Умови експлуатації та механізми руйнування бандажних лопаток

Бандажні лопатки функціонують у складному поєднанні термічних, механічних і контактних навантажень, що визначає специфіку їхньої експлуатаційної надійності. Особливістю цих елементів є контактна взаємодія між сусідніми бандажними поличками, яка, з одного боку, забезпечує поглинання коливань, а з іншого – створює локальні зони інтенсивного зношування і накопичення пошкоджень.

Температурні умови роботи бандажних лопаток визначаються типом установки і режимом експлуатації. У газотурбінних двигунах температура в зоні турбіни може досягати 900...1100 °С, тоді як у компресорних ступенях вона є значно нижчою. В енергетичних турбінах спостерігається тривалий вплив підвищених температур при змінних навантаженнях. За таких умов активізуються дифузійні процеси, відбувається зміна фазового стану жароміцних сплавів, знижується їхня міцність і опір пластичній деформації. Висока температура впливає на трибологічну поведінку контактних

поверхонь, змінюючи коефіцієнт тертя, механізми зносу та кінетику окислення [5, 6].

Причиною руйнування є газова корозія та окислення, які розвиваються внаслідок взаємодії матеріалу з компонентами робочого середовища. Утворення оксидних плівок на основі Cr_2O_3 або Al_2O_3 може виконувати захисну функцію, однак при циклічному нагріванні та механічному впливі ці плівки руйнуються, активуючи поверхню матеріалу. Відбувається повторне окислення, що супроводжується поступовою втратою матеріалу. Зміна оксидних шарів істотно впливає на трибологічні характеристики жароміцних сплавів і може як знижувати, так і підсилювати інтенсивність зносу залежно від умов контакту [6].

Ерозійний вплив твердих частинок, присутніх у потоці робочого середовища призводить до механічного руйнування поверхневого шару, порушення цілісності оксидних плівок і формування мікронерівностей, які надалі виступають концентраторами напружень. У поєднанні з високими температурами це створює передумови для прискореного розвитку інших механізмів руйнування.

Одним із визначальних механізмів деградації бандажних лопаток є фретинг-знос, що виникає в зоні контакту бандажів сусідніх лопаток. Цей процес обумовлений мікропереміщеннями контактуючих поверхонь під дією вібрацій і змінних навантажень. Фретинг характеризується складною взаємодією механічного зношування, окиснення та втомних процесів. У зоні контакту формуються дрібнодисперсні оксидні продукти зносу, які можуть виконувати роль абразивного середовища. При високих температурах фретинг супроводжується інтенсивним окисленням і формуванням нестабільних оксидних шарів, які сприяють ініціації тріщин [6]. Термомеханічна втома є ще одним ключовим фактором, що визначає ресурс бандажних лопаток. Вона виникає внаслідок циклічних змін температури та навантаження під час експлуатації, особливо при пусках і зупинках. Нерівномірний розподіл

					БР 2826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

температури призводить до появи локальних термічних напружень, які разом із механічними навантаженнями викликають накопичення пластичних деформацій. На поверхні матеріалу формуються мікротріщини, які поширюються вглиб, спричиняють руйнування (рисунок 1.2).

Поєднання термомеханічної втоми з фретингом істотно прискорює процеси деградації, формуючи так звану фретинг-втомну взаємодію [7]. Адгезійний знос виникає внаслідок локального схоплювання контактних поверхонь, тоді як абразивний знос обумовлений дією твердих частинок або продуктів зносу [8].



а



б

Рисунок 1.2 – Фрагменти лопаток під дією руйнування

Окиснювальний знос формується за рахунок циклічного утворення і руйнування оксидних плівок, а втомне тріщиноутворення розвивається під дією змінних навантажень і концентрацій напружень. Взаємодія цих механізмів призводить до прискореної деградації матеріалу, особливо в локалізованих зонах контакту бандажа.

1.3. Жароміцні сплави для виготовлення бандажних лопаток

У сучасному машинобудуванні матеріали для виготовлення бандажних лопаток підбираються з урахуванням тривалої роботи в умовах високих температур, значних механічних напружень і агресивного середовища. Такі умови експлуатації зумовлюють використання жароміцних сплавів, здатних

					БР 2826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зберігати структурну стабільність і механічні характеристики при температурах, що наближаються до 0,7...0,8 температури плавлення матеріалу. Враховують рівень міцності, опір повзучості, окисленню та втомному руйнуванню.

За хімічним складом і фізико-металургійними особливостями жароміцні сплави, що застосовуються для лопаток, поділяють на нікелеві, кобальтові та залізонікелеві. У практиці виготовлення турбінних лопаток переважають нікелеві сплави, що пояснюється їхньою здатністю поєднувати високу жароміцність із достатньою пластичністю. Кобальтові сплави характеризуються підвищеною стійкістю до високотемпературної корозії, однак використовуються рідше через нижчу міцність. Залізонікелеві системи, як правило, застосовуються у вузлах із менш жорсткими температурними режимами [9, 10].

Визначальним фактором, який формує експлуатаційні властивості нікелевих жароміцних сплавів, є їхня двофазна структура, що складається з γ -твердого розчину та дисперсних виділень γ' -фази. γ -фаза являє собою твердий розчин легувальних елементів у нікелі, тоді як γ' -фаза має інтерметалідну природу і характеризується впорядкованою кристалічною ґраткою. Саме наявність і стабільність γ' -фази забезпечує високий опір повзучості та здатність матеріалу працювати при підвищених температурах без істотної втрати міцності. Об'ємна частка, розмір, форма та рівномірність розподілу фази в матриці має велике значення [10, 11].

Мікроструктурні особливості жароміцних сплавів безпосередньо залежать від системи легування. Елементи, такі як алюміній і титан, сприяють утворенню γ' -фази та визначають її кількість. Хром забезпечує формування захисних оксидних плівок і підвищує жаростійкість. Вольфрам, молібден і реній виконують функцію твердорозчинного зміцнення, уповільнюючи дифузійні процеси і тим самим підвищуючи опір повзучості. Надлишковий вміст тугоплавких елементів може призводити до утворення

					БР 2826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

щільноупакованих фаз, які негативно впливають на довговічність матеріалу [11].

В умовах тривалої експлуатації при високих температурах структура сплаву зазнає еволюції. Одним із типових процесів є коагуляція γ' -фази або її спрямоване укрупнення, що змінює механічні властивості матеріалу. Утворення вторинних фаз знижують пластичність і можуть виступати джерелами ініціації тріщин, а при високій початковій стабільності структура жароміцного сплаву не є статичною і змінюється в процесі роботи [10].

Жароміцні матеріали не демонструють достатньої зносостійкості в умовах інтенсивного контактного навантаження [5]. Локальний перегрів у зоні контакту пов'язаний з виділенням тепла внаслідок тертя. Інтенсифікуються дифузійні процеси у поверхневому шарі, прискорюється окиснення, викликаються локальні структурні перетворення і формується неоднорідний стан матеріалу, який характеризується підвищеною схильністю до зародження тріщин.

Підвищення ресурсу лопаток доцільно здійснювати шляхом локального зміцнення поверхні, що дозволяє поєднати високу жароміцність основного матеріалу з підвищеною зносостійкістю контактних ділянок.

1.4. Методи поверхневого зміцнення жароміцних сплавів

Підвищення ресурсу бандажних лопаток у сучасному виробництві визначається ефективністю методів поверхневого зміцнення, так як поверхневий шар сприймає найбільш інтенсивний вплив контактних, термічних і корозійних факторів. На відміну від об'ємного зміцнення, поверхневе дозволяє цілеспрямовано змінювати властивості локальних зон без суттєвого впливу на базові характеристики матеріалу лопатки. Такий підхід є особливо актуальним для бандажних полицок, де зношування має виражений

					БР 2826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

локальний характер. Сучасні методи поверхневого зміцнення жароміцних сплавів поділяють умовно на дифузійні, наплавні, конденсаційні та механічні. Кожен із них має свої технологічні особливості, рівень ефективності та обмеження щодо застосування у складних умовах експлуатації бандажних лопаток.

Дифузійні методи, зокрема азотування, алітування та хромування, базуються на насиченні поверхневого шару активними елементами, що формують зміцнений дифузійний шар. Для жароміцних сплавів ці методи забезпечують підвищення твердості та жаростійкості, їх ефективність обмежується температурними режимами обробки та складністю контролю фазового складу. Крім того, у випадку нікелевих сплавів формування стабільних нітридних або інтерметалідних шарів є ускладненим, що знижує практичну доцільність застосування таких технологій для бандажних полицок лопаток [2, 3].

Наплавні методи, включаючи лазерне та плазмове наплавлення, формують зносостійкі покриття з контрольованим складом і структурою. Вони забезпечують високу адгезію покриття до основи та можливість локального зміцнення. Значний тепловий вплив може призводити до формування залишкових напружень, зміни мікроструктури основного матеріалу та виникнення дефектів у перехідній зоні. Для тонких і складнопрофільних елементів, таких як бандажі, це є значним обмеженням [3].

Методи фізичного та хімічного осадження з газової фази застосовуються для формування тонких функціональних покриттів із високою твердістю та термостійкістю. Такі покриття характеризуються високою чистотою та контрольованою товщиною, вони забезпечують товщину (зазвичай до декількох десятків мікрометрів) і не забезпечують достатньої зносостійкості в умовах інтенсивного фретинг-контакту, де спостерігаються значні локальні напруження [4, 12].

					БР 2826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						16
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Механічні методи поверхневого зміцнення, такі як дробоструминна обробка або ультразвукове наклепування, спрямовані на формування залишкових стискальних напружень у поверхневому шарі. Це дозволяє підвищити опір втомному руйнуванню, але не забезпечує зносостійкості [12].

Технологія твердосплавної напайки поєднує переваги локального зміцнення та формування товстого зносостійкого шару. Суть методу полягає у закріпленні твердосплавного матеріалу (зазвичай на основі WC-Co або подібних систем) на поверхні жароміцного сплаву за допомогою припою. У результаті формується багатошарова система, що включає основний матеріал, перехідну зону та твердосплавний шар із високою твердістю. Перевагою є можливість отримання шару з високою зносостійкістю при відносно короткому тепловому впливі на основу. Це дозволяє уникнути значної деградації мікроструктури жароміцного сплаву. Технологія придатна для локального застосування. Потрібно враховувати різницю коефіцієнтів термічного розширення між твердим сплавом і основою, а також з можливість утворення крихких фаз у перехідній зоні [13]. Вибір технології визначається конкретними умовами експлуатації. Для бандажних лопаток ключовим є висока зносостійкість, здатність працювати в умовах фретинг-контакту та мінімальний вплив на основний матеріал.

1.5. Твердосплавні матеріали та їх властивості

Експлуатаційна надійність бандажних лопаток у значній мірі визначається станом їхніх контактних поверхонь, які працюють в умовах поєднання високих температур, циклічних навантажень і інтенсивної трибологічної взаємодії. Для бандажних зон характерне поєднання адгезійного, абразивного та окиснювального механізмів зносу, що формують складний багатофакторний процес деградації. При цьому вирішальне значення

					БР 2826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

мають не лише твердість матеріалу, а й стабільність мікроструктури, здатність до утворення захисних плівок і опір втомному руйнуванню. Термостійкість зміцненого шару визначається його здатністю зберігати структурну цілісність і фізико-механічні властивості при тривалому впливі підвищених температур. Для бандажних лопаток контактні поверхні можуть зазнавати локального перегріву внаслідок тертя. У таких умовах навіть незначні зміни фазового складу або мікроструктури можуть призводити до різкого зниження зносостійкості.

У високотемпературних умовах визначальну роль відіграє окиснювальний компонент зносу. Формування оксидних плівок може тимчасово знижувати коефіцієнт тертя, однак їх нестабільність призводить до циклічного руйнування і повторного оголення металевої поверхні. У результаті відбувається інтенсифікація зношування та накопичення продуктів зносу, які виконують роль абразивного середовища [13, 14].

Застосування твердосплавних напаяних шарів змінює механізми зносу. Завдяки високій твердості (понад 1500 HV) та наявності карбідних фаз, такі шари ефективно протидіють абразивному зношуванню і зменшують інтенсивність адгезійної взаємодії. Крім того, твердосплавні матеріали характеризуються більшою термічною стабільністю порівняно з основою, що дозволяє зберігати їхні властивості при підвищених температурах. Поведінка таких покриттів визначається не лише їхніми власними характеристиками, але й станом перехідної зони, де можливе утворення крихких фаз або концентрація напружень [15, 16].

Різниця коефіцієнтів термічного розширення може призводити до виникнення залишкових напружень, особливо при циклічному нагріванні та охолодженні. У разі перевищення критичних значень напружень можливе утворення тріщин у зоні з'єднання або відшарування напаяного шару.

Підвищення зносостійкості бандажних лопаток неможливе без урахування термостійкості поверхневого шару та його здатності зберігати

					БР 2826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

властивості в умовах високотемпературного контакту. Твердосплавна напайка дозволяє суттєво покращити характер зношування, зменшуючи інтенсивність руйнування поверхні [17].

1.6. Висновки та постановка завдань

Бандажні лопатки є складними елементами, у яких поєднуються функції сприйняття газодинамічного навантаження та забезпечення динамічної стійкості. Наявність бандажної полицки істотно підвищує жорсткість системи та сприяє зменшенню амплітуд коливань за рахунок контактної взаємодії між сусідніми лопатками. Водночас саме ця контактна взаємодія формує найбільш навантажену зону, де реалізуються складні процеси тертя, мікропереміщення та локального нагріву.

Умови експлуатації бандажних лопаток характеризуються багатофакторним впливом, що включає високі температури, циклічні механічні навантаження, агресивне середовище та контактний знос. У зоні бандажа домінують процеси фретинг-зносу, окиснення та втомного тріщиноутворення, які взаємно підсилюють один одного. Це призводить до локалізованої деградації матеріалу, яка часто визначає ресурс усієї лопатки, незважаючи на достатньо високі характеристики об'ємного матеріалу.

Жароміцні сплави, що застосовуються для виготовлення лопаток, забезпечують необхідний рівень міцності, термостійкості та структурної стабільності при високих температурах. Їхні властивості обумовлені складною багатофазною структурою, зокрема наявністю γ/γ' -структури в нікелевих сплавах. Проте ці матеріали не є оптимальними з точки зору зносостійкості в умовах інтенсивного контактного навантаження. Поверхневий шар жароміцних сплавів є вразливим до фретинг-зносу та окиснювальної деградації, що обмежує довговічність бандажних зон.

					БР 2826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Існуючі технології мають певні обмеження при застосуванні до бандажних лопаток. Технологія твердосплавної напайки виглядає найбільш перспективною, оскільки дозволяє формувати локальний зносостійкий шар із високою твердістю при відносно помірному термічному впливі на основу.

Головною метою у роботі є підвищення зносостійкості контактних поверхонь бандажних лопаток без погіршення їхніх об'ємних механічних властивостей. Вирішення цієї проблеми можливе шляхом розробки та оптимізації технології локального зміцнення, орієнтованої на специфічні умови роботи бандажних зон. Довговічність бандажних лопаток із жароміцних сплавів шляхом можна продовжити удосконалення технології поверхневого зміцнення контактних зон методом твердосплавної напайки.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі дослідження:

- проаналізувати особливості формування структури та властивостей твердосплавних напаяних шарів на жароміцних сплавах;
- дослідити мікроструктуру та фазовий склад зони з'єднання «основа - припій - твердий сплав»;
- оцінити вплив технологічних параметрів напайки на якість з'єднання та рівень залишкових напружень;
- визначити зносостійкість і механізми руйнування зміцнених поверхонь в умовах, наближених до експлуатаційних;
- встановити оптимальні режими твердосплавної напайки для забезпечення максимального ресурсу бандажних лопаток.

					БР 2826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

2.1. Вакуумно-дугова напайка

Одним із перспективних методів локального відновлення бандажних полиць робочих лопаток є високотемпературна вакуумна пайка із використанням джерела нагріву на основі дугового розряду з порожнистим катодом (ДРПК). Дана технологія поєднує переваги локального концентрованого нагріву, вакуумного середовища та керованого теплового циклу, що є особливо важливим при ремонті жароміцних нікелевих суперсплавів.

Принцип дії технології базується на формуванні стабільного дугового розряду між порожнистим термостійким катодом та поверхнею деталі в умовах глибокого вакууму при подачі плазмутворюючого аргону (рисунок 2.1). Як матеріал катода використовуються тугоплавкі метали, зокрема вольфрам або тантал, що забезпечують високу стабільність емісійних характеристик [18...20].

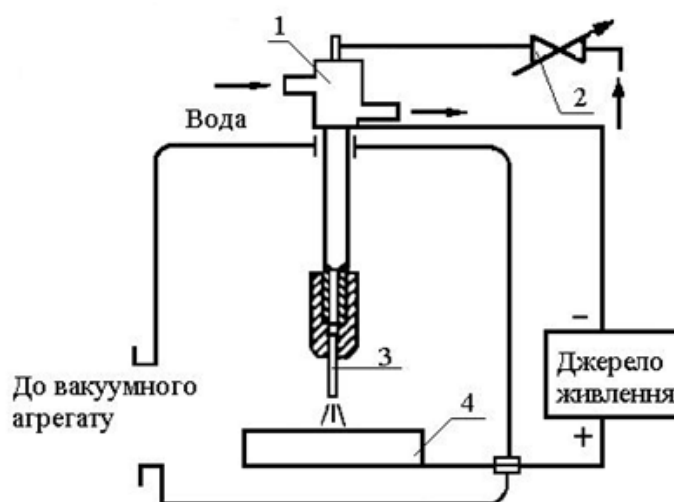


Рисунок 2.1 – Схема процесу напайки
твердосплавного припою

					БР 2826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

До основних технологічних переваг процесу ДРПК належать:

- плавне регулювання швидкості нагріву в широкому діапазоні;
- формування локалізованої зони термічного впливу заданої конфігурації;
- незалежне керування нагрівом основного металу та припою;
- можливість спрямованого розтікання припою;
- мінімізація залишкових термічних напружень;
- зниження ризику структурного перегріву.

Для жароміцних нікелевих сплавів температурний інтервал проведення пайки становить 1170...1220 °С. При перевищенні температури 1220...1240 °С активізується плавлення міждендритної евтектики, що супроводжується деградацією γ/γ' -структури та зниженням жароміцності [19, 22].

Оптимальні режими роботи джерела ДРПК відповідають таким параметрам:

- сила струму – 10...25 А;
- довжина дугового проміжку – 20...35 мм;
- витрата аргону – 1,5...2,5 мг/с;
- діаметр порожнини катода – 3...4 мм;
- залишковий тиск у камері – $(2...7) \times 10^{-2}$ Па.

Особливістю процесу є висока чутливість електрофізичних характеристик дуги до фазових перетворень у зоні пайки. У момент плавлення припою можливе локальне збільшення анодного падіння потенціалу, що може призводити до неконтрольованого перегріву поверхні. Саме тому стабілізація електричних параметрів розряду є ключовою умовою отримання якісного паяного з'єднання.

Застосування спеціалізованих вакуумних установок з ДРПК дозволяє забезпечити продуктивність відновлення до 100...180 робочих лопаток за добу при двозмінному режимі роботи, що робить дану технологію економічно доцільною для серійного ремонту авіаційних двигунів [23...26].

					БР 2826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.2. Розробка технологічного процесу твердосплавної напайки бандажних лопаток

Технологія твердосплавної напайки для зміцнення бандажних лопаток повинна забезпечувати формування зносостійкого шару з високою адгезією до основи при мінімальному впливі на мікроструктуру жароміцного сплаву. Особливістю даного процесу є необхідність локального зміцнення контактних поверхонь бандажа за умов складної геометрії та обмеженої теплової стійкості матеріалу основи.

Розробка технологічного процесу включає вибір послідовності операцій, визначення температурно-часових параметрів, умов нагріву та охолодження, а також способу формування напаяного шару.

2.2.1. Підготовка поверхні бандажної лопатки

Якість з'єднання при напайці визначається станом поверхні основи, тому підготовка є критично важливою операцією. На початковому етапі проводиться механічна обробка контактних поверхонь бандажа з метою видалення зношеного шару, оксидів та дефектів. Рекомендовано використовувати шліфування або легке фрезерування з отриманням шорсткості на рівні R_a в межах 1,6...3,2 мкм, що забезпечує оптимальні умови змочування припою. Після механічної обробки поверхня піддається знежиренню органічними розчинниками або ультразвуковому очищенню. Додатково може застосовуватись активація поверхні шляхом піскоструминної обробки, яка сприяє підвищенню адгезії за рахунок збільшення площі контакту. Важливою вимогою є мінімізація повторного окиснення перед напайкою, що досягається швидким переходом до наступних операцій або використанням захисної атмосфери.

					БР 2826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.2.2. Формування напаявального пакета

На підготовлену поверхню укладається напаявальний пакет, який складається з припою та твердосплавного матеріалу. Твердий сплав, як правило, використовується у вигляді пластин або порошкових композицій на основі WC-Co. Вибір форми залежить від геометрії бандажа та необхідної товщини зміцненого шару.

Припій розміщується між основою та твердосплавним шаром і виконує функцію формування з'єднання за рахунок змочування і дифузії. Для жароміцних сплавів доцільно застосовувати нікелеві припої з температурою плавлення в діапазоні 950...1100 °C, що забезпечує сумісність з основою та достатню термостійкість з'єднання.

Рівномірність розподілу припою є важливою умовою отримання якісного з'єднання, оскільки локальні надлишки можуть призводити до утворення крихких фаз, а недостатня кількість – до неповного змочування поверхні.

2.2.3. Режимы нагріву та напайки

Процес напайки здійснюється у вакуумній або захисній атмосфері (аргон, водень), що запобігає окисненню поверхні та сприяє якісному змочуванню. Найбільш доцільним є використання вакуумних печей, які забезпечують стабільність температурного режиму і чистоту процесу.

Температурний цикл напайки включає кілька етапів:

- повільний нагрів до температури 600...800 °C для видалення залишків вологи та органічних забруднень;
- подальший нагрів до температури плавлення припою (приблизно 1000...1150 °C залежно від складу);
- витримка при температурі напайки протягом 5...15 хв для забезпечення змочування та дифузійної взаємодії;
- контрольоване охолодження для зниження рівня залишкових напружень.

					БР 2826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Контроль швидкості нагріву і охолодження є критичним фактором, оскільки різкі температурні градієнти можуть викликати термічні напруження і сприяти утворенню тріщин у зоні з'єднання.

2.2.4. Формування структури з'єднання

У процесі напайки відбувається формування багат шарової структури, яка включає:

- основний матеріал (жароміцний сплав);
- дифузійну перехідну зону;
- шар припою;
- твердосплавний шар.

Дифузійні процеси між припоєм і основою забезпечують адгезію з'єднання, однак можуть супроводжуватись утворенням інтерметалідних або боридних фаз. Контроль складу припою і режимів напайки дозволяє мінімізувати утворення крихких структур і забезпечити оптимальні механічні властивості.

2.2.5. Охолодження та обробка після напайки

Після завершення витримки проводиться контрольоване охолодження, яке може здійснюватися разом із піччю або у спеціально заданому режимі. Повільне охолодження сприяє зниженню термічних напружень, однак може впливати на фазовий склад припою. У деяких випадках доцільним є проведення додаткової термічної обробки для стабілізації структури.

Після напайки проводиться механічна обробка поверхні з метою досягнення необхідної геометрії та шорсткості. Завершальним етапом є контроль якості, який включає візуальний огляд, металографічний аналіз та оцінку адгезії.

					БР 2826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.2.6. Узагальнена технологічна схема процесу

Технологічний процес відновлення нижніх бандажних полицок лопаток зі сплаву IN738LC методом вакуумно-дугової напайки включає комплекс послідовних операцій, спрямованих на забезпечення високої якості паяного з'єднання та формування зносостійкого твердосплавного шару (рисунок 2.2). На початковому етапі проводиться вхідний контроль і дефектація лопаток з визначенням ступеня зношування контактних поверхонь бандажної полицки. Після цього здійснюється механічна підготовка поверхні шляхом видалення пошкодженого шару, шліфування та очищення від оксидів і забруднень.

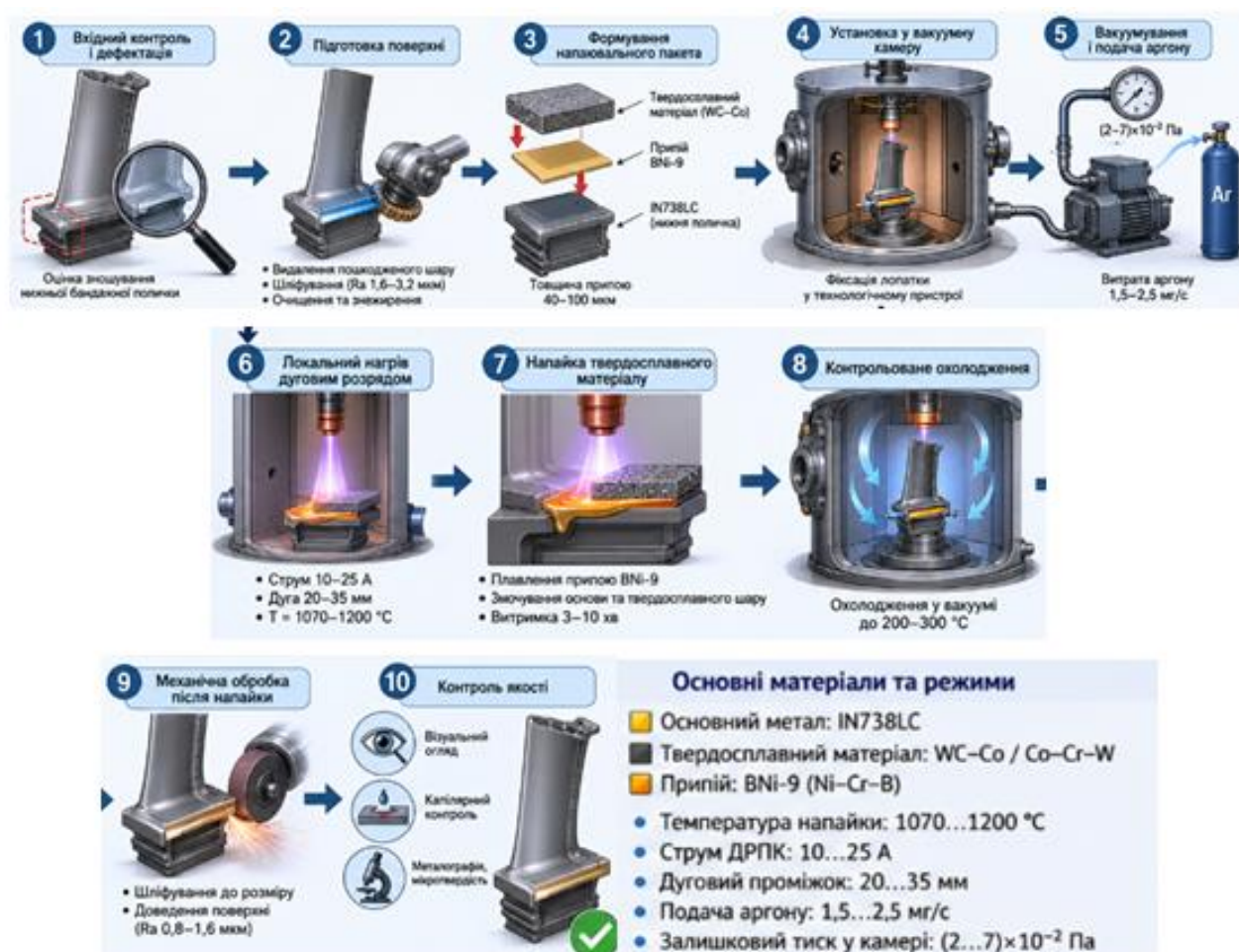


Рисунок 2.2 – схема технологічного процесу напайки

На підготовлену поверхню укладається напаявальний пакет, що складається з нікелевого припою типу BNi-9 та твердосплавного матеріалу на

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР 2826.00.00.000 ПЗ	26

основі WC-Co або Co-Cr-W. Після фіксації лопатки в технологічному пристрої її встановлюють у вакуумно-дугову установку з порожнистим катодом. У камері створюється вакуум, після чого подається плазмоутворювальний аргон і здійснюється локальний нагрів зони нижньої бандажної полицки. У процесі нагрівання припій плавиться та змочує поверхню основного металу і твердосплавного шару, формуючи дифузійно-паяне з'єднання. Після завершення витримки при температурі напайки проводиться контрольоване охолодження у вакуумі або інертному середовищі для мінімізації залишкових термічних напружень.

Завершальними операціями є механічна обробка напаяного шару до необхідних геометричних параметрів, неруйнівний контроль якості, металографічний аналіз структури та вимірювання мікротвердості. У результаті виконання технологічного процесу формується зносостійкий багатошаровий комплекс, який забезпечує підвищення ресурсу та експлуатаційної надійності бандажних лопаток газотурбінних двигунів.

2.3. Вибір припою

Вибір припою для відновлення нижніх бандажних полицок лопаток зі сплаву IN738LC є визначальним етапом технології, оскільки саме припій забезпечує змочування основного металу, формування дифузійної перехідної зони та міцне з'єднання твердосплавного матеріалу з жароміцною нікелевою основою. Для такої задачі припій повинен мати температуру плавлення нижчу за температуру структурної деградації IN738LC, достатню жаростійкість, добру змочуваність нікелевих суперсплавів і мінімальну схильність до утворення крихких боридних та силіцидних фаз [23, 27].

Згідно з технологічними вимогами до вакуумно-дугової напайки, процес має здійснюватися у вакуумі з локальним керованим нагрівом, що дає змогу

					БР 2826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						27
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

обмежити зону термічного впливу та уникнути перегріву γ/γ' -структури основного металу. Для жароміцних нікелевих сплавів температурний інтервал пайки у поданому зразку становить 1170...1220 °С, однак для IN738LC доцільно обирати припій, який забезпечує якісне змочування за нижчої температури, орієнтовно 1060...1150 °С, щоб зменшити ризик локального оплавлення міждендритних ділянок та коагуляції γ' -фази.

З урахуванням умов роботи бандажної полицки найбільш раціональним вибором є припій BNi-9 (таблиця 2.1). Він належить до стандартизованих нікелевих припоїв AWS A5.8/A5.8M і має склад на основі Ni-Cr-B; за довідковими даними його типовий склад включає близько 15 % Cr, 3,5–3,75 % В, решта – Ni. Температурний інтервал його застосування охоплює приблизно 1070...1200 °С, що добре узгоджується з режимами вакуумно-дугової напайки та дає змогу виконати локальне з'єднання без надмірного перегріву основного сплаву IN738LC.

Таблиця 2.1 – Порівняння припоїв

Припій	Температурний інтервал плавлення/ пайки	Переваги	Обмеження
ВПр27	близько 1100...1200 °С	Добре змочує жароміцні нікелеві сплави, традиційно застосовується для ремонту лопаток типу ЖС6У	Можливе утворення боридних евтектик і крихких фаз у шві; матеріал менш сучасний для IN738LC
BNi-2	970...1000 °С	Низька температура плавлення, добра текучість, широке застосування у вакуумній пайці	Підвищений вміст В і Si сприяє утворенню крихких боридів та силіцидів
BNi-5	близько 1080...1135 °С	Відсутність бору знижує ризик боридизації, добра жаростійкість	Гірша текучість порівняно з борвмісними припоями, потребує точного зазору
BNi-9	близько 1060 °С; рекомендована температура пайки 1070...1200 °С	Кремній відсутній або мінімальний; добра сумісність із нікелевими сплавами; придатний для дифузійної пайки; висока жаростійкість	Потребує контролю часу витримки через наявність бору

Перевагою BNi-9 порівняно з BNi-2 є відсутність кремнію як активного депресанта плавлення. Це зменшує ризик формування надлишкових силіцидних фаз у дифузійній зоні, що особливо важливо для жароміцного сплаву IN738LC, структура якого повинна зберігати стабільну γ/γ' -морфологію. Порівняно з ВПр27, припій BNi-9 є більш стандартизованим і сучасним варіантом для вакуумного паяння та ремонту деталей гарячого тракту, зокрема лопаток, соплових апаратів і вузлів газотурбінних двигунів.

Таким чином, для розробленої технології відновлення нижніх бандажних полицок лопаток зі сплаву IN738LC доцільно прийняти припій BNi-9 у вигляді тонкої фольги, пасти або порошкового шару. Оптимальна товщина прошарку припою має становити 40...100 мкм, а технологічний зазор – 0,03...0,10 мм. Такий вибір забезпечує достатнє змочування основного металу та твердосплавного матеріалу, формування дифузійної перехідної зони і зниження ймовірності утворення крихкого надлишкового евтектичного прошарку. Для підвищення якості з'єднання після розплавлення припою доцільно передбачити короткочасну дифузійну витримку при 1050...1120 °С, що сприятиме вирівнюванню складу шва та стабілізації структури.

2.4. Вибір основнотого твердосплавного матеріалу

У процесі експлуатації нижні бандажні полицки працюють у режимі постійного взаємного контакту між сусідніми лопатками, внаслідок чого у зоні контактної грані виникають локальні концентрації напружень, мікропереміщення та інтенсивне поверхневе спрацювання.

Для відновлення контактних поверхонь доцільним є використання твердосплавного матеріалу на основі карбіду вольфраму з кобальтовою зв'язкою типу WC-Co. Даний матеріал характеризується високою твердістю, значною зносостійкістю та стабільністю механічних властивостей при

					БР 2826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підвищених температурах. Крім того, WC-Co добре сумісний із нікелевими припоями та забезпечує формування міцного дифузійно-паяного з'єднання зі сплавом IN738LC.

Основу структури обраного твердосплавного матеріалу становлять зерна карбіду вольфраму WC, рівномірно розподілені у пластичнішій кобальтовій матриці. Саме карбідна фаза забезпечує високу твердість і опір абразивному зношуванню, тоді як кобальтова зв'язка підвищує тріщиностійкість та ударну в'язкість матеріалу [26]. Така структура є особливо ефективною для деталей, які працюють в умовах одночасної дії контактного навантаження, вібрації та термічного циклу.

Використання WC-Co для відновлення бандажних полицок обумовлено також його високими фізико-механічними характеристиками (таблиця 2.3). Типові значення твердості такого матеріалу становлять 1200...1800 HV, що суттєво перевищує твердість основного жароміцного сплаву IN738LC. Це забезпечує значне підвищення опору контактному та фретинг-зношуванню в зоні бандажних контактів.

Таблиця 2.3. – Основні характеристики WC-Co

Характеристика	Значення
Основна фаза	Карбід вольфраму WC
Зв'язка	Co
Твердість	1200...1800 HV
Густина	13,8...14,8 г/см ³
Межа міцності при стиску	3500...6000 МПа
Робоча температура	до 800...950 °C
Зносостійкість	дуже висока
Опір фретинг-зношуванню	високий
Теплопровідність	40...90 Вт/(м·K)

Важливою перевагою матеріалу WC-Co є його стабільність при локальному нагріванні під час вакуумно-дугової напайки. Завдяки високій температурі плавлення карбіду вольфраму та обмежених тривалості термічного циклу вдається уникнути істотного розчинення карбідної фази у припої та зберегти високу твердість напаяного шару.

					БР 2826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Реліт є литою евтектичною композицією на основі карбідів вольфраму, зазвичай системи WCW_2C , отриманою методом лиття. Його основною перевагою є дуже висока твердість та добрий опір абразивному зношуванню. Проте для деталей газотурбінних двигунів, які працюють в умовах циклічних контактних навантажень, вібрації та термічної втоми, реліт має низку критичних недоліків.

Насамперед реліт характеризується високою крихкістю через наявність грубих литих карбідних евтектик. У процесі контактної взаємодії бандажних полицок це може призводити до утворення мікротріщин, локального викришування та відколювання окремих карбідних ділянок. Для контактних поверхонь лопаток турбіни така поведінка є небажаною, оскільки руйнування навіть невеликої ділянки напайки може викликати вторинне пошкодження сусідніх лопаток або елементів гарячого тракту.

На відміну від реліту, твердий сплав $WC-Co$ має композиційну структуру, у якій зерна карбіду WC розташовані у пластичнішій кобальтовій зв'язці. Саме наявність кобальтової матриці забезпечує значно вищу тріщиностійкість та опір ударним і циклічним навантаженням. У результаті напаяний шар краще сприймає вібрації та контактні мікропереміщення між бандажними полицками. Ще однією важливою перевагою $WC-Co$ є краща сумісність із сучасними нікелевими припоями типу $BNi-9$. У процесі вакуумно-дугової напайки кобальтова зв'язка забезпечує ефективніше змочування та формування дифузійної перехідної зони між основним металом $IN738LC$ і твердосплавним шаром. Реліт через свою литу евтектичну структуру та підвищену крихкість є значно чутливішим до термічних напружень під час локального нагріву та охолодження.

					БР 2826.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

2.5. Устаткування для напайки

Схема вакуумної установки для вакуумно-дугової напайки відображає принципову будову технологічного комплексу, призначеного для локального відновлення нижніх бандажних поличок лопаток газотурбінних двигунів. Основним елементом установки є вакуумна камера, у якій розміщується лопатка та формується зона локального нагріву за допомогою дугового розряду з порожнистим катодом (рисунк 2.3). Створення вакуумного середовища забезпечується механічним насосом та паромасляним агрегатом, що дозволяє мінімізувати окиснення жароміцного сплаву IN738LC і припою під час процесу напайки.

Подача аргону здійснюється через окрему систему напуску газу, яка забезпечує стабілізацію дугового розряду та захист зони нагріву. Контроль вакууму в системі виконується за допомогою вакуумметра ВІТ-2, а температурний режим контролюється термодатчиком. Джерело живлення ВД-303 забезпечує формування та стабілізацію вакуумної дуги між порожнистим катодом і поверхнею лопатки.

Особливістю установки є можливість локального концентрованого нагріву лише бандажної полички, що дозволяє обмежити термічний вплив на основний метал лопатки та зберегти стабільність γ/γ' -структури жароміцного сплаву IN738LC. Використання вакуумно-дугової технології забезпечує якісне змочування поверхні нікелевим припоєм BNi-9 та формування міцного дифузійно-паяного з'єднання з твердосплавним матеріалом WC-Co.

Запропонована схема установки характеризується компактністю, керованістю теплового циклу та можливістю реалізації локального ремонту високонавантажених елементів гарячого тракту газотурбінних двигунів.

					БР 2826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						32
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

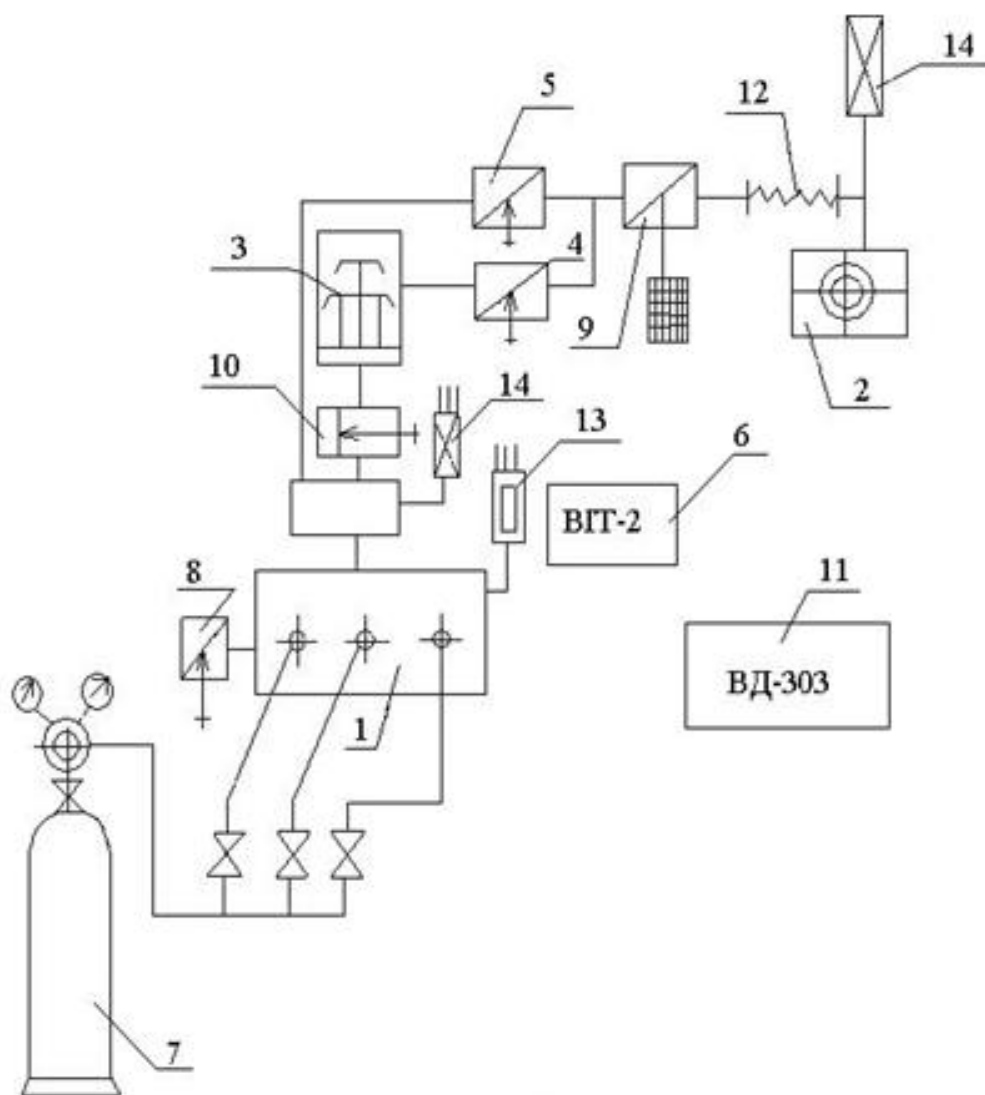


Рисунок 2.3 – Схема вакуумної установки для пайки пустотілим катодом:

1 – камера; 2 – механічний насос НВ3-75; 3 – параомасловий агрегат АВП-5; 4 – вентиль №2; 5– вентиль №3; 6 – вакуумметр ВІТ-2; 7 – балон системи напуску аргону; 8 – вентиль №14 напуску повітря; 9 – зворотній клапан; 10 – затвор №1; 11 – джерело живлення; 12 – сільфон; 13 – іонізуючий перетворювач ІМІ-2; 14 – термопарний перетворювач.

Пайка лопаток дуговим розрядом порожнистим катодом в вакуумі проводиться на установці ПБ-3204 (рисунок 2.3), яка включає в себе наступні основні системи:

– система вакуумування;

					БР 2826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						33
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- система подачі аргону;
- вузел катодний;
- пневмосистема;
- розділяючий механізм;
- вакуумна камера;
- система магнітної стабільності розряду;
- система управління процесу пайки.

Система вакуумування включає:

- механічний вакуумний насос НВЗ-75;
- високовакуумний паромасляний агрегат АБП-5;
- вакуумні вентиля і затвори;
- термopарно-іонізаційний вакууметр ВІТ-2;
- механізм управління системи.

Система вакуумування призначена для досягнення необхідного розрядження в вакуумній камері $(1,5...3) \cdot 10^{-2}$ Па $(2...4) \cdot 10^{-4}$ мм.рт.ст. Управління вакуумною системою здійснюється з блоку управління.

					БР 2826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						34
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3

ХАРАКТЕРИСТИКА МАТЕРІАЛУ ЛОПАТКИ

3.1. Характеристика об'єкта дослідження

Об'єктом дослідження у даній роботі є лопатка газотурбінного двигуна, призначена для експлуатації в умовах високотемпературного газового потоку та значних механічних навантажень. Бандажні лопатки належать до найбільш відповідальних елементів турбінного ступеня, оскільки саме вони забезпечують перетворення енергії робочого тіла в механічну енергію ротора за одночасного впливу високих температур, відцентрових сил, термічної втоми та вібраційних навантажень. Особливістю конструкції досліджуваної лопатки є наявність бандажної полиці у верхній частині пера, яка формує замкнений кільцевий контур робочого колеса та сприяє зменшенню коливань і витоків газового потоку. Для виготовлення досліджуваної лопатки доцільним є використання сучасного нікелевого жароміцного ливарного сплаву IN738LC, який за хімічним складом, фазовим станом та рівнем жароміцності є найбільш близьким аналогом сплаву ЖС6У. Використання даного сплаву обумовлене його високою стійкістю до повзучості, жаростійкістю та здатністю зберігати механічні властивості при температурах, що перевищують 900...1000 °С.

Конструкція бандажної лопатки включає хвостову частину, перехідну зону, перо та бандажний елемент (рисунк 3.1). Хвостовик забезпечує фіксацію лопатки у диску турбіни та передачу відцентрових навантажень, тоді як профіль пера виконує аеродинамічну функцію перетворення енергії потоку гарячих газів. Бандажна полиця сприяє підвищенню жорсткості лопаткового апарата та зниженню динамічних коливань у процесі експлуатації.

У процесі роботи лопатка піддається складному комплексу навантажень, що включає тривалий вплив високої температури, циклічні термомеханічні

					БР 2826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						35
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

напруження та агресивний вплив продуктів згоряння палива. У зв'язку з цим матеріал лопатки повинен характеризуватися високою жароміцністю, структурною стабільністю, опором термічній втомі та здатністю тривалий час працювати в умовах високотемпературного навантаження без розвитку повзучості та руйнування.

Хімічний склад сплаву IN738LC характеризується підвищеним вмістом легувальних елементів, які забезпечують фазове зміцнення та жаростійкість матеріалу.

Таблиця 3.1 – Елементний склад IN738LC

Елемент	IN738LC, %
Ni	основа
Cr	15,7-16,3
Co	8,0-9,0
W	2,4-2,8
Mo	1,5-2,0
Al	3,2-3,7
Ti	3,2-3,8
Ta	1,5-2,0
C	0,09-0,13

Структурний стан жароміцних нікелевих сплавів визначається наявністю γ -твердого розчину на основі нікелю та дисперсних зміцнювальних виділень γ' -фази, яка формує основний механізм жароміцного зміцнення ($\gamma' - \text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$)

Саме γ' -фаза забезпечує високу стабільність структури при підвищених температурах, перешкоджаючи руху дислокацій та розвитку пластичної деформації. Окрім γ' -фази, у структурі можуть бути присутні карбіди типу MC та M_{23}C_6 , які локалізуються переважно по межах зерен і сприяють підвищенню жароміцності та опору повзучості.

Таблиця 3.2 – Основні властивості сплаву IN738LC

Властивість	Значення
Густина	8,1-8,3 г/см ³
Межа міцності при 20 °C	950-1100 МПа
Межа тривалої міцності при 900 °C	180-250 МПа
Робоча температура	до 980-1000 °C
Твердість	35-42 HRC

3.2 Аналіз струкури IN738LC

Структура сплаву складається з легованого твердого розчину на нікелевій основі γ' -фази і карбідів. Макроструктура сплаву IN738LC (рисунок 3.1) не містить поперечні межі зерен, а самі зерна зазвичай орієнтовані по довжині лопатки у напрямі ребра гранецентрованих грат.

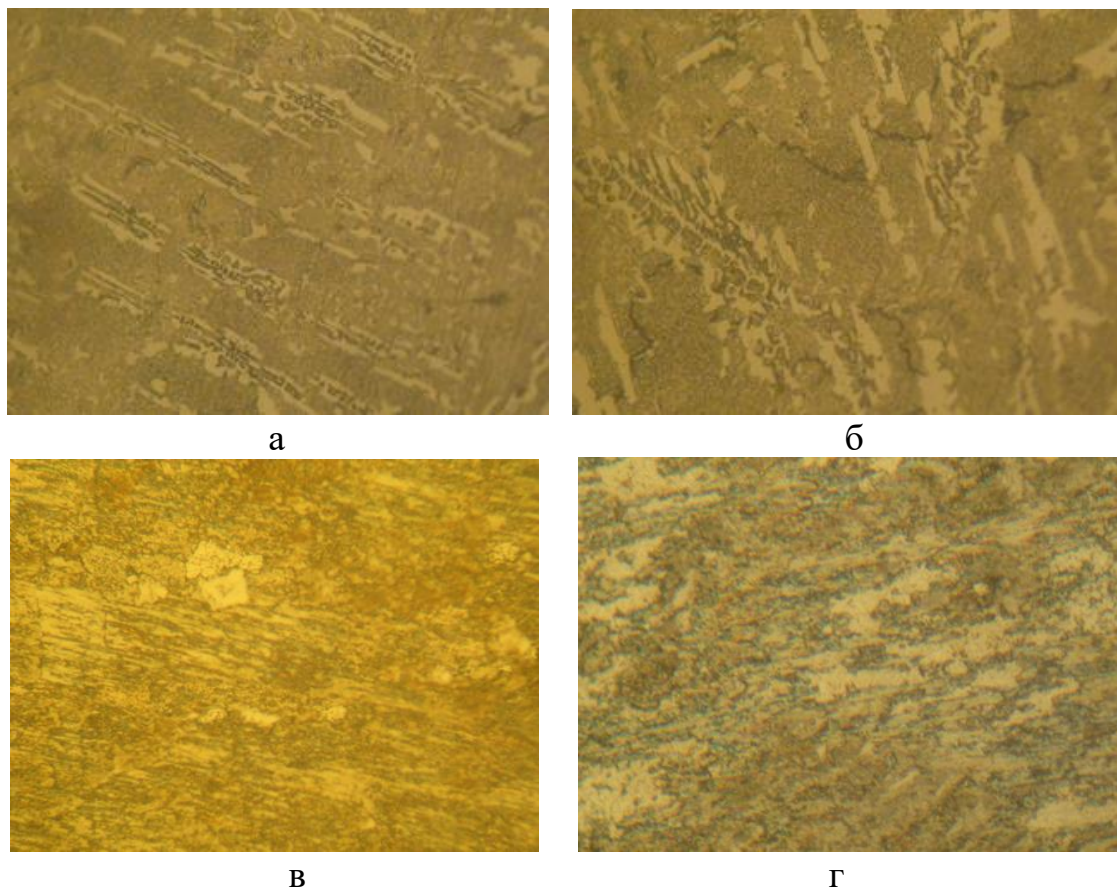


Рисунок 3.1 – Мікроструктура IN738LC:

а, в до термообробки. $\times 400$;

б, г – після термообробки. $\times 600$

γ' -фаза рівномірно розподілена в об'ємі γ -матриці та забезпечує високу жароміцність, опір повзучості та стабільність механічних властивостей при температурах до 1000 °С. Для литого стану сплаву характерною є дендритна структура з міждендритними ділянками, у яких локалізуються карбіди та евтектичні γ/γ' -утворення.

					БР 2826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						37
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У структурі також присутні карбіди типу MC і $M_{23}C_6$, розташовані переважно по межах зерен і в міждендритних зонах. Карбіди сприяють зміцненню меж зерен та підвищують опір міжзеренного руйнування при високотемпературному навантаженні. Після термічної обробки структура характеризується більш рівномірним розподілом γ' -фази та частковим розчиненням грубих евтектичних складових.

Для лопаток, виготовлених методом направленої кристалізації, характерною є орієнтована стовпчаста структура, у якій межі зерен розташовані вздовж напрямку основних робочих навантажень. Така будова забезпечує підвищення тривалої міцності, термічної стабільності та ресурсу роботи бандажних лопаток газотурбінних двигунів.

					БР 2826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						38
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4

АНАЛІЗ СТРУКТУРИ ТА МІКРОТВЕРДОСТІ НАПАЯНОГО ШАРУ

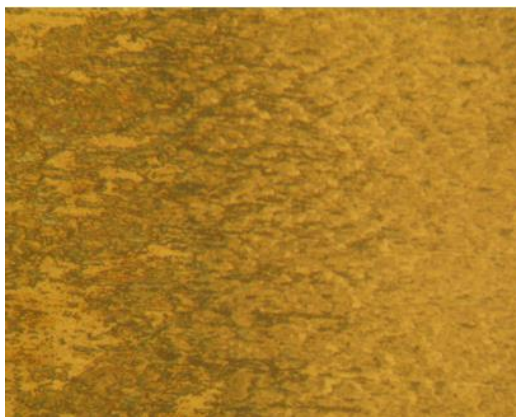
4.1. Дослідження мікроструктури

Мікроструктура напаяного шару, сформованого в процесі вакуумно-дугової напайки бандажних поличок лопаток зі сплаву IN738LC, характеризується багатошаровою будовою та складається з основного металу, дифузійної перехідної зони, прошарку нікелевого припою та твердосплавного шару на основі WC-Co. Формування такої структури відбувається внаслідок локального плавлення припою BNi-9, змочування поверхні основного металу та розвитку дифузійних процесів між компонентами системи.

У зоні контакту з основним металом формується дифузійна перехідна область, у якій спостерігається поступова зміна хімічного складу між сплавом IN738LC та нікелевим припоєм. Саме ця зона забезпечує високу адгезію напаяного шару та ефективну передачу механічних навантажень між основою і твердоспальною композицією. При оптимальних режимах напайки перехідна зона має однорідну структуру без суцільних крихких евтектичних прошарків (рисунок 4.1).

Основу паяного прошарку становить γ -твердий розчин на основі нікелю, легований хромом і бором. У процесі дифузійної витримки частина бору переходить у основний метал та твердосплавний шар, унаслідок чого знижується кількість крихких боридних фаз у центральній частині шва. При контрольованому тепловому циклі структура припою характеризується дрібнодисперсною будовою та достатньою пластичністю.

					БР 2826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						39
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



а



б

Рисунок 4.1 – Перехідна ділянка між напайкою та основним металом:

а – $\times 400$;

б – $\times 600$

Твердосплавний шар представлений зернами карбіду вольфраму WC, рівномірно розподіленими у кобальтовій зв'язці. Карбідна фаза забезпечує високу твердість і зносостійкість контактної поверхні, тоді як кобальтова матриця підвищує тріщиностійкість та опір контактному-втомному руйнуванню. У структурі напаяного шару зерна WC зберігають свою морфологію, що свідчить про відсутність їх інтенсивного розчинення під час локального вакуумно-дугового нагріву (рисунок 4.2.).

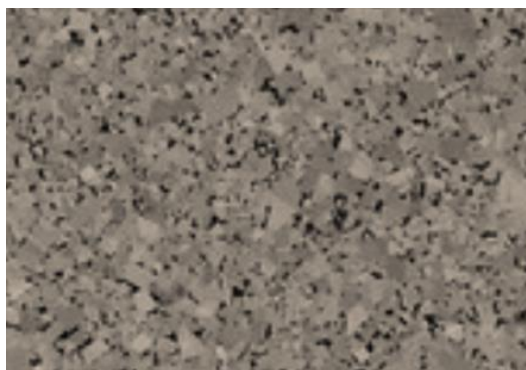


Рисунок 4.2 – Структура WC-Co

Мікроструктура твердого сплаву характеризується наявністю рівномірно розподілених карбідних зерен, розмір яких залежить від технології виготовлення та вмісту кобальтової зв'язки. Для деталей газотурбінних двигунів доцільним є застосування дрібнозернистих або

					БР 2826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ультрадрібнозернистих WC-Co композицій, оскільки вони забезпечують вищу контактну витривалість і стійкість до утворення мікротріщин.

На рисунку 4.3 подано мікроструктуру припою. При оптимальному режимі вакуумно-дугової напайки структура припою характеризується мінімальною пористістю та відсутністю суцільних крихких евтектичних прошарків. Завдяки локальному нагріванню й контрольованому тепловому циклу вдається уникнути перегріву основного металу та забезпечити стабільність γ/γ' -структури сплаву IN738LC.

Важливою особливістю припою BNi-9 є його здатність формувати тонкий і пластичний паяний прошарок із високою жаростійкістю. Це особливо важливо для нижніх бандажних полицок, які працюють в умовах циклічного контактного навантаження та фретинг-зношування. Завдяки відносно пластичній γ -матриці припій частково компенсує локальні термічні та механічні напруження між твердосплавним шаром WC-Co та жароміцною основою. Така будова забезпечує високу адгезію, жаростійкість і стабільність паяного з'єднання в умовах високотемпературної експлуатації газотурбінних лопаток.

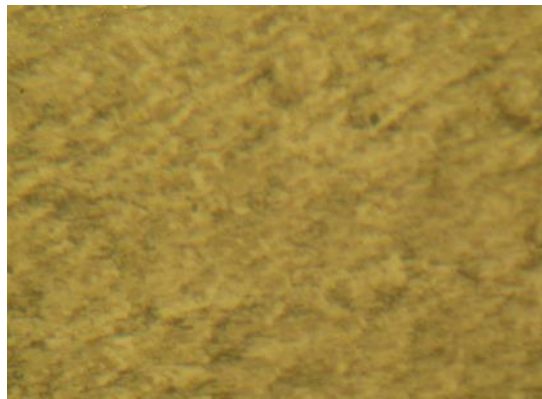


Рисунок 4.3 – Мікроструктура припою BNi-9: а – $\times 400$; б – $\times 600$

Мікроструктура напаяного шару після контрольованого охолодження характеризується високою щільністю та відсутністю значної пористості. За правильно вибраних режимів напайки не спостерігається утворення суцільних

крихких боридних сіток або мікротріщин, що є критично важливим для роботи бандажних полицок в умовах циклічного контактного навантаження.

У процесі металографічного аналізу в зоні паяного з'єднання можуть спостерігатися локальні дрібнодисперсні бориди та карбідні включення, однак їх кількість є незначною і не викликає суттєвого зниження механічних властивостей. Наявність плавного переходу мікротвердості між основним металом, припоєм і твердосплавним шаром свідчить про формування якісного дифузійного контакту.

Мікроструктура напаяного шару являє собою багатошарову композиційну систему з високою адгезією та стабільною структурою, що забезпечує підвищення зносостійкості нижніх бандажних полицок та їх працездатності в умовах високотемпературного фретинг-навантаження газотурбінних двигунів.

4.2. Аналіз мікротвердості напаяного шару та контроль якості

Для оцінки механічних властивостей напаяного шару та якості сформованого паяного з'єднання проводили визначення мікротвердості структурних складових відновленої бандажної полицки лопатки. Дослідження виконували методом Віккерса, який дозволяє визначати твердість матеріалів у широкому діапазоні завдяки використанню алмазного індентора у формі правильної чотиригранної піраміди.

Метод Віккерса характеризується високою точністю та є особливо ефективним при дослідженні локальних структурних зон паяних і наплавлених з'єднань. Навантаження, що прикладається до індентора, може змінюватися у широкому діапазоні, що дозволяє визначати твердість як основного металу, так і тонких дифузійних прошарків та твердосплавних композицій.

					БР 2826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						42
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Визначення мікротвердості виконували на приладі ПМТ-3 методом вдавлювання алмазної піраміди з навантаженням 150 г. Дослідження проводили на поперечних мікрошліфах у декількох характерних зонах: у основному жароміцному сплаві IN738LC, у зоні нікелевого припою BNi-9, у дифузійній перехідній області та в твердосплавному шарі WC-Co.

У процесі вимірювань встановлено, що найбільшими значеннями мікротвердості характеризується твердосплавний шар WC-Co, що обумовлено високою твердістю карбідів вольфраму. Мікротвердість припою BNi-9 є вищою за твердість основного сплаву IN738LC, однак суттєво нижчою за твердість твердосплавного шару. Це свідчить про достатню пластичність припою та його здатність компенсувати локальні термічні і контактні напруження між різнорідними матеріалами.

Аналіз отриманих результатів показав, що мікротвердість змінюється поступово від основного металу до твердосплавного шару, що свідчить про формування якісної дифузійної перехідної зони та відсутність різкого структурного переходу (таблиця 4.1. рисунок 4. 4). Такий характер розподілу твердості є важливим фактором зниження концентрації напружень у зоні напайки та підвищення довговічності відновленої бандажної полицки.

Таблиця 4.1 – Результати вимірювань мікротвердості

Ділянка та матеріал	Твердість HV _{0,15}
Твердосплавний шар WC-Co	1250...1650
Припій BNi-9	620...720
Дифузійна зона припою та IN738LC	540...650
Сплав IN738LC	420...520

Контроль якості відновлених лопаток включав комплекс неруйнівних та металографічних досліджень. На початковому етапі проводили зовнішній огляд, у процесі якого оцінювали стан контактних поверхонь, наявність слідів окиснення, локального перегріву, тріщин, деформацій і дефектів формування

напаяного шару. Особливу увагу приділяли зоні нижньої бандажної полицки, яка працює в умовах підвищених контактних навантажень та фретинг-зношування.



Рисунок 4.4 – Мікротвердість різних ділянок напайки

Для виявлення поверхневих дефектів застосовували люмінесцентний контроль, який дозволяє виявляти мікротріщини, пори та непровари у зоні паяного з'єднання. Даний метод є особливо ефективним для контролю тонких локальних дефектів після вакуумно-дугової напайки.

У процесі металографічного дослідження оцінювали стан γ/γ' -структури основного металу, характер дифузійної взаємодії між припоєм і сплавом IN738LC, наявність пористості, боридних включень та мікротріщин. Встановлено, що при правильно вибраних режимах вакуумно-дугової напайки формується щільне багатшарове з'єднання без значної кількості дефектів та без ознак критичної деградації структури основного жароміцного сплаву.

Отримані результати підтверджують ефективність розробленої технології відновлення нижніх бандажних полицок та свідчать про високу якість сформованого паяного з'єднання, його достатню мікротвердість, зносостійкість і придатність до експлуатації в умовах високотемпературного контактного навантаження газотурбінних двигунів.

ВИСНОВКИ

Метою даної роботи була розробка технологічного процесу відновлення бандажних поличок лопаток авіаційних газотурбінних двигунів методом вакуумно-дугової напайки із застосуванням сучасних жароміцних і твердосплавних матеріалів. У процесі виконання роботи проведено аналіз конструктивних особливостей бандажних лопаток, умов їх експлуатації та основних механізмів контактного і фретинг-зношування.

Встановлено, що мікроструктура сплаву складається з γ -твердого розчину на основі нікелю, зміцненого дисперсними виділеннями γ' -фази, а також карбідів, локалізованих переважно в міждендритних ділянках і по межах зерен. Така структура забезпечує високі експлуатаційні характеристики лопаток в умовах високотемпературного навантаження.

У ході роботи обґрунтовано вибір твердосплавного матеріалу WC-Co для відновлення контактних поверхонь бандажних поличок. Встановлено, що даний матеріал характеризується високою твердістю, зносостійкістю та значно кращою тріщиностійкістю порівняно з релітом. Наявність кобальтової зв'язки забезпечує підвищений опір контактному-втомному руйнуванню та фретинг-зношуванню в умовах циклічних навантажень.

Для реалізації процесу напайки обґрунтовано використання нікелевого високотемпературного припою BNi-9, який забезпечує якісне змочування сплаву IN738LC та твердосплавного шару WC-Co. Встановлено, що структура припою після вакуумно-дугової напайки представлена γ -твердим розчином на основі нікелю з незначною кількістю локальних боридних фаз. Дифузійні процеси під час витримки сприяють формуванню однорідної перехідної зони та зниженню концентрації крихких евтектичних складових.

У роботі розроблено технологічний процес вакуумно-дугової напайки бандажних поличок із використанням порожнистого катода та локального концентрованого нагріву. Встановлено, що застосування вакуумного

					БР 2826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

середовища та контрольованого теплового циклу дозволяє мінімізувати окиснення матеріалів, обмежити зону термічного впливу та зберегти стабільність γ/γ' -структури основного жароміцного сплаву.

Під час аналізу мікроструктури напаяного шару встановлено, що у зоні з'єднання формується багатшарова композиційна система, яка складається з основного металу IN738LC, дифузійної перехідної зони, нікелевого припою та твердосплавного шару WC-Co. Напаяний шар характеризується високою щільністю, відсутністю значної пористості та добрим дифузійним контактом між структурними складовими.

Розроблена технологія забезпечує підвищення контактної витривалості, зносостійкості та ресурсу нижніх бандажних полицок лопаток газотурбінних двигунів. Отримані результати підтверджують ефективність використання вакуумно-дугової напайки для відновлення високонавантажених елементів гарячого тракту та свідчать про доцільність впровадження запропонованої технології у ремонтне виробництво авіаційних газотурбінних двигунів.

					БР 2826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						46
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Jie Yuan, Chiara Gastaldi, Enora Denimal Goy, Benjamin Chouvion, Friction damping for turbomachinery: A comprehensive review of modelling, design strategies, and testing capabilities, Progress in Aerospace Sciences, Volume 147, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2024.101018>.
2. Fathyunes, L.; Mohtadi-Bonab, M.A. A Review on the Corrosion and Fatigue Failure of Gas Turbines. Metals 2023, 13, 701. <https://doi.org/10.3390/met13040701>.
3. Технології виготовлення деталей складної форми. Частина 1 [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 131 «Прикладна механіка» освітньо-професійної програми «Технології машинобудування» та освітньо-наукової програми «Технології машинобудування» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; Ю.В.Петраков, С.В. Сохань, В.К. Фролов, В.М. Кореньков. – Електронні текстові данні (1 файл: 10,2 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 288 с.
4. P. Klimczuk, “Repairability analysis of the energy gas turbine rotor blade second stage shroud by high-temperature brazing”, Weld. Tech. Rev., vol. 93, no. 2, pp. 23–31, May 2021.
5. He, X.; Wang, Z.; Yan, Y.; Zheng, K.; Bai, Q. Role of Surface Morphology Evolution in the Tribological Behavior of Superalloy Under High-Temperature Fretting. Materials 2025, 18, 2350. <https://doi.org/10.3390/ma18102350>.
6. Jie Deng, Yuxin Xu, Oriol Guasch, Nansha Gao, Liling Tang, Xu Chen, A two-dimensional wave and Rayleigh-Ritz method for complex dispersion in periodic arrays of circular damped acoustic black holes, Mechanical Systems and Signal Processing, Volume 200, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2023.110507>.
7. Hamed Esmaeili, Hamed Adibi, Reza Rizvi, Seyed Mehdi Rezaei, Coupled thermo-mechanical analysis and optimization of the grinding process for Inconel

					БР 2826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

718 superalloy using single grit approach, Tribology International, Volume 171, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107530>.

8. Коваленко, Я. П., Бойко, І. А., & Мельничук, П. П. (2022). Застосування методу скінчених елементів для пошуку шляхів оптимізації температурного поля при різанні інструментами із ПКНБ групи ВЛ. Технічна інженерія, (2(90), 22–29. [https://doi.org/10.26642/ten-2022-2\(90\)-22-29](https://doi.org/10.26642/ten-2022-2(90)-22-29).

9. B. Bellón, A.K. Boukellal, T. Isensee, O.M. Wellborn, K.P. Trumble, M.J.M. Krane, M.S. Titus, D. Tourret, J. LLorca, Multiscale prediction of microstructure length scales in metallic alloy casting, Acta Materialia, Volume 207, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2021.116686>.

10. Amnaya Awasthi, Ghatu Subhash, Deformation behavior and amorphization in icosahedral boron-rich ceramics, Progress in Materials Science, Volume 112, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100664>.

11. Hongbo Zhou, Sven Hilke, Eloi Pineda, Martin Peterlechner, Yuriy Chushkin, Sankaran Shanmugam, Gerhard Wilde, X-ray photon correlation spectroscopy revealing the change of relaxation dynamics of a severely deformed Pd-based bulk metallic glass, Acta Materialia, Volume 195, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.05.064>.

12. Wei Song, Ping Wang, Di Wan, Guian Qian, José Correia, Filippo Berto, Fatigue crack growth behavior of Ni-Cr-Mo-V steel welded joints considering strength mismatch effect, International Journal of Fatigue, Volume 151, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106389>.

13. Yanhu Zhang, Yonghong Fu, Xijun Hua, Li Quan, Jianjun Qu, Wear debris of friction materials for linear standing-wave ultrasonic motors: Theory and experiments, Wear, Volumes 448–449, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203216>.

14. Hamed Esmaeili, Hamed Adibi, Reza Rizvi, Seyed Mehdi Rezaei, Coupled thermo-mechanical analysis and optimization of the grinding process for Inconel

					БР 2826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						48
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

718 superalloy using single grit approach, Tribology International, Volume 171, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107530>.

15. Бутурля, Є. А. Розробка припою і технології паяння жароміцних нікелевих сплавів лопаток суднових газових турбін нового покоління : дис. ... д-ра філос. : 132 Матеріалознавство / Є. А. Бутурля ; наук. кер. В. Ф. Квасницький ; НУК. – Миколаїв, 2021. – 203 с.

16. Фазово-структурна стабільність жароміцного корозійностійкого сплаву для литих робочих лопаток ГТУ / А. М. Верховлюк, І. І. Максютя, Ю. 177 Г. Квасницька, Г. П. Мьяльніца, О. В. Михнян // Металознавство та обробка металів. - 2016. - № 3. - С. 3-9.

17. Глотка О. А. Удосконалення структурно-фазового складу ливарних жароміцних нікелевих сплавів // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції. – Тернопіль, 2022.

18. Куцова В. З. та ін. Спеціальні сплави, рідкоземельні та благородні метали : навчальний посібник. – Дніпро : НМетАУ, 2007

19. Рожков О.Д. Технологія нанесення покриттів. Частина II: Навч. посібник. – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2008. - 38 с.

20. Погребна Н.Е., Куцова В.З., Котова Т.В. Способи зміцнення металів: Навчальний посібник. – Дніпро: НМетАУ, 2021. - 89 с.

21. Прокопович І. В. Металознавство: навчальний посібник. – Одеса: Екологія, 2020.

22. Конспект лекцій з дисципліни “Сталі та сплави з особливими властивостями” /Укл.: О.В. Климов, Ю.І. Кононенко. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2011. – 266 с.

23. Дурягіна З.А., Лизун О.Я., Пілюшенко В.Л. Сплави з особливими властивостями. — Львів: Видавництво НУ «Львівська політехніка», 2007. - 236 с.

24. Дурягіна З.А. Фізика та хімія поверхні. – Львів: Видавництво НУ «Львівська політехніка», 2009. - 208 с.

					БР 2826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

25. Гапонова, О.П. Сталі та сплави з особливими властивостями [Текст]: навч. посіб. / О.П. Гапонова, А.Ф. Будник. - Суми: СумДУ, 2014. - 240 с.

26. Functional materials: Lektures for students of the second (master's) level of higher education of the "Materials Science" educational program, specialty 132 Materials science, fields of knowledge 13 Mechanical engineering full-time and part-time forms of study/comp. N.P. Zaychuk Lutsk: LNTU, 2023. – 71 p.

27. Функціональні матеріали: методичні вказівки до лабораторних занять для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти освітньої програми «Матеріалознавство» спеціальності 132 Матеріалознавство, галузі знань 13 Механічна інженерія денної та заочної форм навчання / уклад. Н.П. Зайчук. Луцьк: ЛНТУ, 2022. – 76с.

					БР 2826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		