

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Фізико-технічний, інженерно-фізичний
(повне найменування інституту, назва факультету)

Фізичне матеріалознавство
(повна назва кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)

магістр
(ступінь вищої освіти (освітній ступінь))

на тему: «Методи підвищення експлуатаційних властивостей деталей компресору
газотурбінного двигуна на етапі фінішної обробки»

Виконав: студент 5 курсу, групи ІФ-219м

Спеціальності 132 Матеріалознавство,

Освітня програма (спеціалізація)
Прикладне матеріалознавство

Дашкевич Дмитро Володимирович
(прізвище та ініціали)

Керівник Ткач Дар'я Володимирівна
(прізвище та ініціали)

Рецензент Павленко Д.В.
(прізвище та ініціали)

2020 рік

Форма № 25

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»
(повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут, факультет НУ«ЗП», ІФ
 Кафедра Фізичне матеріалознавство
 Ступінь вищої освіти бакалавр
 Спеціальність 132 Матеріалознавство
(код і найменування)

Освітня програма (спеціалізація) Прикладне матеріалознавство
(назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Ольшанецький Вадим
Юхимович

 Климов А.В.
 « 16 » 12 2020 року

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

Дашкевич Дмитро Володимирович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Методи підвищення експлуатаційних властивостей деталей компресору газотурбінного двигуна на етапі фінішної обробки

керівник проекту (роботи) Ткач Дар'я Володимирівна, к.т.н., доцент.

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від « ____ » ____ 20 ____ року № ____

2. Строк подання студентом проекту (роботи) _____

3. Вихідні дані до проекту (роботи) _____

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
 Розділ 1. Літературний огляд; Розділ 2. Матеріали та методи дослідження; Розділ 3.
 Визначення раціонального режиму іонно-плазмового азотування пера лопаток; Розділ
 4. Техніко-економічні розрахунки; Розділ 5. Охорона праці та безпека у надзвичайних
 ситуаціях;
 5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконання завдання
1-3	Ткач Д.В., к.т.н., доцент, викладач каф.ФМ	1.09.2020	5.11.2020
4	Кругликова В.В., к.е.н., доцент, викладач каф. ПТБД	4.10.2020	16.12.2020
Додаток А	Нестеров О.В., к.т.н., доцент, завідувач каф. ОПІНС		

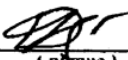
Нормоконтроль

7. Дата видачі завдання « 01 » 09 2021 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

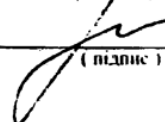
№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Вступ	05.09.20	
2	Аналіз літературних джерел	15.09.20	
3	Літературний огляд	05.10.20	
4	Матеріали та методи дослідження	25.10.20	
5	Визначення раціонального режиму іонно-плазмового азотування пера лопаток	05.11.20	
6	Охорона праці і безпека в надзвичайних ситуаціях	15.11.20	
7	Формування висновків з магістерської роботи	25.11.20	
8	Оформлення магістерської роботи, нормоконтроль	05.12.20	
9	Розробка доповіді до захисту	15.12.20	

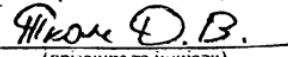
Студент(ка)


(підпис)


(прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи)


(підпис)


(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: с.100, табл.16, рис.43, джерел 26.

Об'єктом дослідження є структура поверхневих шарів робочої лопатки компресора ГТД.

Методи підвищення експлуатаційних властивостей деталей компресору газотурбінного двигуна на етапі фінішної обробки, а саме процес іонно-плазмового азотування робочої лопатки компресора.

В роботі поетапно дослідили процес виготовлення лопатки, від отримання заготовки до фінішної обробки робочої поверхні. Дослідили види іонно-плазмового азотування та їх вплив на втомну міцність та зносостійкість лопаток з титанового двофазного сплаву, підібрали оптимальні методи поверхнево пластичної деформації.

Визначили раціональний режим іонно-плазмового азотування пера робочої лопатки компресора.

РОБОЧА ЛОПАТКА, ТИТАНОВИЙ СПЛАВ, ІОННО-ПЛАЗМОВЕ АЗОТУВАННЯ, МІКРОТВЕРДІСТЬ, ВТОМНА МІЦНІСТЬ, ДИФУЗІЙНИЙ ШАР, НІТРИДНА ЗОНА.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

грн. – гривня;

σ_v – тимчасовий опір;

σ_T – межа текучості;

δ – відносне подовження;

φ – відносне звуження;

T - температура;

P – тиск;

Па – паскаль;

B – вольт;

год – година;

мм – міліметр;

мкм – мікромметр;

c – секунда;

м – метр;

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів	5
Вступ.....	8
1 Літературний огляд	10
1.1 Аналіз умов експлуатації та вимоги до матеріалу	10
1.2 Серійне виготовлення лопаток компресора ГТД.....	12
1.3 Методи підвищення експлуатаційних властивостей лопаток компресора.....	17
1.3.1 Полірування лопаток	18
1.3.2 Поверхнева пластична деформація	19
1.4 Покращення експлуатаційних властивостей іонно-плазмовим азотуванням.....	21
1.5 Іонно-плазмове азотування титанових сплавів	26
1.5.1 Хіміко-термічна обробка титанових сплавів азотуванням.....	27
1.5.2 ІА титанових сплавів в традиційно тліючому розряді.....	28
1.5.3 ІА в тліючому розряді з порожнистим катодом	31
1.5.4 ІА у дуговому розряді.....	34
1.5.5 ІА у дуговому розряді з холодним катодом	35
1.5.6 ІА у дуговому розряді з термоємісйним катодом	36
1.5.7 Комбіноване ІА титанових сплавів	38
1.5.8 Формування дифузійних шарів при ІА титанових сплавів	40
2 Матеріали та методи дослідження.....	43
2.1 Матеріал дослідження	43
2.2 Отримання іонно-плазмового шару	47
2.3. Методи дослідження робочої лопатки компресора ГТД	51
2.3.1 Випробування на втомну міцність	51
2.3.2 Дослідження на растровому мікроскопі	55
3 Визначення раціонального режиму іонно-плазмового азотування лопаток....	57
3.1 Випробування на втомну міцність	57
3.2 Дослідження ерозійної стійкості покриттів при впливі рідких і твердих частинок.....	63

4 Техніко-економічні розрахунки.....	69
4.1 Тенденція розвитку світового ринку технологій	69
Висновки	80
Перелік джерел посилання	81
Додаток А Охорона праці і безпека в надзвичайних ситуаціях	84
А.1 Аналіз потенційних небезпек.....	84
А.2 Заходи забезпечення безпеки	85
А.3 Заходи забезпечення виробничої санітарії та гігієни праці.....	87
А.4. Заходи з забезпечення пожежної безпеки.....	91
А.5. Заходи безпеки у надзвичайних ситуаціях	93
Додаток Б Презентація.....	95

ВСТУП

У сучасному світі в розвитку держави величезну роль відіграє розвиток промисловості. З появою нових наукових технологій промисловість виявила потребу в отриманні матеріалів з новими властивостями, а також у вдосконаленні методів їх отримання. Робочі лопатки компресора є відповідальними і масовими деталями газотурбінного двигуна. Від правильно обраної технології виготовлення лопаток залежить ресурс і кінцева вартість двигуна.

Забезпечення заданого ресурсу роботи лопаток багато в чому залежить від ряду технологічних факторів. Стан поверхневого шару лопаток, наявність слідів попередньої обробки (шорсткість поверхні), які є концентраторами напруги, суттєво впливають на тривалу і втому міцність лопаток під час експлуатації.

Тому виготовлення лопаток, навіть у дрібносерійному виробництві, вимагає застосування сучасних технологічних процесів, високопродуктивного обладнання та автоматизації процесу виготовлення і контролю.

Для підвищення ресурсу і надійності роботи лопаток компресора ГТД застосовується цілий комплекс різних оздоблювально-зміцнюючих операцій. Для зниження впливу корозійно-ерозійних процесів при експлуатації ГТД на лопатки компресора наносять вакуумні іонно-плазмові покриття. Ці покриття дозволяють значно підвищити ресурс їх роботи. Одним із таких процесів є азотування.

Азотування - це процес впровадження азоту в поверхневий шар деталі. У більшості випадків на заводах застосовують газове азотування. Азотуванню, як і цементації, піддають деталі, що працюють на знос і піддаються знакозмінним навантаженням. Крім газового, існують й інші способи азотування, в тому числі іонно-плазмовий метод. Даний спосіб азотування відомий давно, проте на

виробництві нерідко використовується спосіб газового азотування, який є менш вигідним.

У даній роботі розглядаються переваги та недоліки методу іонно-плазмового азотування, а також економічне порівняння з методом газового азотування, що в свою чергу дуже актуально для багатосерійних підприємств які досі використовують метод газового азотування.

Мета роботи: дослідити методи підвищення експлуатаційних властивостей деталей компресору газотурбінного двигуна на етапі фінішної обробки. Порівняти існуючі методи та зробити висновок який метод найоптимальніший.

1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1 Аналіз умов експлуатації та вимоги до матеріалу

Умови роботи робочої лопатки компресора (рисунок 1.1) мають ряд специфічних особливостей, які необхідно враховувати, щоб уникнути швидкого зниження її техніко-експлуатаційних показників і можливого виникнення аварійної ситуації [1].

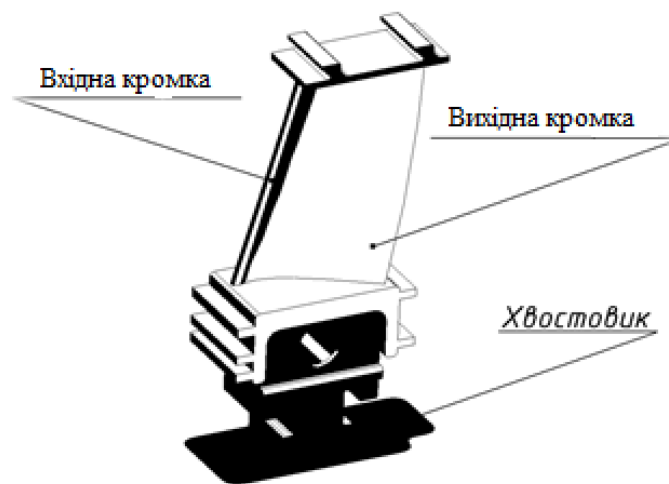


Рисунок 1.1 – Ескіз робочої лопатки [1].

Пошкоджуваність і надійна робота робочих лопаток компресора залежить від роботи всіх елементів гарячої частини двигуна. Збільшення ресурсу та підвищення робочих параметрів турбін ГТД супроводжується інтенсифікацією процесів пошкодження робочих лопаток під дією статичних і вібраційних навантажень, високих температур, циклічних навантажень, що викликаються дією силових факторів, термічних напружень, корозійного і ерозійного впливу газового потоку. Більшість руйнувань робочих лопаток турбін, як і робочих лопаток компресорів, має втомний характер і пов'язане з змінними напруженнями.

У процесі експлуатації робочі лопатки ГТД піддаються:

1) статичним навантаженням, а саме:

а) розтягуванню відцентрованих сил мас самої лопатки.

б) згину від дії на лопатку газу при руху по міжлопатковим каналам.

в) згину від відцентрованих сил мас лопатки в наслідок того що центр ваги перерізу лопатки не лежать на одному радіусі.

г) крутіння від відцентрованих сил мас лопатки.

д) крутіння від газових сил діючих на лопатку.

2) вібраційним навантаженням згину та крутіння.

3) температурні навантаження.

4) корозійний та ерозійний вплив газів.

В процесі експлуатації ГТД виділяють такі основні види пошкоджень лопаточного апарату [1]:

- обрив робочих лопаток компресорів і турбін;

- утворення тріщин і поломка спрямляючих, напрямляючих і соплових апаратів компресорів

- ерозійні пошкодження;

- вибоїни на лопатках через попадання в проточну частину твердих сторонніх часток.

Особливо шкідлива ерозія для компресора двигуна, що тягне за собою зниження ККД, зменшується термін служби, підвищується витрата палива і знижуються показники надійності двигунів. Ерозійний знос лопаток компресора призводить до зниження їх опору втоми до 60% поломок лопаток компресорів ГТД носять характер втоми.

1.2 Серійне виготовлення лопаток компресора ГТД

Технологічні процеси виробництва заготовок лопаток ГТД повинні забезпечувати їх геометричні параметри, внутрішню структуру і фізико-механічні властивості, запобігання появи потенційних вогнищ руйнувань [2].

Аналіз показує, що в умовах дрібносерійного виробництва, характерного для авіабудування, при існуючому зростанні вартості матеріалів і енергоресурсів основні зусилля повинні бути спрямовані на зниження матеріаломісткості виробництва за рахунок підвищення точності заготовок, вдосконалення методів їх отримання. При цьому повинні враховуватися всі вимоги, що пред'являються до технологій з позиції екології.

Виготовлення раціональних заготовок компресорних лопаток з титанових і жароміцних сплавів з мінімальною матеріаломісткістю, найменшою собівартістю і зниженням трудомісткості і обсягу ручних робіт при подальшій механічній обробці є одним із головних завдань. На жаль, його рішення здійснюється недостатньо інтенсивно. Це пояснюється тим, що на підприємствах галузі воно ведеться різними шляхами з урахуванням існуючих на підприємствах традицій, наявності відповідного обладнання, кадрів, а також вимагає значних капітальних вкладень. При цьому застосовуються різні варіанти і елементи технологічних процесів, здійснюваних на ковальсько-пресових машинах, принципово розрізняються за характером прикладання навантажень, інтенсивністю навантаження і іншим параметрам. Наприклад, для холодного вальцювання застосовуються спеціалізовані установки типу ПС або УВЛ; при високошвидкісному видавлюванні, при швидкостях навантаження від 30 до 40 м/с використовуються високошвидкісні молоти типу ВСМ. Штампування при звичайних швидкостях навантаження (до 1,0 м/с) здійснюється на гвинтових і кривошипних гарячештампових пресах. Для штампування і калібрування при знижених швидкостях (до 2,0 мм/с) в ізотермічних умовах знаходять застосування гідравлічні преси.

Рациональні області застосування перелічених технологічних процесів виготовлення заготовок лопаток компресора з урахуванням їх собівартості чітко не встановлені і залежать від багатьох факторів.

У заготівельних цехах авіадвигунобудівних підприємств виготовляються штамповані заготовки лопаток компресора довжиною приблизно до 300 мм. Заготовки лопаток компресора більшої довжини надходять по кооперації з металургійних підприємств.

В даний час у виробництві заготовок лопаток компресора можна виділити три основні технологічні процеси [2]:

- штампування на гвинтових і кривошипних горячештампувальних пресах (КГШП);
- деформування в ізотермічних умовах;
- високошвидкісне видавлювання.

Основні операції і устаткування, що застосовуються для виготовлення заготовок лопаток компресора з теплостійких сталей і титанових сплавів [1] наведено в табл. 1.1.

Втомна міцність є однією із головних характеристик міцності лопатки компресора ГТД, яка дуже залежить від стану поверхні лопатки. При проведенні випробування на втомну міцність було виявлено, що при однаковому навантаженні на лопатки, лопатки з вищим класом чистоти поверхні продемонстрували більший запас втомної міцності, ніж такі ж самі лопатки але з гіршою обробкою поверхні. Це обумовлено зменшенням кількості концентраторів напруження на поверхні. Також на опір втомі та ударну міцність позитивно впливає наявність стискаючих напружень у поверхневому шарі пера лопаток, що досягається різними методами поверхневої обробки.

Таблиця 1.1 - Операції та устаткування

№	Операція	Обладнання			Примітка
		Вискошвид- кісне видавлюван- ня	Деформування в ізотермічних умовах	Штампов- ка на гвинтових пресах або КГШП	
1	Алітування заготовок з теплостійкою стали і жароміцних сплавів		Установка типу УНПС1		Виконується перед операцією нагріву за інструкцією
2	Нанесення емалей та інших захисно- мастильних покриттів для титанових заготовок		Установка типу НЗС-1		Виконується перед операцією нагріву за інструкцією
3	Нагрів	Індукційна барієва ванна ВИС-70	Механізована електропіч із захисною атмосферою		Виконується перед кжною деформівною операцією
4	Витиснення	---	Прес К1230 (1 МН) або ГКМВІІ32 (1.6 МН)		---

Продовження таблиці 1.1

5	Висадка		Горизонтально ковальні машини (ГКМ) моделей ВІ132 (1.6 МН)		Може замінити операцію № 4
6	Гаряче вальцювання		Ковальні вальці моделей С1335		Може замінити операцію № 9
7	Тривала періодична прокатка		Прокатний стан ЧСП-2		Може замінити операцію № 4,6,8
8	Високошвидкісне витиснення	Високошвидкісний молот ВСМ-27 (1,6 - 2.5 т.)			
9	Штампування попереднє		Гвинтові преси або КГШП		
10	Штампування остаточне		Гідропрес ПА-2638 (6.3 МН)	Гвинтові преси або КГШППО	
11	Обтесення облою	---	Прес К9532 (0.6МН)		
12	Калібрування	---	Гідропрес Г1А-2638 (6.3 МН)	Гвинтові преси (10; 16; 25; 40 МН)	

Продовження таблиці 1.1

13	Видалення облою на хвостовику	Відрізний верстат	---	---
14	Очищення поверхонь заготовок з титанових сплавів корундовим піском		Піскоструминна камера	
15	Травлення для видалення газонасиче- них дефектних шарів	Ванна		
16	Розмірне травлення	Ванна		Виконується для високоточ- них заготовок
17	Термооб- робка	Механізована електропіч із захисною атмосферою		Високотемпера- турний відпал заготовок лопаток

Продовження таблиці 1.1

18	Остаточний контроль геометрії заготовок, твердості, механічних властивостей і структури	Оптико-механічний прилад ПОМКЛ-4 (або контрольно-вимірювальна машина), мікроскоп	Контроль твердості заготовок з титанових сплавів за інструкціями
----	---	--	--

1.3 Методи підвищення експлуатаційних властивостей лопаток компресора

Руйнування деталей у процесі експлуатації, як правило, починається на поверхні. Поверхневі шари мають різні концентратори напружень, на них діють максимальні напруження від зовнішніх навантажень при таких видах напруженого стану як згин, крутіння, а також несприятливий вплив навколишнього середовища [3].

Зміцнення поверхневих шарів матеріалу лопаток є ефективним заходом підвищення опору втомі. Залишкові напруження стиску, що діють у поверхневих шарах, істотно підвищують опір втомі лопаток, зменшують їх чутливість до концентраторів напружень і збільшують контактну міцність. Тому для зміцнення деталей ГТД, що навантажуються в процесі експлуатації на згин і крутіння, а також які працюють при високих контактних напруженнях і на знос, найбільш доцільним є використання не наскрізного зміцнення, а поверхневого.

Зміцнення поверхневих шарів це фінішна обробка деталі, адже якщо після цього проводити термічні та механічні процеси, то лопатка може втратити потрібні геометричні параметри та міцнісні характеристики.

1.3.1 Полірування лопаток

Полірування робочих поверхонь лопатки з титанових сплавів необхідне для усунення можливих концентраторів напруження, що в свою чергу підвищує показники міцності, та підготовки поверхні для нанесення рівномірного шару при азотуванні.

Висока точність процесу формоутворення та параметри шорсткості досягаються за допомогою застосування відповідного інструменту, полірувальних паст, режимів обробки, кінематичної структури та жорсткості обладнання, а також прогресивних методів обробки. [4] Для підвищення точності та параметрів шорсткості поверхонь лопатки при поліруванні виконують диференціацію процесу на наступні переходи: попереднє полірування, остаточне полірування і глянцювання (дзеркальне полірування). Разом з тим, полірування поверхонь лопатки з титанових сплавів потребують подальших досліджень. Процес полірування поверхонь лопатки з титанових сплавів реалізується за рахунок наступних типів технологічних впливів:

1. Різання матеріалу поверхні абразивними зернами, що призводить до утворення подрібненого рельєфу поверхневого шару.
2. Пластичної деформації мікрорельєфа полірованої поверхні.
3. Хімічного впливу поверхнево-активних поліруючих речовин (вуглеводнів, кислот, солей кислот та їх сполук тощо).
4. Термічного впливу на макро- і мікрорівнях.

Можна зазначити, що наведені вище технологічні впливи при поліруванні реалізуються в єдиному комплексі. При цьому окремі типи технологічних впливів можуть переважати або діяти незначно. Наприклад, при попередньому поліруванні діють всі типи технологічних впливів, причому переважає різання матеріалу. При остаточному і дзеркальному поліруванні, вплив процесу різання знижується відповідно, і відносно зростає дія пластичних і хімічних впливів.

Процес полірування лопаток може виконуватися за рахунок декількох переходів: 1 – попереднє полірування, 2 – остаточне полірування, 3 – глянцювання (дзеркальне полірування). Параметри якості обробки поверхонь лопатки на кожному переході визначаються припусками, режимами обробки, параметрами поліруючого кола та поліруючого матеріалу, а також особливостями обробки. Саме ці особливості обробки лопаток компресора мають істотний вплив на параметри якості їх поверхонь [4].

1.3.2 Поверхнева пластична деформація

Поверхнева пластична деформація надає значний ефект підвищення довговічності деталей, що працюють в умовах циклічних навантажень і які мають концентратори напружень, місця тугих посадок, досягається в результаті поверхневого наклепу і як наслідок підвищення зносостійкості [5].

При пластичній деформації поверхневі шари металу збільшуються в об'ємі, однак цьому перешкоджають недеформовані шари, які лежать глибше. В результаті взаємодії сил, що діють у поверхневих шарах і в серцевині деталі, поверхневі шари знаходяться під дією залишкових напружень стиснення, нижні шари - під дією залишкових напружень розтягування.

Пластичне деформування поверхневих шарів здійснюється за допомогою різних способів, що умовно поділяються на дві групи:

- 1) створення деформаційного зусилля шляхом безупинного контакту з деталлю (статичні);
- 2) ударна дія на деталь робочих тіл чи інструмента (динамічні).

Вибір оптимального способу обробки і раціональної конструкції інструмента залежать від наступних факторів: розмірів і форми деталей, що обробляються; міцності і твердості матеріалу виробів; вимог до точності і якості поверхні; характеру виробництва. Для пластичного деформування поверхневих

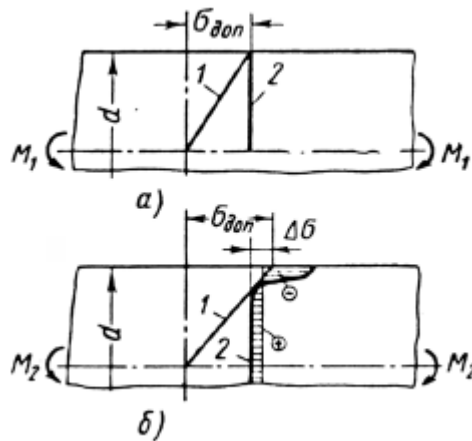
шарів лопатки використовують метод ультразвукового зміцнення та метод поверхневої деформації обкочуванням.

Ультразвукове деформаційне зміцнення (УЗДЗ) здійснюється за допомогою сталевих кульок. Кульки приводяться в рух стінками робочої камери спеціального ультразвукового пристрою, які коливаються з ультразвуковою частотою. Відмінною рисою цього методу від інших способів зміцнення є “м’якість” обробки через відносно малу енергію удару кульки при багаторазовому його повторенні, це дозволяє обробляти тонкостінні деталі з мінімальною зміною геометрії після зміцнення. При УЗДЗ можливе як місцеве, так і загальне поверхнєве зміцнення. В останньому випадку деталь обробляють з усіх боків одночасно, що знижує імовірність короблення.

Процес обкочування здійснюється переміщенням по поверхні, що обробляється, ролика чи кульки під тиском. Обкочування застосовується тоді, коли необхідно значно підвищити опір втомі деталей зі зниженням шорсткості поверхні, що обробляється. Існують зміцнювальні і зміцнювально-згладжувальні режими. Зміцнення здійснюється при високих тисках, цим досягається висока інтенсивність і глибина наклепу з великими залишковими напруженнями стиснення в зміцненому шарі. Режим зміцнення-згладжування поряд з підвищенням опору втомі забезпечує зниження вихідної шорсткості поверхні у декілька разів [5].

Пристосування для обкочування встановлюються на металорізальних верстатах, вони можуть бути однороликовими (однокульковими), дво-, три і багатороликовими (багатокульковими).

Від правильного вибору режимів обкочування (тиску, подачі, швидкості, числа проходів) і геометрії ролика залежать остаточні результати зміцнення. В той же час режими обробки встановлюються в залежності від властивостей матеріалів, що обробляються, і призначення обкочування.



а – до зміцнення поверхні б – і після зміцнення

Рисунок 1.2 – Схема розподілу напружень

1.4 Покращення експлуатаційних властивостей іонно-плазмовим азотуванням

В даний час зростає роль титанових сплавів як високоміцних матеріалів в різних галузях промисловості. Використання цих матеріалів відкриває великі можливості при розробці нових технологічних процесів і виробів. Однак більш широкому застосуванню титанових сплавів в значній мірі перешкоджають їх низький опір абразивному і ерозійного зношування і схильність до захоплювання при роботі в вузлах тертя [7]. У зв'язку з цим актуальною є проблема розробки методів поверхневого зміцнення цих матеріалів при збереженні їх механічних властивостей на необхідному рівні.

Різні недоліки, властиві методам зміцнення поверхні титанових сплавів, такі, як нанесення гальванічних покриттів, борирування, альфірування, цементация, обмежують їх використання в промисловості. З усіх існуючих в даний час видів ХТО титанових сплавів найбільш ефективним слід визнати широко поширений в промисловості процес газового азотування. На відміну від сталей, азотування яких проводять як в газових, так і в рідких середовищах,

титанові сплави слід азотувати тільки в азотовмісних газах. Більшість перших досліджень по азотуванню титану за аналогією зі сталями проводили в атмосфері аміаку, що дуже небажано, так як відбувається одночасне насичення поверхні воднем, а це неминуче веде до додаткового окрихчування азотованих виробів. Розроблено процеси азотування титана і його сплавів в азоті високої чистоти і в суміші азоту з аргоном при зниженому парціальному тиску. Однак звичайне азотування - досить тривалий процес (більше 30 год), здійснюваний при високих температурах (950 ... 1470 ° C), що призводить до зниження конструкційної міцності розглянутих матеріалів через укрупнення структурних складових.

Одним із шляхів інтенсифікації процесу газового азотування є проведення його в тліючому розряді. При цьому виключаються і багато інших недоліків, властиві звичайному газовому процесу.

Перше застосування азотування в плазмі з'явилося в 30-х і 40-х роках минулого століття. Пізніше, в 60-70-х роках цей метод розвинувся до індустріальних масштабів. Перші установки азотування в плазмі мали холодні стінки камери і працювали з постійним струмом. Подальший поштовх у розвитку азотування в плазмі отримало в середині 80-х років з появою так званого пульсуючого методу. При цьому збудження плазми досягається за допомогою пульсуючої постійної напруги. Поява електричної дуги забезпечується за допомогою постійного переривання напруги. Також необхідно розділяти потужність, що підводиться до плазми і нагріву деталей до температури обробки. Установки постійного струму з необхідністю охолодження стінок камери для відводу надлишкової теплової енергії (установки з холодними стінками) поступово втрачають актуальність. Установки з гарячими стінками з окремим нагріванням стінок камери є сьогодні стандартом в плазмовому азотуванні.

При класичних процесах азотування і карбонітрації в розплаві солей і газах відбувається дисоціація азотомістких компонентів і утворення азотованого шару внаслідок термохімічного процесу в умовах атмосферного тиску або невеликого надлишкового тиску. Для розкладання азотовмісних компонентів, активації процесу та утворення нітридів необхідна енергія термічної реакції. Для

підтримки процесу азотування існує мінімальна температура, при якій процес насичення ще не йде або йде дуже повільно, що економічно не вигідно.

На противагу згаданим процесам при іонно-плазмовому азотуванні необхідна енергія збудженого газу (плазма тліючого розряду), щоб активувати необхідну реакцію для утворення сполучного шару (СШ) і дисоціації молекул азоту на атоми.

Азотуємі деталі, сформовані в садку, поміщаються в вакуумну камеру. Після відкачки до робочого тиску (50 до 400 Па) між садкою (катод) і стінкою камери (анод) прикладають пульсуючу напругу більше сотні вольт, так що газ що знаходиться в камері іонізується і стає електропровідним. Залежно від величини прикладеної напруги між деталями і стінкою камери запалюється тліючий розряд, який в залежності від тиску, температури і газу характеризується певним світінням. [7]

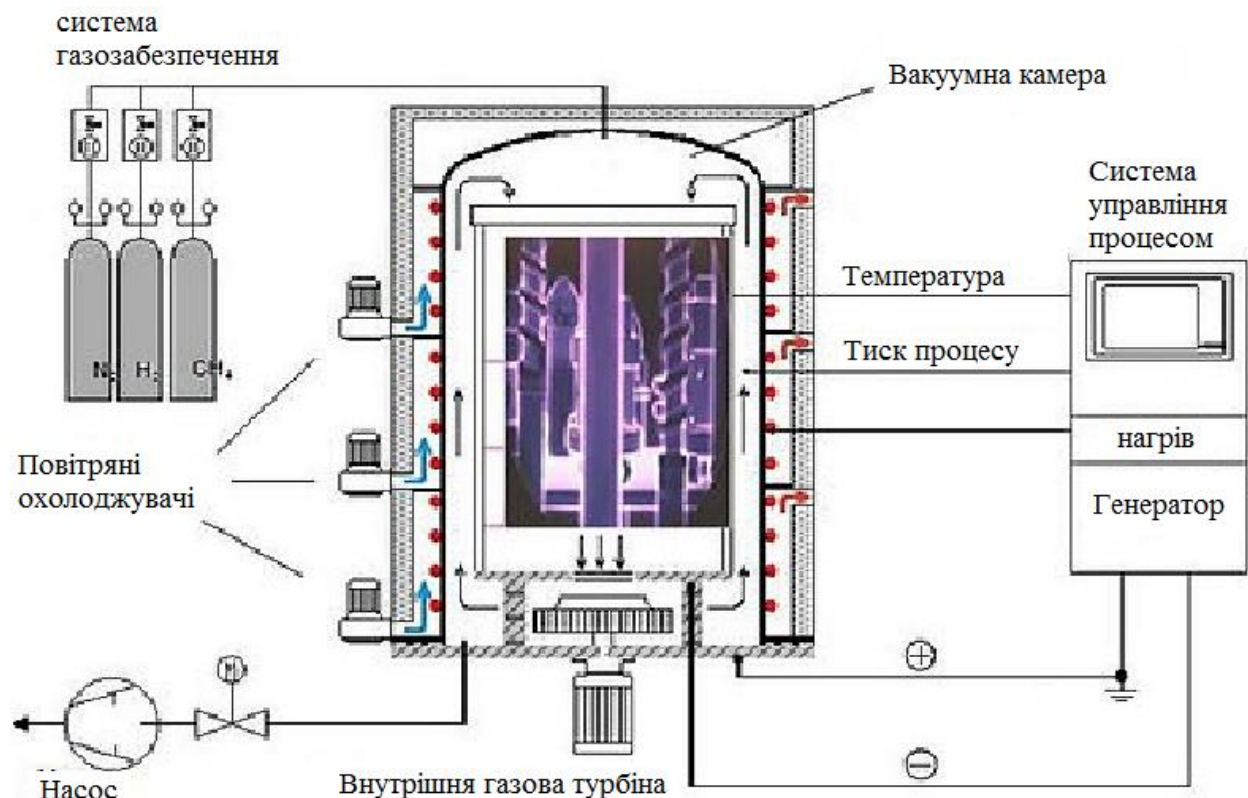


Рисунок 1.3 - Установа для азотування [7].

Сутність іонно-плазмового азотування полягає в тому, що в розрядженому до 200 Па азотомісткому газовому середовищі між катодом, на якому розташовуються оброблювані деталі, і анодом, в якості якого служать стінки вакуумної камери, збуджується аномальний тліючий розряд, який утворює активну середу (іони, атоми, збуджені молекули). Це забезпечує формування на поверхні виробу азотованого шару, що складається з зовнішньої нітридної зони і розташованої під нею дифузійної зони.

Варіюючи склад насичуючого газу, тиск, температуру і час витримки, можна отримувати шари заданої структури і фазового складу, забезпечуючи строго регламентовані властивості сталей, чавунів, титану і сплавів [7]. Оптимізація зміцнюючих властивостей поверхні забезпечується за рахунок необхідного поєднання нітридного і дифузійного шарів, які врастають в основний матеріал. Залежно від хімічного складу нітридний шар є або γ -фазою (Fe_4N) або α -фазою (Fe_{2-3}N). α -нітридний шар є корозійностійким, а γ -шар - зносостійким і пластичним [8]. При цьому, в залежності від цілей обробки, в результаті іонно-плазмового азотування можливо отримання:

- дифузійного шару з розвиненою нітридною зоною, що забезпечує високий опір корозії і припрацьовуваність для деталей, що працюють на знос;
- дифузійного шару без нітридної зони - для ріжучого і штампового інструменту і деталей, що працюють при знакозмінних навантаженнях в умовах зношування при високому тиску

В результаті іонного азотування можна поліпшити такі характеристики виробів:

- зносостійкість,
- втомну витривалість,
- теплостійкість,
- корозійну стійкість.

Основною перевагою методу є стабільна якість обробки з мінімальною похибкою властивостей від деталі до деталі і від садки до садки. У порівнянні з широко використовуваними способами зміцнюючої хіміко-термічної обробки

сталевих деталей, такими, як цементация, нітроцементация, ціанування і газове азотування в печах, метод іонно-плазмового азотування має наступні основні переваги:

- більш висока поверхнева твердість азотованих деталей,
- відсутність деформації деталей після обробки,
- підвищення межі витривалості і збільшення зносостійкості оброблених деталей,
- більш низька температура обробки, завдяки чому, в титані не відбувається структурних перетворень,
- можливість обробки глухих і наскрізних отворів,
- збереження твердості азотованого шару після нагрівання до 600 - 6500С,
- можливість отримання шарів заданого складу,
- можливість обробки виробів необмежених розмірів і форм,
- відсутність забруднення навколишнього середовища,
- підвищення культури виробництва,
- зниження собівартості обробки в кілька разів.

Переваги ІПА проявляються і в істотному скороченні основних витрат виробництва. Так, наприклад, в порівнянні з газовим азотуванням в печах, ІПА забезпечує [8]:

- скорочення тривалості обробки в 2 - 5 разів, як за рахунок зниження часу нагрівання та охолодження садки, так і за рахунок зменшення часу ізотермічної витримки,
- скорочення витрат робочих газів в 20 - 100 разів,
- скорочення витрат електроенергії 1,5 - 3 рази,
- зниження деформації настільки, щоб виключити фінішну шліфування,
- поліпшення санітарно-гігієнічних умов виробництва,
- повну відповідність технології всім сучасним вимогам з охорони навколишнього середовища.

У порівнянні з гартуванням обробка методом ІПА дозволяє:

- виключити деформації,
- збільшити ресурс роботи азотованої поверхні в 2-5 разів.

Для деяких виробів (шестерні великого діаметра та ін.) іонне азотування є єдиним способом отримання готового виробу з мінімальним відсотком браку. ІПА може використовуватися на виробництві замість рідинного і газового азотування, цементації, нітроцементації і ТВЧ-гарту. Крім того, процес ІПА забезпечує повну екологічну безпеку.

1.5 Іонно-плазмове азотування титанових сплавів

Роботи в цьому напрямку за способом реалізації процесу умовно можна розділити на три напрямки: ІА в тліючому розряді, ІА в дуговому розряді і комбінована іонна обробка титанових сплавів, яка також включає ІА. В свою чергу, роботи по ІА в тліючому розряді підрозділяються на традиційне ІА в тліючому розряді і ІА в тліючому розряді з порожнистим катодом (рисунок 1.4).[9]

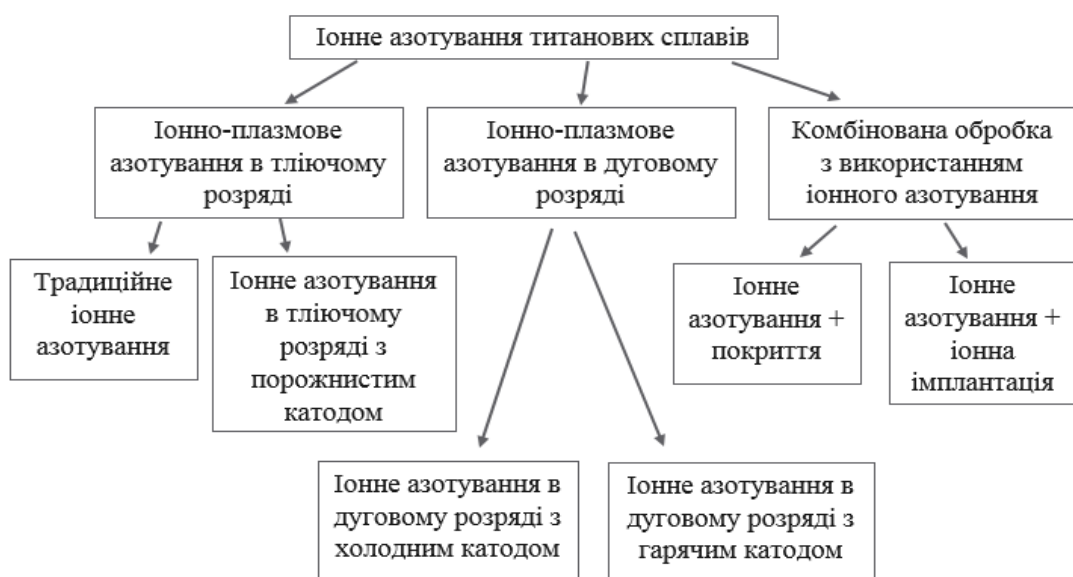


Рисунок 1.4 - Класифікація робіт, присвячених ІА титанових сплавів

Роботи по ІА в дуговому розряді розділені по використанню для реалізації розряду холодного або гарячого катодів. Комбінована іонна обробка поділяється на ІА з подальшим осадженням іонно-плазмових покриттів і ІА з подальшим ІІ.

1.5.1 Хіміко-термічна обробка титанових сплавів азотуванням

Для впливу на властивості поверхні титанових сплавів широко використовується хіміко-термічна обробка в газовому середовищі - процес ГА, який здійснюється при високих температурах (для титану реальна температура азотування 850 ... 1000 °С), внаслідок чого змінюються об'ємні характеристики і знижується конструкційна міцність матеріалу через укрупнення структурних складових. Процес вимагає тривалих витримок (30 ... 60 год. і більше). Подальшим розвитком методу хіміко-термічної обробки титанових сплавів стало використання дифузійного насичення азотом в плазмі газових розрядів (ІА), що дозволило разом з великою швидкістю насичення сплавів атомами азоту отримувати цілеспрямовано контрольовану структуру поверхневого шару при більш низькій температурі насичення (ніж при чисто ГА) і збереженні механічних властивостей матеріалу[9].

Основне призначення азотування титанових сплавів отримання твердого поверхневого шару, володіючого високою зносостійкістю при роботі в умовах тертя. При азотуванні підвищується також втомна міцність і корозійна стійкість деталей. На результати азотування істотний вплив роблять хімічний склад і структурні особливості титанових сплавів, що визначають характер взаємодії титану з азотом. За допомогою іонно-плазмового азотування можливе отримання дифузійного шару з розвиненою нітридною зоною, що забезпечує високий опір корозії і припрацьовуваність, для деталей, що працюють на знос, або дифузійного шару без нітридної зони – для ріжучого, штампового інструменту

або деталей, що працюють при високому тиску з знакозмінними навантаженнями.

1.5.2 ІА титанових сплавів в традиційно тліючому розряді

Для зменшення тривалості азотування, зниження температури процесу, збільшення поверхневої твердості, зносостійкості і корозійної стійкості титанових сплавів найбільшого поширення набуло ІА в тліючому розряді, що дозволило збільшити швидкість азотування в 3-5 разів у порівнянні з традиційною технологією ГА. Азотування в тліючому розряді має низку переваг в порівнянні з газовим: порівняно низькою витратою енергії; більшою енергією частинок, що бомбардують поверхню, що обумовлює на порядок меншу тривалість технологічного циклу, керованість і рівномірність обробки матеріалу. Перші роботи по ІА титанових сплавів в тліючому розряді були пов'язані з використанням при проведенні процесу досить високих температур і тисків азотомістких сумішей [10].

Результати, отримані в процесі ІА в тліючому розряді сплавів титану, легованих різними елементами. Для порівняння проведено ІА α - і $(\alpha + \beta)$ -сплавів. З α -сплавів досліджували ВТ1-0, а із сплавів зі структурою $(\alpha + \beta)$ - ВТ6, ВТ8. ІА зразків ВТ1-0 проводили при температурах нижче і вище температури поліморфного перетворення. Азотування при 800 °С показало, що біля поверхневого шару спостерігається тонкий (близько 2 мкм) твердий шар нітриду титану, а за ним зона товщиною близько 40 мкм з підвищеною твердістю, яка відповідає твердому розчину азоту в α -титані. Після азотування при 950 °С спостерігається межа між зоною α -твердого розчину, в якому не відбулося перетворення, і зоною α -твердого розчину, який сформувався при охолодженні

твердого розчину. Отже робимо висновок, що температура азотування істотно впливає на структуру і, очевидно, буде впливати і на властивості сплаву.

На рисунку 1.5 показані залежності мікротвердості сплаву BT1-0 від глибини азотованого шару і температури азотування.

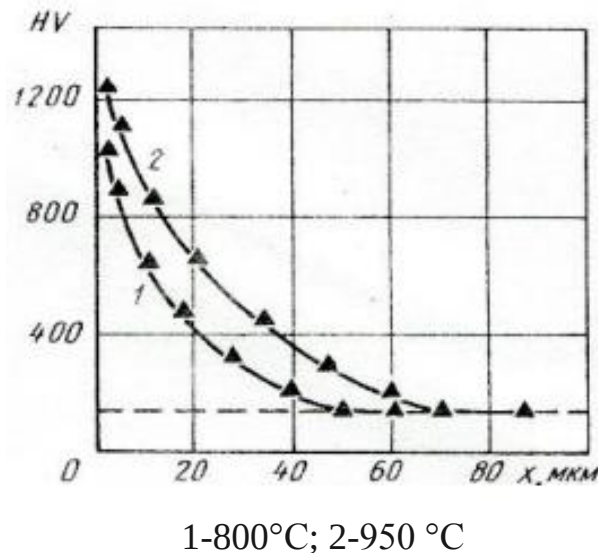


Рисунок 1.5 - Залежності мікротвердості від глибини азотованого шару сплаву BT1-0 після обробки в середовищі азоту при температурах [10].

При азотуванні сплаву BT6 в середовищі азоту протягом 8 ч мікротвердість зростає від 240 (вихідна) до 820 (600 °C), 1550 (800 °C) і 2100 HV(1000 °C). При температурі азотування 650 °C на протягом 8 год в сплаві BT6 отримана товщина азотованого шару 70 мкм, в сплавах BT9 - 150, BT8 - 200 мкм. Зносостійкість ($\alpha + \beta$)-сплавів титану після ІА виросла в кілька разів в порівнянні з вихідними неазотованими зразками. В роботі ІА сплавів TC4 і TA7 (BT6 і BT5-1) проводилося протягом 16 год при 900 °C. Отримано азотований шар, що складається з нітридного і дифузійного шарів загальною товщиною близько 100 мкм і поверхневою твердістю близько 1200 HV. Проводився дослід ІА сплаву Ti-6Al-4V. [10] Умови експерименту: газова суміш - азот з добавкою аргону (концентрація 1: 1), тиск - 40 Па, температура – 900 °C. Результати показують, що середні значення твердості і модуля пружності для поверхні азотованого шару складають 17,36 та 328,81 ГПа, що приблизно в 6 і 3 рази вище, ніж у

вихідного матеріалу. Також пропонується в якості альтернативи високотемпературного азотуванню - низькотемпературне (до 700 °C) азотування в тліючому розряді в безводневих насичених середовищах. ІА проводили в тліючому розряді при таких параметрах: температура - від 540 до 680 °C; тиск у вакуумній камері - від 240 до 400 Па; зміст аргону в суміші з азотом (Ar в об'ємних відсотках) від 25 до 95% і тривалість дифузного насичення $\tau = 6$ ч.

На рисунку.1.5 наведені залежності товщини дифузійної зони від технологічних параметрів азотування для титанового сплаву BT8.

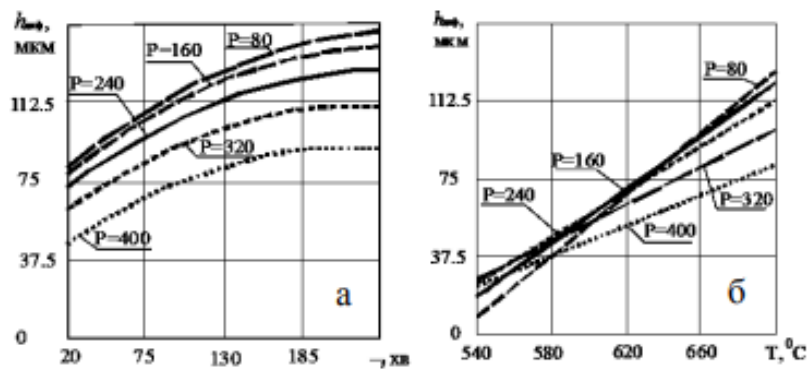


Рисунок 1.6 - Вплив технологічних параметрів азотування на товщину дифузійної зони титанового сплаву BT8 [9]

В роботі показано, що для досліджуваних титанових сплавів товщина азотованого шару зростала при збільшенні часу дифузійного насичення по параболічній залежності і при збільшенні температури процесу ІА, і зменшенні тиску у вакуумній камері (рисунку 1.6). Такий вплив температури азотування і тиску в вакуумній камері на збільшення товщини азотованого шару пояснюється збільшенням енергії активації процесу дифузійного насичення. Товщина зміцненого шару при азотуванні в тліючому розряді титанових сплавів залежить від азотного потенціалу в насиченому газовому середовищі.

1.5.3 ІА в тліючому розряді з порожнистим катодом

Для ІА в тліючому розряді використовували ефект полого катода (ЕПК), що дозволило збільшити швидкість насичення титанових сплавів азотом і проводити локальну обробку. Для створення порожнього катода на відстані 5 ... 7 мм від оброблюваної поверхні встановлювався спеціальний екран в вигляді сітки. Оброблювана деталь і екран перебували під негативним потенціалом і утворювали порожнину - порожнистий катод (рисунку 1.7).

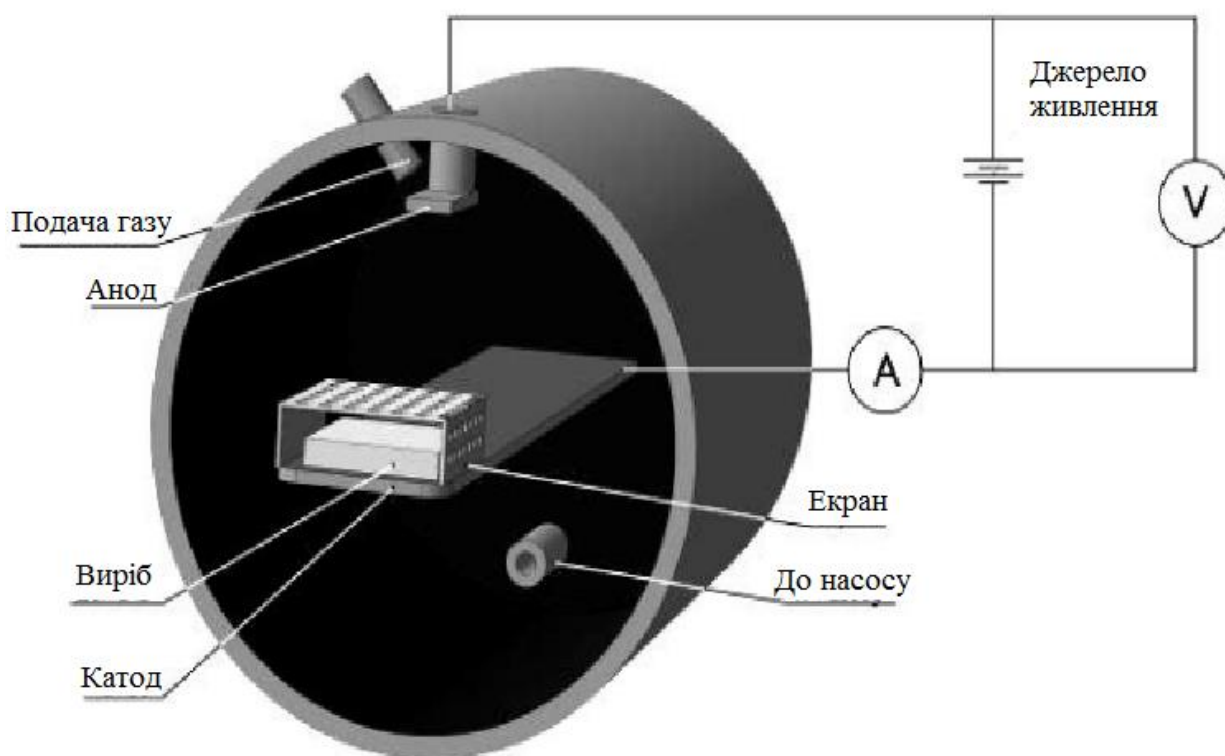


Рисунок 1.7 - Установка для реалізації способу азотування в тліючому розряді з ЕПК [9].

В тліючому розряді з порожнистим катодом в результаті осциляції електронів усередині нього вдається сформувати плазму з підвищеною концентрацією заряджених частинок в порівнянні зі звичайним тліючим

розрядом. Це дозволило отримувати більш високий іонний струм при азотуванні, знизити мінімальну напругу горіння розряду і робочий тиск.

Умови азотування - з проявом ЕПК:

$P = 80$ Па, струм розряду $I = 1,5$ А і напруга розряду $U = 600$ В; без ЕПК: $P = 300$ Па, струм розряду $I = 3$ А і напруга розряду $U = 600$ В.[9]

Залежності мікротвердості титану ВТ1-0 від глибини азотованого шару при наявності і без ЕПК показані на рисуюнок 1.8.

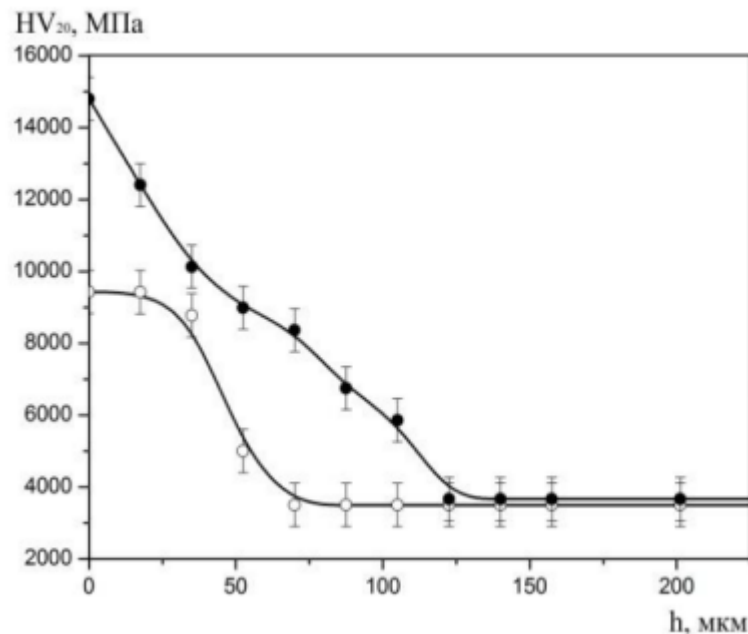


Рисунок 1.8 - Зміна мікротвердості по глибині азотованого шару: без ЕПК (○) і з проявом ЕПК (●) [9].

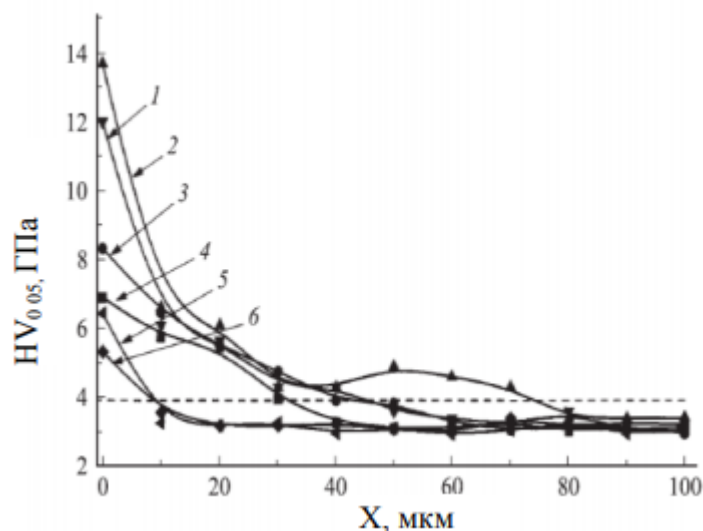
Підвищення мікротвердості обумовлено утворенням нітридів титану на поверхні зразків. Мікротвердість зразків після азотування в умовах прояву ЕПК в 1,6 рази вище, ніж без ЕПК. Використання тліючого розряду з порожнистим катодом дозволило знизити робочий тиск від 300 до 60 Па.

Для зниження робочого тиску і отримання мінімальної напруги горіння розряду при азотуванні титанових сплавів в тліючому розряді з порожнистим катодом використовували інжекцію швидких електронів з плазми додаткового дугового розряду з холодним порожнистим катодом в плазму тліючого розряду.

Така зовнішня інжекція заряджених частинок в порожнистий катод дозволяє піти в сторону більш низьких тисків при збереженні всіх позитивних якостей звичайного тліючого розряду і реалізувати режими як самостійного, так і несамостійного тліючого розряду з порожнистим катодом.

Результати дослідження азотування титану VT1-0 при низькому тиску протягом 4,5 год при температурах 450 ... 750 ° С в плазмі тліючого розряду з порожнистим катодом. У плазмі з концентрацією $n = 10^{10} \dots 10^{11} \text{ см}^{-3}$ дифузійне насичення титану азотом відбувалося при щільності іонного струму на катоді 1,6 ... 4,0 мА / см². Виявлено формування градієнтної структури с зависокою (14 ГПа) мікротвердістю на поверхні (рисунок 1.8).

Збільшення температури від 450°C до 750°C призводило до збільшення мікротвердості в 2,2 рази. На поверхні формувалася багатошарова структура з високою мікротвердістю, що складається з шарів нітриду титану, дифузійного насичення і термічного впливу, плавно переходить в основний обсяг матеріалу. Мікротвердість поверхні підвищувалася зі збільшенням щільності іонного струму і напруги горіння розряду.



1, 3, 5 – тильний і 2, 4, 6 – лицьовий бік зразка

Рисунок 1.9 - Профілі мікротвердості титану VT1-0 після азотування в тліючому РПК при низькому тиску і температурах: 1, 2 - 750; 3,4 - 550; 5,6 - 450 °С [10].

Метод ІА в тліючому розряді найбільш вивчений, широко застосовується в промислових умовах. Досягнуто великі глибини (до 200 мкм) і мікротвердості азотованих шарів (до 20 ГПа). Однак існуючі на сьогоднішній день технологічні процеси ІА в тліючому розряді проводяться або при відносно високих температурах (700°C ... 800 °C), або при великій тривалості процесу (6 ... 10 год) при 550 ... 650 °C, що може приводити до знеміцнення серцевини деталей з деяких титанових сплавів. Можливості щодо підвищення економічності, інтенсифікації процесу азотування в тліючому розряді обмежені через труднощі, пов'язані з подальшим зниженням робочого тиску і зростанням щільності струму, що обумовлено умовами існування тліючого розряду.

1.5.4 ІА у дуговому розряді

Використання для ІА плазми дугового розряду, який характеризується низькою напругою горіння, високою щільністю плазми (до 10^{18} м^{-3}), високим значенням розрядного струму і широким діапазоном тисків, при яких він стабільно запалюється і горить, є одним з перспективних варіантів вирішення проблем, які виникають при проведенні процесу ІА в тліючому розряді[10]. Метод ІА в плазмі дугових розрядів дозволяє істотно знизити температуру і тривалість поверхневої обробки.

ІА в плазмі дугових розрядів проводиться або з холодним катодом (двоступеневий вакуумнодуговий розряд, який реалізується за допомогою електродугового випарника), або з гарячим термодіємним катодом (з використанням джерела газової плазми). Перевагами ІА в дуговому розряді перед традиційним ІА в тліючому розряді є: більш висока концентрація заряджених частинок в плазмі дугового розряду, менше насичення воднем

азотованих деталей, проведення процесу ІА в більш чистих вакуумних умовах при тиску азоту на 1- 2 порядки нижче.

1.5.5 ІА у дуговому розряді з холодним катодом

Даний метод дозволяє знизити температуру процесу ІА до 500 ... 600 °С і зменшити тривалість обробки в порівнянні з азотуванням в тліючому розряді. Було встановлено, що при азотуванні титанових сплавів ВТ20 і ВТ6, що містять 7 ... 10% β -фази, при ІА досягається максимальна глибина дифузійного шару. Це пояснюється більш високою дифузійної рухливістю азоту в β -фазі. Дана технологія забезпечує не тільки формування протяжної дифузійної зони твердого розчину азоту в титані, а й створення термодинамічно стійких поверхневих шарів δ - (TiN) і ε - (Ti²N) - нітридів. Створення такої поверхневої градієнтної мікроструктури істотно збільшує і антикорозійну стійкість поверхні, роблячи її практично інертною в біологічних середовищах. Розмір структурних складових в двофазних титанових сплавах впливає на процес азотування: з підвищенням дисперсності α -фази збільшується протяжність дифузійної зони з утворенням α -твердого розчину (таблиця 1.2) і зменшується кількість нітридних фаз на поверхні [10].

Таблиця 1.2 - Вплив розміру частинок α -фази на глибину дифузійної зони

Розмір частинок α фази, d	h , мкм	$H_{0,05}$, МПа до азотування	$H_{0,05}$, МПа після азотування
0.5...0.9 мкм	32	4300	6100
3...5 мкм	26	3400	5200

1.5.6 ІА у дуговому розряді з термоемісійним катодом

Наявність в плазмовому потоці, генерованого дуговими розрядами з холодним катодом, великої кількості мікрокрапель матеріалу, катода що розпилюється накладає деякі обмеження на використання їх в процесах модифікації поверхні. Дугові розряди з напруженим катодом дозволяють отримувати відносно чисту (безкрапельну) газорозрядну плазму при азотуванні. Такі системи забезпечують широкий діапазон регулювання щільності плазми. Діапазон робочих тисків таких систем знаходиться в межах 0,01 ... 5 Па. Наявність додаткових регулювань (струмів напруження, анода і живлення котушок соленоїда для створення магнітного поля) дозволяє забезпечувати незалежне регулювання таких параметрів процесу ІА, як розрядний струм і потенціал підкладки. У роботах проведені дослідження по вивченню впливу основних параметрів процесу низькотемпературного азотування в плазмі несамотійного дугового розряду низького тиску на структуру і властивості поверхні титанового сплаву ВТ1-0 в двох структурних станах: крупнозернистому (КЗ) і субмікрокристалічній (СМК). Азотування проводилося при температурі $< 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ в суміші газів - азот-аргон. В результаті азотування на зразках в СМК-стані отримано більше збільшення мікротвердості (4,8 ГПа), ніж на зразках в КЗ-стані (3,5 ГПа). Різний характер впливу ІА на властивості поверхневих шарів титанового сплаву з різним розміром зерен пояснюється тим, що, хоча згідно з літературними даними дифузія при ІА носить об'ємний характер, проте подрібнення структури матеріалу призводить до зростання протяжності кордонів і посилення вкладу межзернової дифузії, яка характеризується більш високими швидкостями. Все це сприяє формуванню більш протяжної дифузійної зони і зменшення товщини нітридного шару в СМК титані.

Також вивчалось іонно-плазмове азотування в плазмі несамотійного дугового розряду на нанотвердість і модуль пружності титанового сплаву,

виміряний за допомогою наноіндентора. На рисунку 1.10 показана залежність нанотвердості поверхні від глибини проникнення індентора для вихідного зразка (1) і зразків після ІА при 500, 550 і 600 °С.

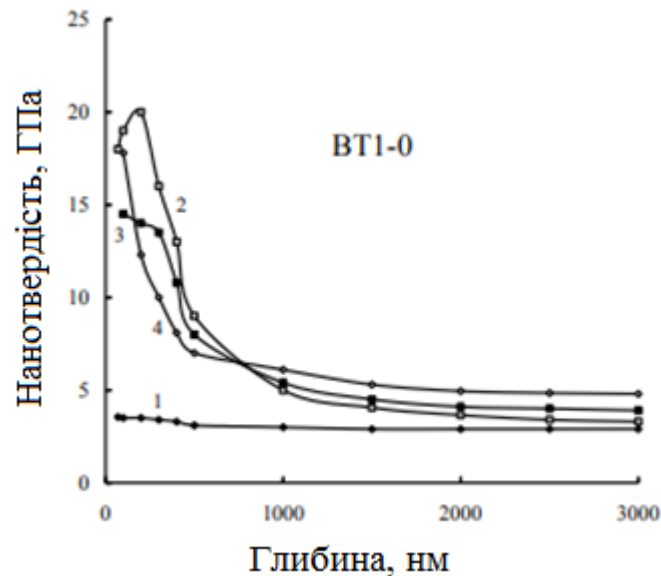


Рисунок 1.10 - Залежності нанотвердості поверхні від глибини проникнення індентора для вихідного зразка (1) і зразків після ІА протягом 2 год при температурах: 500 (2); 550 (3); 600°С (4) [10]

Процес іонно-плазмового азотування проводили в азотній плазмі, отриманій за допомогою джерела газової плазми (ДГП), при негативній напрузі на підкладці 300 ... 400 В. Внаслідок бомбардування іонами азоту поверхню зразків нагрівалася до температури дифузії, і вироблялося насичення поверхні азотом. Регулювання структури і фазового складу азотованого шару проводилося зміною робочих режимів ІГП. Тривалість процесу азотування при робочій температурі 500 ... 600 °С становила 2 ч. Як показали результати вимірювань, ІА титанового сплаву BT6 призводить до формування на поверхні градієнтної по твердості структури. Максимальна твердість азотованого шару сягала 20 ГПа (Початкова твердість - 3,2 ГПа). При цьому збільшення температури зразків в процесі ІА від 500 до 600 °С призводило до зростання

глибини азотованого шару. В результаті ІА зростала стійкість сплаву до корозії і кавітаційного зносу.

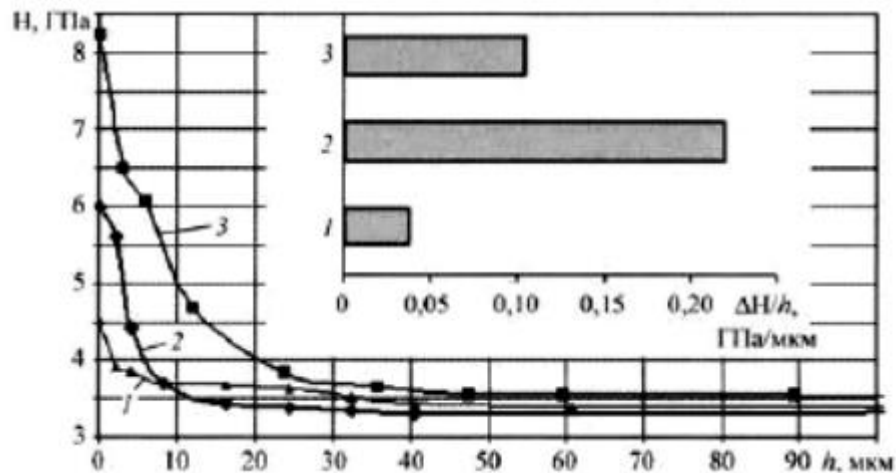
1.5.7 Комбіноване ІА титанових сплавів

Останнім часом інтерес різних дослідників приваблює можливість модифікації властивостей поверхні титанових сплавів використанням комбінацій різних методів іонно-плазмової обробки, що включають ІА, осадження покриттів і П. Такі комбінації різних методів обробки дозволяють поєднувати їх гідності, підвищити зносостійкість і термін служби оброблених виробів. Комбіновані методи обробки, що включають ІА і осадження іонно-плазмових покриттів, раніше успішно використовувалися для модифікації властивостей поверхні титану. Так, розглянута вакуумно-дугова модифікація поверхонь сталевих виробів, яка полягала в їх азотуванні в дуговому розряді при позитивному потенціалі і надалі осадженні надтвердих покриттів з П в процесі їх нанесення. Для підвищення зносостійкості титанових деталей парових турбін використовували процес, що складається з ІА поверхні деталей з подальшим нанесенням зносостійкого нітрідного покриття MoN. Максимальна глибина зміцнення досягала 170 ... 180 мкм, твердість нітрідного покриття перевищила твердість сталевих основи більш ніж на порядок величини.

Також існує можливість отримання вакуумно-плазмових наносферних покриттів для лопаток турбомашин з титанових сплавів сполученням процесів електродугового осадження і П. Є результати дослідження стійкості до крапельно-ударної ерозії, сольової корозії і газоабразивної ерозії. На поверхні лопатки проводили вакуумно-плазмові осадження обраного металевих підшару і наносфер з нітрідів або карбонітридов алюмінію, або сполук титану, цирконію і алюмінію з азотом[10]. При цьому після осадження підслою і кожного наносферу проводили його П-обробку. Результати експериментів показали

збільшення стійкості титанових лопаток після описаної обробки до сольової корозії (до 1,5 рази), крапельно-ударної ерозії (до 2,1 рази) і газоабразивної ерозії (в 2,5 рази) в порівнянні з покриттями без обробки.

Існують способи формування зносостійких шарів на титанових сплавах різними методами азотування, а також їх поєднанням. В якості базового методу розглянуто ГА, яке комбінували з азотуванням в тліючому розряді (АТР), а також ІІ. Проаналізовано фазовий склад нітридних шарів і особливості газонасичення. Вивчено мікротвердість і шорсткість поверхні, а також зносостійкість покриттів. На рисунку 1.10 показані розподіл і градієнт мікротвердості по перетину зміцненого поверхневого шару металу ВТ6 після азотування.



1 - ГА; 2 - ГА + ІІ; 3 - ГА + АТР

Рисунок 1.11 - Розподіл і градієнт мікротвердості по перетину зміцненого поверхневого шару сплаву ВТ6 після азотування[10].

Поєднання ГА з іншими способами азотування дозволяє підвищити зносостійкість титанових сплавів. Найбільш сприятливим поєднанням є послідовним проведення ГА і АТР, оскільки це не тільки ефективніше підвищує зносостійкість нітридної поверхні, але і в найбільшій мірі сприяє збереженню механічних властивостей титанової матриці. Автори пояснюють це тим, що послідовне проведення ГА і АТР дозволяє формувати азотований шар з

нітридною плівкою на поверхні при плавному градієнту твердості по перетину приповерхневих шарів (рисунок 1.11), що більш сприятливо з точки зору забезпечення високих властивостей.

1.5.8 Формування дифузійних шарів при ІА титанових сплавів

В результаті аналізу наукової літератури можна відзначити загальні тенденції, характерні для різних способів ІА титанових сплавів, які проявляються при формуванні дифузійних шарів. На формування дифузійних шарів надають вплив хімічний склад, структура титанових сплавів, а також параметри ІА (температура, тривалість процесу, тиск, склад газової суміші, концентрація газів). Вплив хімічного складу і структури титанових сплавів на формування дифузійних шарів при азотуванні пов'язан з особливостями взаємодії азоту з α - і β -фазами, з впливом фазового складу, ступеня легування фаз, кінетики фазових перетворень на дифузійну рухливість азоту [11].

Хімічний склад титанового сплаву визначає кількісне співвідношення α - і β -фаз. так, збільшення в структурі титанових сплавів кількості β -фази до 30% призводить до збільшення в 1,4 рази глибини азотованого шару в порівнянні з чистим титаном за рахунок більш високої швидкості дифузії азоту в β -фазі . Легування титану α -стабілізаторами (наприклад, алюмінієм) сприяє прискоренню дифузії азоту в глиб матеріалу. У той же час легування титану β -стабілізаторами (наприклад, ванадієм і молібденом) призводить до уповільнення дифузії азоту в титані. Розмір структурних складових в двофазних титанових сплавах впливає на процес ІА: з підвищенням дисперсності α -фази збільшується протяжність дифузійної зони з появою α -твердого розчину і зменшується кількість нітридних фаз на поверхні.

Різний характер зміни структури поверхневих шарів титанового сплаву з різним розміром зерен після ІА пояснюється тим, що подрібнення структури матеріалу призводить до зростання протяжності кордонів і посилення вкладу межзернової дифузії, яка характеризується більш високими швидкостями.

Глибина і поверхнева твердість азотованого шару залежать від ряду факторів, у тому числі основними є температура ІА, тривалість азотування і склад титанового сплаву. З підвищенням температури азотування швидше протікає дифузія азоту в титановий сплав і збільшується глибина азотованого шару.

При високій температурі ІА (вище температури поліморфного перетворення) в матеріалі сплаву відбуваються мікроструктурні перетворення, і значно зменшуються характеристики міцності і пластичності основи, що пояснюється укрупненням зерна. При цьому досягається висока твердість поверхні сплавів, однак різко зменшуються пластичність азотованих шарів і межа міцності при розтягуванні матеріалу [11].

Зі збільшенням тривалості азотування збільшується глибина азотованого шару. Для титанових сплавів товщина азотованого шару зростала при збільшенні часу дифузійного насичення по параболічній залежності, збільшенні температури процесу азотування і зменшенні тиску у вакуумній камері. Такий вплив температури азотування і тиску у вакуумній камері на збільшення товщини азотованого шару пояснюється збільшенням енергії активації процесу дифузійного насичення. При обробці хімічно активного титану утворюється на поверхні шар нітриду титану також істотно перешкоджає проникненню азоту в глиб зразка. Виявлено загальну для всіх перехідних металів закономірність, обумовлена максимальною дифузійною рухливістю азоту в твердому розчині і уповільненням дифузії азоту в нітридних фазах. У цьому випадку збільшення ефективності іонного травлення оброблюваних поверхонь протягом процесу азотування, наприклад шляхом зниження тиску робочого газу, також представляється доцільним. Зниження тиску і перехід катодного шару в безштовхувальний режим призводять до збільшення енергії бомбардування

поверхні іонами, що сприяє генерації в поверхневому шарі вакансій, що прискорюють дифузію атомів азоту.

Іншим методом інтенсифікації процесу азотування є збільшення концентрації азоту в атомарному стані, що можливо як шляхом підвищення щільності іонного струму, так і формуванням плазмоутворюючої суміші азоту з аргоном. Аргон, що має масу іона, яка перевершує масу іона азоту, активно розпилює нітрідну зону, що утворюється на поверхні виробу в процесі азотування. Одночасно з цим при пружному зіткненні іонів азоту з атомами кристалічної решітки в тонкому поверхневому шарі металу зростає щільність дефектів – дислокацій [11]. Підвищення щільності дислокацій збільшує провідну здатність дифузійної зони, приводячи до зростання частки об'ємної дифузії. На відміну від ГА при ІА роль граничної дифузії зменшується. На початкових стадіях процесу значна частина азоту дифундує не по кордону, а за обсягом зерен, переважно по дислокаційним каналам.

На поверхні титанових сплавів внаслідок азотування утворюється тонкий твердий нітридний шар - виділення нітридів Ti_2N і TiN . Азот дифундує у напрямку до металевої підкладки, утворюючи дифузійну зону, що складається з твердого розчину впровадження азоту в титані. Варіюючи склад насичуючого газу, тиск, температуру і час витримки, можна отримати шари заданої структури і фазового складу, забезпечуючи строго задані властивості титанових сплавів. При цьому в залежності від цілей обробки в результаті ІА можна отримати дифузний шар з розвиненою нітридною зоною, що забезпечує високий опір корозії і припрацьовуваність для деталей, що працюють на знос. А можна отримати дифузний шар без нітридної зони для інструментів і деталей, що працюють при знакозмінних навантаженнях в умовах зношування при високому тиску.

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Матеріал дослідження

Матеріалом для виготовлення деталі був обраний титановий сплав з підвищеною міцністю VT8. Деформований жароміцний титановий сплав - системи Ti - Al - Mo - Si належить до двофазних сплавів зі структурою $\alpha + \beta$ мартенситного класу. Цей сплав так само, як і сплав VT3-1, здатний зміцнюватися термічною обробкою. Сплав VT8 за жароміцністю перевершує сплав VT3 1 при температурах 450 - 500 °C [12].

Сплав VT8 є серійним і застосовується в основному для деталей компресора, що працюють до 6000 год і більше при температурах до 500 °C

Зі сплаву освоєно серійне виробництво чотирьох видів напівфабрикатів: катані прутки діаметром 20 - 60 мм, пресовані прутки діаметром 10 - 70 мм і ковані прутки діаметром 65 - 250 мм, профілі пресовані і катані, кільця розкатні і зварні з профілів, різні поковки і штамповки. В дослідному порядку можуть виготовлятися труби, смуги і плити.

Сплав VT8 був розроблений в 1958 р. в результаті дослідження потрібної системи Ti -Al - Mo.

У зв'язку з підвищенням чистоти титанової губки проведено коригування хімічного складу цього сплаву, що дозволило зберегти і навіть підвищити його жароміцні властивості.

Титановий сплав має високу корозійну стійкість. Сплав VT8 забезпечує більш високі характеристики міцності і жароміцні властивості в порівнянні зі сплавом VT6 за рахунок високого вмісту алюмінію і легування кремнію. Сплав VT8 (і VT8-1 і VT8-1M) перевершує сплави VT3-1 і VT9 по термічній стабільності, пластичності, технологічності і характеристикам тріщиностійкості. Подвійний і ізотермічний відпал забезпечує оптимальне поєднання властивостей; зміст β - фази в відпаленому сплаві приблизно 10%. Сплав термічно зміцнюється. Сплав задовільно деформується в гарячому стані [12].

Таблиця 2.1 - Хімічний склад титанового сплаву BT8

Fe	C	Si	Mo	N	Ti	Al	Zr	O	H
до 0.3	До 0.1	0.2-0.4	2.8-3.8	до 0.05	87.55 - 90.9	5.8-7	до 0.5	до 0.15	до 0.015

Двофазний титановий сплав на основі BT8 (Ti-Al-Mo-Si) Встановлено, що модифікування бором забезпечує подрібнення розміру вихідних β -зерен і α / β колоній в злитку приблизно на порядок, а легування цирконієм додатково подрібнює розмір колоній в зливку. Легування сплаву BT8 цирконієм в кількості 20 мас.% Знижує температуру $\alpha + \beta \rightarrow \beta$ перетворення приблизно на 100 ° C, що разом з подрібненням структури злитка сприяє поліпшенню деформування сплаву при підвищених температурах [12].

Напівфабрикати зі сплаву BT8 можна піддавати термічній обробці за таким режимом: нагрів при 920 ° C, витримка 1 - 4 год, охолодження на повітрі; потім нагрів при 590 ° C, витримка 1 год, охолодження на повітрі. Це основний режим, що застосовується для деталей, які тривало працюють при температурах до 500 ° C

Режим термічної обробки вибирається в залежності від призначення деталей і необхідного рівня властивостей. Зміцнююча термічна обробка зберігає свою ефективність тільки при температурах експлуатації не вище 450 ° C. [12]

Щільність сплаву BT8 після відпалу при 20 ° C складає 4480 кг/м³. Температура ($\alpha + \beta$) - β перетворення 1000 + 20 ° C. Коефіцієнт лінійного термічного розширення сплаву BT8 після відпалу залежно від температури наведено на таблиці 2.2

Таблиця 2.2 - Коефіцієнт лінійного термічного розширення сплаву BT8

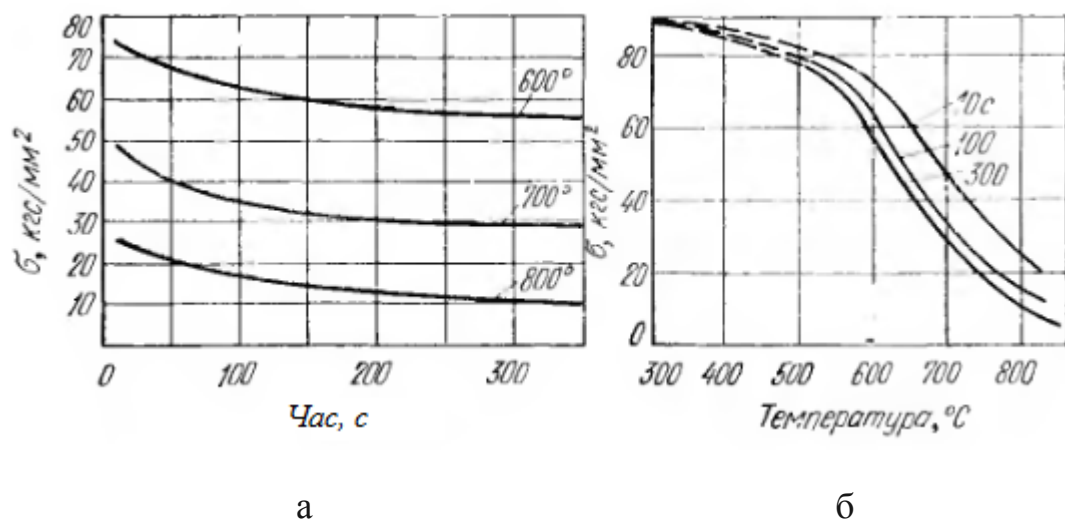
Температура, °C	25	100	200	300	400	500	600	700
λ , Вт/(м*град.)	7.1	8.4	9.6	11.3	12.6	14.2	15.5	16.8

Основні механічні властивості сплаву ВТ8 (ковані прутки діаметром 14 - 25 мм з мікроструктурою кошика) після подвійного випалювання і зміцнюючої термічної обробки (загартування + старіння).

Таблиця 2.3 - Механічні властивості сплаву ВТ8

Форма	σ_B	δ_5	ψ	КСУ	Термообробка
Пруток	930-980	6-8	15-20	200-300	Відпал

Короткочасна міцність сплаву ВТ8 після подвійного відпалу при різних температурах за час до 300 с приведена на рисунку 2.3 (а) залежно від часу випробування і на рисунку 2.3 (б) залежно від температури випробування. При 600 ° С зі збільшенням часу до 300 з міцність незначно знижується з 65 до 59 кгс/мм².



а - Залежність σ від часу випробування; б - Залежність σ від температури випробування

Рисунок 2.3 – Короткочасна міцність ВТ8 після подвійного відпалу [12].

2.2 Отримання іонно-плазмового шару

Можливе нанесення іонно-плазмового азотування за допомогою установки ЙОН20И-2. Роздивимось детально основні вузли установки ЙОН20И-2



Рисунок 2.4 - Робоча плита

Робоча плита (катод) ізолювана електрично від стін камери (анод) за допомогою опорних ізоляторів типу ІС-7 (рис. 2.5) [13]. Вона електрично пов'язана з негативним полюсом випрямляча через прохідний ізолятор типу ІП-7 (рис. 2.5)



Рисунок 2.5 – Ізолятор

Основне призначення ізолятора ІП-7 електрично ізолювати робочу плиту (катод) від робочої камери (анод). [13] Крім того, вони беруть на себе навантаження оброблюваних деталей. Складаються з трьох металевих опор, ізольованих між собою ізоляційними тілами, виготовленими із спеціальної кераміки. Для забезпечення правильної роботи і якісної ізоляції необхідно дотримуватись вказаним зазорам (0,7-0,8 мм) між металевими частинами у зібраному вигляді.



а



б

а - в складеному виді; б – в розібраному виді

Рисунок 2.6 – Прохідний електрод

Для зміни температури оброблюваних деталей змонтований пластичний термоелемент.

Для збереження термоелемента від розряду, його активна частина знаходиться в кварцовій трубці, котра заздалегідь вставлена в отвір, передбачений в оброблюваних деталях. Електрична ізоляція і вакуумне ущільнення термоелемента здійснюється прохідним ізолятором, відповідно в зібраному і розібраному вигляді.

Важливу роль має водоохолоджувальна система. Економне споживання охолоджуючої води є характерною рисою схеми. Вода рухається з великою швидкістю по замкнутому контуру за допомогою циркуляційного насоса (рисунок 2.7 -1).



Рисунок 2.7 - Водоохолоджувальна система

Таким чином здійснюється рівномірний розподіл температури по всіх частинах обох робочих камер, незалежно від того яка з них працює в даний момент. Підтримання постійної температури здійснюється автоматично за допомогою позиційного регулювання припливу холодної води за допомогою електромагнітного вентиля (рисунок 2.8 - 2). Комп'ютер отримує сигнал від датчика, змонтованого на камері і управляє електромагнітним вентилям. Початкове наповнення системи водою здійснюється шляхом відкриття ручного запірної крана (рисунок 2.8 - 3). Зазначенням, що система наповнилася є той момент, коли вода починає витікати вільно через зливну трубу, після чого

запірний кран треба закривати. У разі несправності в водоохолоджуючій системі або при відсутності охолоджуючої води, а також по досягненню температури води 80°C , інсталяція вимикається автоматично[13].

Кожна з робочих камер має самостійну вакуумну систему. Це дозволяє вакуумувати і девакуумувати кожну камеру, незалежно одну від одної. Вакуумна система складається з вакуумного насоса, ел.пневматичних вентилів для вакуумування і девакуумування і мастиловник, датчика тиску, сильфонів, приєднувальних труб і арматури тур. (рисунок 2.8)



Рисунок 2.8 - Вакуумна система

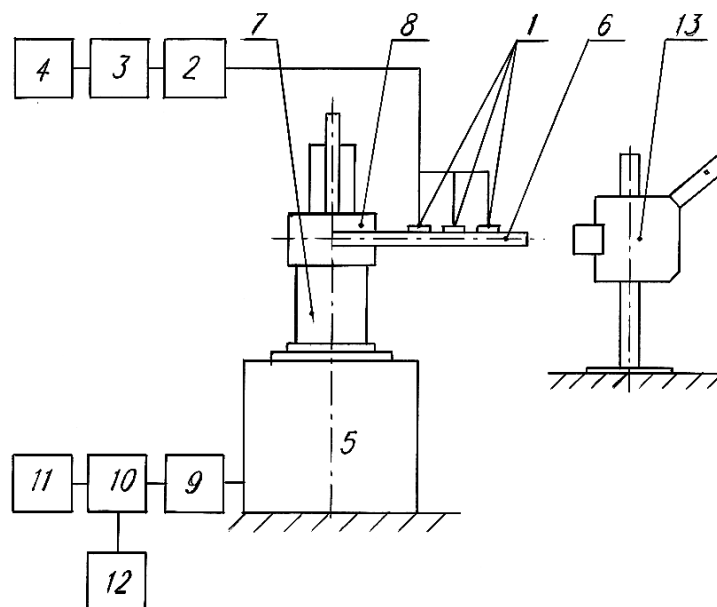
2.3. Методи дослідження робочої лопатки компресора ГТД

2.3.1 Випробування на втомну міцність

Випробування лопаток на втому [14] проводили способом динамічного збудження в них коливань за першою вигнутою формою на електродинамічному вібростенді ВЭДС-200, оснащеному пристроєм автоматичної підтримки заданих динамічних навантажень і виведенням інформації на друк.

В експлуатації напруги в лопатках за першою вигнутою формою значно вище, ніж за іншими формами коливань.

Відомо, що напруги за крутильною формою з частотою $f = 2000 \dots 2100$ Гц рівні $\sigma_{\max} = \pm 22$ МПа, за другою вигнутою формою з часто-частою $f = 2500 \dots 2860$ Гц - $\sigma_{\max} = \pm 1,5$ МПа, за високочастотною формою з часто-частою $f = 8000 \dots 9350$ Гц $\sigma_{\max} = \pm 44$ МПа.



1 - тензодатчики; 2 - комутатор; 3 - тензопідсилювач ТУП-4; 4 – мілі-
вольтметр В7-27; 5 - вібростенд ВЭДС-200; 6 - лопатка; 7 - стійка; 8- захоплення
пристосування; 9 - кінцевий підсилювач; 10 - передпідсилювач; 11 - генератор;
12 - частотометр ЧЗ-32; 13 - мікроскоп.

Рисунок 2.9 - Установка для дослідження лопатки [14]

Лопатка на вібростенді (рисунок 2.9) кріпиться в спеціальному замку і досліджується в резонансному режимі. У процесі випробувань рівень заданої напруги контролюється за допомогою бінокулярного мікроскопа МБС-9 за розмахом коливань пера лопатки. Досвід досліджень показує, що визначення межі витривалості на стандартних зразках для оцінки впливу технологічних факторів на опір втоми лопаток компресора може призвести до значного спотворення результатів. Лопатка має складний профіль зі змінним перерізом пера і тонкими кромками, що практично неможливо відтворити на зразках. Однак проведення масових випробувань натурних лопаток компресора з титанових сплавів на базі $N = 108$ циклів є важковиконаним і дорогоцінним завданням. Тому такі тривалі випробування доцільно проводити для остаточної оцінки ефективності фінішних оздоблювально-зміцнюючих методів. Для вибору оптимального режиму нанесення дифузійних покриттів і деформаційного зміцнення, оцінки ефективності технологічних заходів можна цілком коректно проводити випробування лопаток на базі $N = 2 \times 10^7$ циклів з визначенням обмеженої межі витривалості і параметрів розсіювання довговічності.

Лопатки випробовували на втому за ОСТ 100870-77 - стандартним методом і прискореним методом "сходів"[15].

Стандартний метод застосовували для побудови усередненої кривої втоми. За межу витривалості приймали ту амплітуду напружень, при якій без руйнування витримували задану базу випробувань ($N = 108$ циклів) три лопатки. Результати випробувань на втому надані графічно в координатах $\sigma - \lg N$ і обробляли із застосуванням регресивного аналізу.

Метод "сходів" вимагає 12...20 лопаток і дає хороші результати при визначенні середнього значення межі витривалості $\bar{\sigma}$ і його розсіяності на базі $N = 2 \cdot 10^7$ циклов.

Даний метод зручно застосовувати для оцінки впливу технологічних факторів на опір втоми з метою скорочення тривалості і вартості випробувань.

Метод дозволяє розрахувати межу витривалості для заданої ймовірності руйнування з урахуванням розсіювання. Приріст напруження зіставив для різних партій лопаток 25... 55 МПа.

Розрахунок середнього значення межі витривалості для ймовірного руйнування 50% здійснювали по зруйнованих (σ_{-1}^p) лопатках.

$$\bar{\sigma} = \sigma_0 + \Delta\sigma \left(\frac{A}{N} - \frac{1}{2} \right), \quad (2.1)$$

де σ_0 - найменше значення напруги при випробуваннях;

$$A = \sum_{i=1}^n i \cdot r_i \quad (2.2)$$

n - порядковий номер рівня навантаження;

r_i - число однакових подій (руйнувань або неруйнувань) на i - рівні навантаження;

$$B = \sum_{i=0}^n i^2 \cdot r_i \quad (2.3)$$

$$\bar{S}_{\sigma-1} = 1,62 \cdot \Delta\sigma \cdot \left(\frac{N \cdot B - A^2}{N^2} + 0,029 \right) \quad (2.4)$$

Лопатки випробовували при безперервно підтримуваному резонансному режимі до появи макротріщини довжиною 1... 3 мм, що відповідало падінню частоти власних коливань на 2... 3%.

Частота власних коливань лопаток І-й ступ. компресора за першою вигнутою формою становить $f = 620... 640$ Гц.

Момент початку руйнування, яке починалося з боку кромок або спинки лопатки, фіксували по зниженню частоти власних коливань. Кількість циклів навантаження лопатки до руйнування або досягнення заданої бази (довговічність) визначали за тривалістю випробування [16].

Дослідження напруженого стану лопаток при випробуваннях на втому необхідно проводити для отримання розподілу напружень уздовж пера і за перерізами лопатки при відповідній формі коливань і очікуваного місця зародження втомленої тріщини.

Для знаходження деформацій пера лопатки і відповідних їм напружень проводиться динамічне тарування за допомогою тензодатчиків, тензопідсилювача і цифрового вольтметра.

Визначення залежності між напруженням в небезпечному перетині лопатки і амплітудою коливань пера було проведено за допомогою співробітників Випробувального центру АО "Мотор Січ".

Для встановлення залежності величини напруги за показаннями вольтметра (U) і ступеня деформації (ε) було проведено калібрування тензодатчиків з базою $L = 3$ мм і опором 200 Ом.

Для калібрування була використана контрольна тарувальна балка, яка кріпилася на вібростенді замість досліджуваної лопатки. На визначеній відстані від місця кріплення балки наклеювалися послідовно по ширині три датчики. Порушення балки здійснювалося вібратором від силової частини установки в резонансному режимі. Вимірювання подвоєної амплітуди проводилося по кінцю балки за допомогою оптичного мікроскопа, що застосовується для контролю розмаху пера лопатки [16].

2.3.2 Дослідження на растровому мікроскопі

Конструкція растрового електронного мікроскопа [17] дозволяє отримувати інформацію про поверхневу структуру за допомогою зворотно-розсіяних (ЗЕ) або вторинних електронів (ВЕ). Контраст вторинних електронів визначається поверхневим рельєфом, а відображені частинки містять інформацію про розподіл електронної щільності. На зображенні області з елементами, що мають великі атомні номери, виглядатимуть набагато яскравіше.

Як правило, растровий мікроскоп має такі функції:

- Детектування ВЕ.
- Детектування ЗЕ.
- Елементний мікроаналіз. При цьому типі аналізу виявляється рентгенівське випромінювання речовини, що виникає при електронному опроміненні.
- Аналіз при низьких напругах, що прискорюють. Пристрій здатний функціонувати при прискорюючій напрузі до 200 вольт. При наявності додатка уповільнюючого потенціалу цей показник можна зменшити до 10 вольт. При такому аналізі можна досягти рівноваги між кількістю емітованих і поглинених електронів. На зразок для дослідження не потрібно наносити проведене покриття.
- Змінний вакуум. Сучасні моделі мікроскопів обладнані системою підтримки високого і надвисокого вакууму. При такому аналізі зразок перебуває в розрядженому, але щільному для нейтралізації поверхневого заряду середовищі. У підсумку спостереження можна здійснювати без покриття. При наявності охолоджуючого власника прилад зможе працювати з водою і вологими зразками.

Під час аналізу прилад одразу використовує вторинні та зворотно-розсіяні електронні. Така комбінація частинок дозволяє отримати більш повну інформацію про досліджуваний об'єкт.

Принцип роботи растрового мікроскопа можливо описати наступними кроками:

- 1) Електронний пучок надсилається на досліджуваний зразок.
- 2) Під час роботи утворюються вторинні електрони, що збираються спеціальним детектором.
- 3) Тонкий електронний зонд генерується електронною гарматою, а потім фокусується лінзами. Відхиляють його скануючі катушки у взаємоперпендикулярних напрямках.
- 4) Отримані зображення реєструються як нулі та одиниці, а потім перетворюються на цифрову картинку.

Робота растрового електронного мікроскопа завершується, коли весь зразок буде проскановано. Зображення формується за рахунок синхронізації електронного пучка в кінескопі з електронним пучком мікроскопа. Готове зображення з'являється на кінескопі [17]. При необхідності його можна перенести на фотоплівку.

3 ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОГО РЕЖИМУ ІОННО-ПЛАЗМОВОГО АЗОТУВАННЯ ПЕРА ЛОПАТОК

3.1 Випробування на втомну міцність

Відомо, що дифузійні покриття супроводжуються окрихченням поверхневого шару, що призводить до зниження опору втомі. Тому в завдання досліджень входило обґрунтування режиму ІПА, що не призводить до значного зниження параметрів витривалості порівняно з серійними лопатками. Режими ІПА представлені в табл. 3.1

Таблиця 3.1 – Режими іонно-плазмового азотування лопаток

Режим	Т°, С	Р, Па	N ₂ %	A _v ,%	H ₂ ,%	τ, мин	H ₁₀₀ ^μ	
							До ІПА	Після ІПА
36	775	192	22	68	10	240	410	648
37	550	64	9	86	5	30	405	591
P2	550	32	2	97	1	30	415	544
P1	550	240	9	86	5	10+10	408	559

У табл. 3.1 звертає на себе увагу режим 36, який супроводжується різким збільшенням мікротвердості поверхні на 58%. У комплекс основних параметрів, що характеризують раціональний режим, входить ступінь підвищення мікротвердості (рівень окрихчення) і тривалість проведення процесу ІПА.

Для попереднього відбору прийнятних варіантів іонно-плазмового азотування були проведені прискорені випробування на втому. У кожній партії випробували по три лопатки на одному рівні напруги, рівному $\sigma=550$ МПа. Порівняння варіантів проводили за середнім значенням довговічності N. У табл.

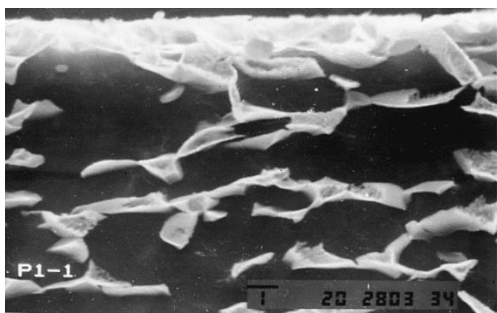
3.2 представлені значення тиску P , часу азотування τ , ступеня підвищення мікротвердості $H\%$ і середні значення довговічності N .

Таблиця 3.2 – Режими ІПА та результати випробувань на втому

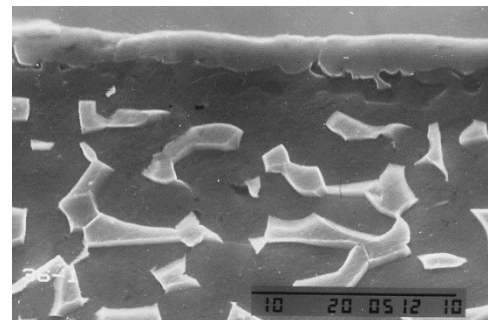
Режим	τ , хв	P , Па	H , %	σ , МПа	$\bar{N} \cdot 10^6$, цикл.
36	240	192	58	550	0,352
58	30	64	46	550	1,124
P2	30	32	31	550	1,757
P1	20	240	37	550	1,922

Як видно з табл. 3.2 найбільші значення довговічності забезпечують режими P1 і P2, що підтверджується результатами досліджень залишкових напружень. При цьому тривалість τ іонно-плазмового азотування за режимом P1 значно менша.

Рисунки 3.1... 3.2 показані мікроструктура і на рисунках 3.3... 3.6 фрактограми втомних зломів після віброполірування і подальшого ІПА, виконаного на різних режимах.



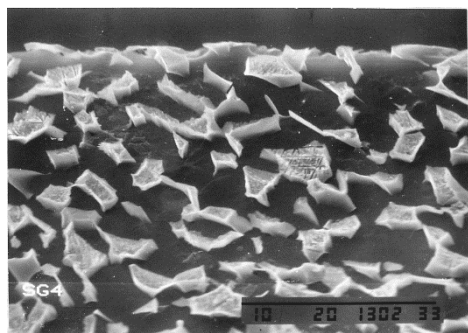
а



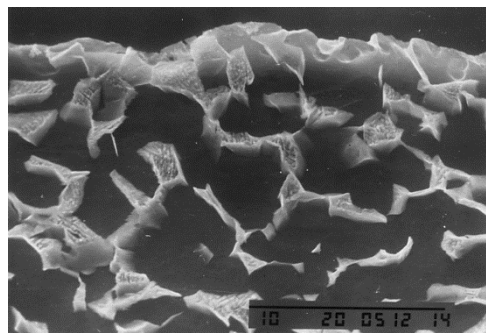
б

а – $\times 7000$ режим P1; б – $\times 5000$ режим 36

Рисунок 3.1 – Мікроструктура лопаток після ВП + ІПА



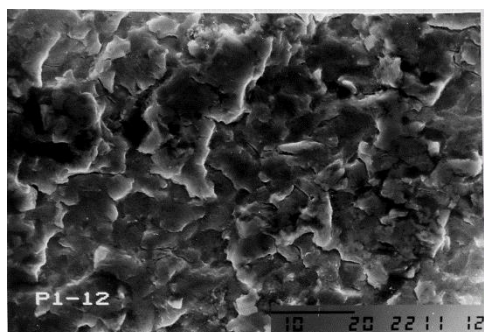
а



б

а – $\times 5000$ режим 58; б – $\times 5000$ режим P2

Рисунок 3.2 – Мікроструктура лопаток після ВП + ІПА



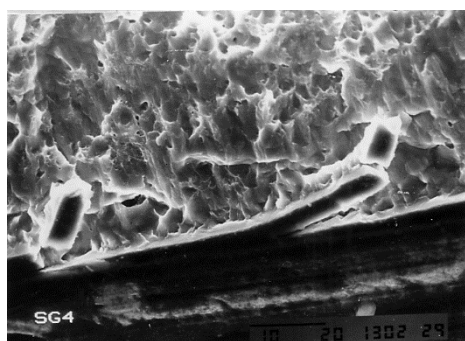
а



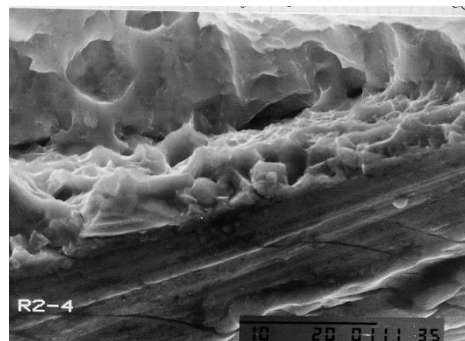
б

а – $\times 2000$ ~500 мкм від осередкової зони; б – $\times 2000$ осередкова зона втоми руйнування

Рисунок 3.3 – Втомне руйнування лопатки після ВП + ІПА (режим P1)



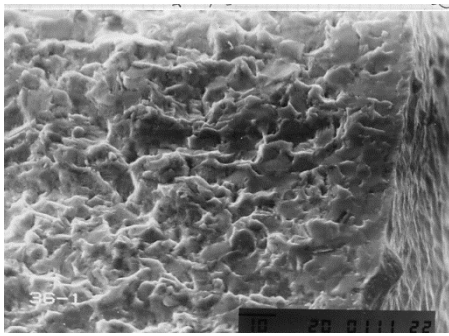
а



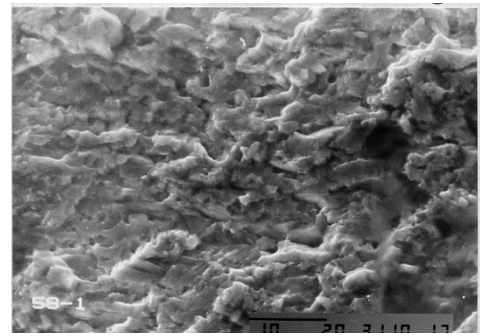
б

а – $\times 2000$; б – $\times 3500$

Рисунок 3.4 - Статичний долом лопатки після ВП + ІПА (режим P1).



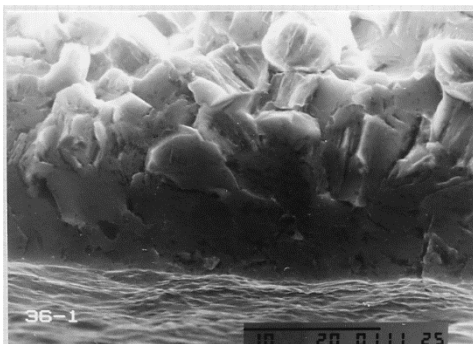
а



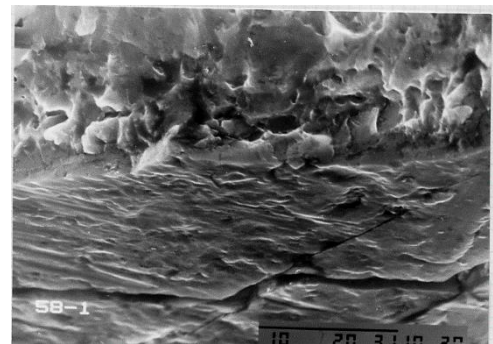
б

а – $\times 1000$ режим 36; б – $\times 2000$ режим 58

Рисунок 3.5 - Осередкова зона втомленого руйнування лопатки після ВП + ІПА



а



б

а – $\times 3500$ режим 36; б – $\times 3500$ режим 58

Рисунок 3.6 - Статична частка лопатки після ВП + ІПА в зоні статичного долому.

У процесі іонного азотування двофазного титанового сплаву ВТ8 відбувається насичення поверхневих шарів азотом. Будучи домішкою впровадження, азот дифундує вглиб металу по міжвузлових кристалічних решітках α и β -фаз.

Підвищення вмісту азоту в сплаві призводить до збільшення енергетичних бар'єрів на шляху руху дислокацій при пластичній деформації сплаву за рахунок утворення атмосфер Коттрелла навколо ядер дислокацій, створення упругої деформації кристалічної решітки, а також збільшення ковалентної складової в енергії зв'язку самої кристалічної решітки α і β -фаз. Перелічені фактори

обумовлюють підвищення величини модуля нормальної пружності (E) сплаву, а також величини межі плинності і твердості. Будучи α - стабілізатором, азот сприяє зміщенню фазової рівноваги в бік розчинення β -фази в діапазоні температур процесу іонного азотування. Процес альфування чітко спостерігається на лопатці, обробленій за режимом 36 (рисунок 3.1,б). У приповерхневій зоні під шаром нітриду титану кількість β -фази зменшується.

В інших лопатках на металлографічних шліфах помітного зрушення фазового складу (альфування) в бік розчинення β - фази не виявлено.

Руйнування газонасиченого поверхневого шару лопаток компресора реалізується за крихким механізмом квазісколу з утворенням сітки поверхневих тріщин. Найбільш крихкими у поверхневій зоні руйнування є лопатки на рис. 3.1 (режим 36, глибина крихкого шару становить 20-30 мкм).

Більш пластичною поверхнею володіють лопатки, оброблені за режимами (режими P1, P2, 58). З трьох перерахованих найбільш пластична лопатка на рисунку 3.3, а (режим P1), що має тонкі односпрямовані тріщини у вузькій зоні. У зоні статичного долому (рисунок 3.4, а - режим P1) біля поверхні елементи в'язкого руйнування (внизу), потім ділянка крихкого руйнування, можливо, метафазного).

На лопатках на рисунок 3.3 і 3.4 поверхневі тріщини утворюють сітку, розташовану на значній відстані від поверхні статичного зламу.

На рисунок 3.3 показана осередкова зона лопатки після ВП + ІПА (режим P2), що має крихкий злом. Відсутні борозни, характерні для втомленого зламу, видно можливий осередок зародження тріщини (хрестоподібної форми).

Статичний долом лопатки (рисунок 3.6, а - режим 36) характерний внутрішньозеренним зломом, фіксуються окремі струмкові візерунки.

Лопатка після ІПА (режим 58), представлена на рисунку 3.5, б має крихкий, внутрішньозеренний злом. Втомлені тріщини відсутні. Злам є характерним для багатоциклової втоми. У зоні статичного долому (рисунок 3.6, б) спостерігається в'язкий, ямковий злам (верхня частина), що переходить у

крихкий, внутрішньозеренний (нижня частина, що примикає до поверхні) На тлі крихкого мікрозламу - слід вторинної тріщини центральної частини.

У порядку зниження пластичності поверхневого шару компресорні лопатки можна розташувати в такому порядку: (режими P1, P2, 58 і 36).

Порівняння мікроструктури (рисунок 3.1, а і 3.2, б) приповерхневого шару лопаток компресора (режими P1 і P2) показало повну ідентичність. Мікроструктури відрізняються відсутністю видимих слідів деформації і відсутністю поверхневого альфування на обох лопатках.

Результати попередніх випробувань на втому і досліджень мікроструктури і втомлених зломів свідчать на користь режимів ІПА, позначених P1 і P2 (перший і другий режими).

Таблиця 3.3 – Результати дослідження лопаток на втому

Іонно-плазмове азотування пера лопаток після:			
Режим P1		Режим P2	
σ , МПа	N, млн. цикл	σ , МПа	N, млн. цикл
420	20	420	20
445	20	445	12,15
470	20	420	20
495	20	445	20
520	0,922	470	1,06
495	15,87	445	20
470	12,35	470	20
445	20	495	20
470	20	520	0,178
495	20	495	8,05
520	14,30	470	15,15
495	20	445	20

Таблиця 3.4 – Параметри витривалості лопаток

Параметри витривалості	ІПА після ВП (режим Р1)	ІПА після ВП (режим Р2)
$\bar{\sigma}_{-1}$, МПа	464	443
$\bar{S}_{\sigma-1}$, МПа	29	92
$\bar{\sigma}_{-1}^p_{(p=10\%)}$, МПа	427	325
K_i	0,839	0,574

Як видно з табл. 3.3 і 3.4 більш високе значення параметрів витривалості отримано на лопатках, підданих ІПА з іонним очищенням в аргоні (режим Р1) - $\bar{\sigma} = 464$ МПа. Лопатки, азотовані за другим режимом (режим Р2) мають дуже велике значення розсіювання межі витривалості і її низьку величину для ймовірності руйнування $P = 10\%$ ($\sigma_{-1(p=10\%)} = 325$ МПа), що на 24% нижче межі витривалості лопаток, оброблених ІПА за першим режимом Р1. При цьому у лопаток, оброблених ІПА за першим режимом Р1 коефіцієнт витривалості K_j виявився також більше на 46%.

Таким чином, порівняльні випробування на втому переконливо показали перевагу лопаток (режим Р1), оброблених ІПА з іонним очищенням в аргоні. Цей режим ІПА був обраний базовим для проведення досліджень витривалості лопаток компресора зі сплаву ВТ8М і ВТ8 після комплексного зміцнення.

3.2 Дослідження ерозійної стійкості покриттів при впливі рідких і твердих частинок

Експериментальні дослідження ерозійної стійкості покриттів були проведені на спеціальному стенді в АО "Мотор Січ". Швидкісний пиловий стенд

для випробування матеріалів і деталей на газоабразивне зношування являє собою вакуумну камеру з обертаючимся усередині неї ротором, на кінцях якого встановлюються досліджувані зразки [18]. При обертанні ротора від електродвигуна відбуваються удари зразків з рідкими і пиловими частинками, що вилітають з бункера. Ерозійне навантаження на зразок у кожному досліді визначалося за допомогою вловителя абразивних частинок на протилежному кінці коромисла.

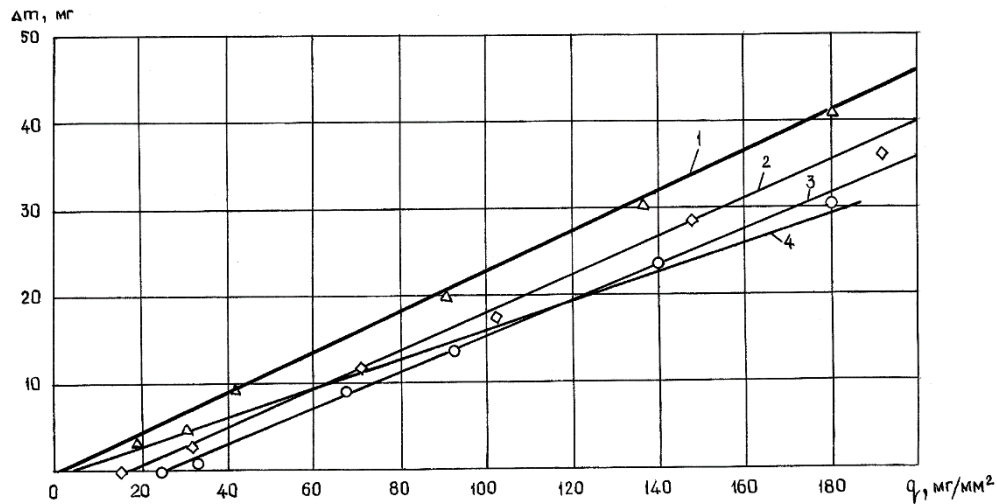
Попередньо досліджувані зразки піддавалися краплеударному зношуванню на ерозійному стенді. Швидкість ударіння частинок дистильованої води з поверхнею зразків становила 300 м/с, діаметр частинок $d_{ч.в.} = 1,2$ мм. Вплив рідких частинок здійснювався протягом 1 хвилини, тобто до закінчення інкубаційного періоду, коли, відбувається тільки мікропластична деформація, а втрати маси зразків відсутні.

Далі випробовувані і контрольовані (з того ж матеріалу) зразки піддавалися впливу твердими частинками до завершення періоду приробки. Визначали залежність зносу і відносної зносостійкості контрольних і випробовуваних зразків від тривалості випробувань. Ерозійну стійкість зразків в умовах складного впливу оцінювали за величиною зносу до моменту припинення зміни відносної зносостійкості.

Розміри частинок піску визначали за допомогою мікроскопа з похибкою не більше 5 мкм. Вони лежать в межах від 100 до 350 мкм, причому невелика кількість частинок має розмір 150-200 мкм.

Дослідженню піддавали зразки 10x14 мм, вирізані з робочих лопаток першого ступеню компресора зі сплаву ВТ8 з різними варіантами покриттів: іонно-плазмове азотування (при ефекті порожнього катода) і покриття TiN, отримане в процесі іонної конденсації, що має товщину $\delta_1 = 4... 8$ мкм і $\delta_2 = 12$ мкм. Швидкість нормального удару твердих частинок зі зразком становила $V = 200$ м/с. В якості ерозійних частинок використовувався природний кварцевий пісок Люберецького кар'єру з найбільшим числом окатаних частинок $d_{ч} = 150... 200$ мкм.

Результати експериментальних досліджень представлені на рисунку 3.7. На осі ординат відкладені втрати маси зразка, на осі абсцис - маса зношуючого піску, що впливає на одиницю поверхні зразка [18].



1 - BT8; 2 - TiN ($\delta_1 = 4 \dots 8$ мкм); 3 - TiN ($\delta_2 = 12$ мкм); 4 - іонно-плазмове азотування

Рисунок 3.7 - Залежність втрати маси зразків від величини пилового навантаження [18].

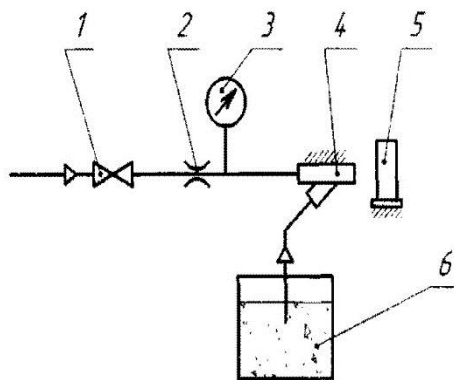
Видно, що зразок зі сплаву BT8 починає зношуватися відразу ж після експонування на стенді. Знос зразків з покриттям починається пізніше, спостерігається інкубаційний період, величина якого різна, для різних покриттів. Уповільнений знос зразків триває аж до зношування шару захисного покриття. Для покриття нітридом титану TiN товщиною $d = 4 \dots 8$ мкм, тривалість зношування близько 3 хв. Після цього зношується матеріал основи, тобто титановий сплав.

Для з'ясування впливу товщини покриття на ерозійну стійкість при впливі абразивних частинок були випробувані зразки з покриттям TiN, отриманим тим же методом, але з товщиною 12 мкм. Як видно з графіка на рисунку 3.7 величина інкубаційного періоду в цьому випадку збільшується приблизно в 1,5 рази. Необхідно зазначити, що пропорційного збільшення інкубаційного періоду,

(коли маса зразка в процесі випробування не змінюється) зі збільшенням товщини покриття, не спостерігається [18].

Для підтвердження даних, отриманих раніше співробітниками АО "Мотор Січ" були проведені випробування на зносостійкість серійних лопаток зі сплаву ВТ8М і лопаток, оброблених іонно-плазмовим азотуванням (режим Р1).

Випробування лопаток на газоабразивне зношування виконували на спеціальній установці, схема якої приведена на рис. 3.8



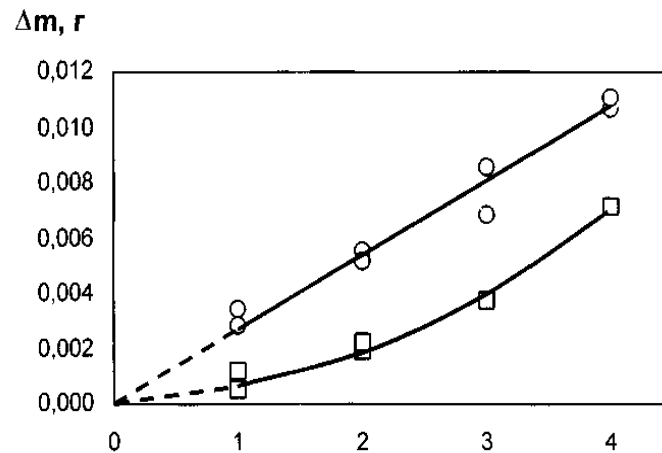
- 1 - вентиль; 2 - редуктор; 3 - манометр; 4 - інжекторне сопло;
5 - випробовуваний зразок (лопатка); 6 - бункер з абразивом

Рисунок 3.8 - Схема встановлення для випробувань на газоабразивне зношування [18].

Тиск повітря, що підводиться до сопла становив 0,05 МПа. Як витираючий матеріал використовували мікропорошок корунду з розміром фракції 0,63. Інтенсивність зносу змінювалася від 1 до 4 пропорційно до ваги порошку, поданого в бункер. Для забезпечення сталості кута атаки ($\alpha=20^\circ$), відстані від сопла до вхідної кромки лопатки ($l=40$ мм) і відстані від підшви замку лопатки до центральної осі сопла ($h=45$ мм) використовували спеціально сконструйоване пристосування [18].

Величину зносу лопатки визначали як різницю її маси до і після зношування. Лопатки зважували на аналітичних вагах АДВ-200М з точністю до

0,1 мг. Перед зважуванням лопатки промивали ацетоном з метою усунення з поверхні органічних і неорганічних частинок.



о - у вихідному стані, □ - після іонного азотування.

Рисунок 3.9 - Криві зношування лопаток компресора в газозабразивній середі [18].

На підставі дослідницьких даних були отримані криві зносу для двох партій лопаток: з покриттям і без нього (рис.3.9). Швидкість зносу, що характеризується кутовим коефіцієнтом кривої зносу, для лопаток без покриття постійна. Для лопаток з покриттям швидкість зносу залежить від інтенсивності зносу. На початковій стадії швидкість зносу лопаток з покриттям на порядок (у 16 разів) менша, ніж лопаток без покриття. Зі збільшенням інтенсивності зносу покриття видалається з поверхні і при досягненні 4 хв інтенсивність зносу лопаток з покриттям і без нього досягають паритету. Як наслідок, ефект присутності покриття позначається на формі кривих зносу (див. рис.3.9) Для лопаток без покриття крива зносу лінійна - має місце прямо пропорційна залежність маси зношеного матеріалу від тривалості випробувань [18]. Для лопаток з покриттям спостерігається параболічна форма на початковій ділянці кривої з подальшим переходом у пряму (у міру видалення покриття).

Встановлено, що наявність покриття, нанесеного методом іонно-плазмового азотування, значно підвищує ерозійну стійкість пера лопаток.

Таким чином, результати проведених досліджень підтвердили високу зносостійкість пера лопаток з дифузійним покриттям.

4 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ РОЗРАХУНКИ

4.1 Тенденція розвитку світового ринку технологій

У сучасному світі в розвитку держави величезну роль відіграє розвиток промисловості. З появою нових наукових технологій промисловість виявила потребу в отриманні матеріалів з новими властивостями, а також у вдосконаленні методів їх отримання. Нанесення тонких плівок дозволяє змінювати характеристики оброблюваної деталі [19]. Дані тема об'єднує різні розділи фізики: електрика, механіка, магнетизм, оптика тощо. В якості матеріалів можна використовувати різні елементи Періодичної таблиці Менделєєва. Магнетронна розпилювальна система (МРС), зокрема високочастотна (ЛПД МРС) - пристрій, призначений для нанесення тонких плівок на підкладку і впровадження розпорошеної речовини в приповерхневий шар деталі. Метою цієї роботи є опис технології іонно-плазмового азотування та порівняння з газовим методом її можливе застосування у виробництві. Ця установка може застосовуватися для підвищення твердості, зносостійкості, теплостійкості та корозійної стійкості методом азотування поверхні. Азотування - це процес впровадження азоту в приповерхневий шар деталі. У більшості випадків на заводах застосовують газове азотування. Азотування, як і цементації, піддають деталі, що працюють на знос і сприймають знакоперемінні навантаження. Крім газового, існують й інші способи азотування, в тому числі іонно-плазмовий метод. Даний спосіб азотування відомий давно, проте на виробництві нерідко використовується спосіб газового азотування, який є менш вигідним.

Таблиця 4.1 - Опис ідеї

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для споживачів (користувачів)
Іонно-плазмове азотування лопатки компресора ГТД	1. Азотування робочих лопаток	Екологічна нешкідливість, чистота і безвідходність процесів
	2. Азотування валу	Підвищення продуктивності, зниження трудомісткості та собівартості обробки в 2 - 4 рази в залежності від типу деталей та обсягу садки
	3. Азотування патрубків	Найкраща якість та експлуатаційні властивості на відповідальних деталях з одночасним забезпеченням бездеформаційного зміцнення, розмірної та чистої точності.

Проаналізуємо характеристику потенційного ринку, можливих конкурентів та складності з якими можливо зіштовхнутися при втіленні нового метода хіміко-термічної обробки. Данні наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 - Попередня характеристика потенційного ринку

№	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Головні конкуренти	ГП Ивченко-Прогресс
		ПАО "Запорожсталь"
		Большевик НПП Пао
2	Динаміка ринку (якісна оцінка)	зростає
3	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Наявність складного імпортного обладнання
4	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Сертифікація установки ІПА

Проаналізуємо середовище реалізації інноваційного проекту, з урахуванням його переваг та недоліків, можливості нового метода хіміко-термічної обробки та можливі загрози його реалізації [19]. Данні представлені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 - SWOT- аналіз

Сильні сторони:	Слабкі сторони:
- Екологічна нешкідливість, чистота і безвідходність процесів - Підвищення продуктивності, зниження трудомісткості та собівартості обробки в 2 - 4 рази в залежності від типу деталей та обсягу садки - Найкраща якість та експлуатаційні властивості на відповідальних деталях з одночасним забезпеченням бездеформаційного зміцнення, розмірної та чистової точності.	- Дорогоцінне обладнання - Складність в налаштуванні обладнання - Потреба в висококваліфікованих наладчиків
Можливості:	Загрози:
- Проводити азотування великого переліку деталей - Пришвидшення процесу азотування і як наслідок збільшення об'єму продукції - Зменшення енерговитрат	- Часті зміни параметрів процесу - Частий вихід зі строю обладнання - Не можливість знайти кваліфікований персонал

З метою відображення взаємозв'язків стейкхолдерів на карті відокремлено три концентричних області, в яких розміщено всі зацікавлені особи інноваційного проекту за можливостями впливу на них ініціатора проекту. Область внутрішніх стейкхолдерів – область повноважень/відповідальності ініціатора. Внутрішні зацікавлені сторони знаходяться в прямій підлеглості ініціатора, що дозволяє використовувати досить прості методи адміністрування проекту.

Залежні зацікавлені сторони формально ініціатору проекту не підлеглі, проте тісні ділові стосунки потребують на пошук взаємовигідних рішень та

компромісів [19]. На периферії ж знаходяться зовнішні зацікавлені сторони. Це область стейкхолдерів опосередкованого впливу на успішність реалізації інноваційного проекту.



Рисунок 4.1 - Карта стейкхолдерів

Таблиця 4.4-Техніко-економічні показники виробів.

Найменування виробу	Базовий виріб	Новий виріб
1.Лопатка компресора ГТД	BT-8 насичений азотом у газовій середі	BT-8 насичений азотом іонно- плазмовим методом
2. Технологія зміцнення	Азотування	Іонно- плазмове азотування
3. Програма випуску, шт	1000	1000

Вартість сировини і основних матеріалів розраховується на основі технічно обґрунтованих норм використання на виробництво одиниці виробу, цін відповідних видів матеріальних ресурсів. При цьому враховуються транспортнозаготівельні витрати. Вартість сировини та основних матеріалів наведена в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Вартість основних матеріалів при хіміко-термічній обробці

Найменування сировини та основних матеріалів	Норма викори- стання	Ціна, грн	Вартість , грн
Азот	50 л	20 грн/л	2000

Вартість купівельних комплектуючих виробів розраховується на основі норм використання й цін, з урахуванням транспортно – заготівельних витрат.

Основна заробітна плата основних виробничих робітників на одиницю виробу розраховується на основі трудомісткості виготовлення та часових тарифних ставок[19]. Розрахунок основної заробітної плати на одиницю продукції наведений в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – Заробітна плата на одиницю продукції (розцінка)

Найменування операції	Норма часу, годин	Роз- ряд робіт	Часова тариф- на ставка, грн.	Заробітна плата на одиницю продукції (розцінка), грн.
Азотування	5	V	43	215

Додаткова заробітна плата виробничих робітників виплачується за кількість та якість виконаної роботи. Вона вміщує надбавки і доплати, премії за виробничі результати, оплату чергових та додаткових відпусток та інше. Додаткова заробітна плата складає 40% від основної, та розраховується за формулою:

$$ЗД = ЗО \cdot \frac{K_Д}{100}, \text{ грн} \quad (4.1)$$

де $K_Д$ – процент додаткової заробітної плати.

$$ЗД = 215 \cdot \frac{40}{100} = 86 \text{ грн.}$$

Відрахування на соціальні заходи являють собою форму перерозподілу доходу на фінансування суспільних потреб, розраховуються згідно діючого законодавства і складають 22% від фонду оплати праці. Відрахування на соціальні заходи розраховуються за формулою:

$$BC = (ЗО + ЗД + ПП) \cdot \frac{K_{вс}}{100}, \text{ грн.} \quad (4.2)$$

де ПП – премії з прибутку, грн;

$K_{вс}$ - % відрахування на соціальні заходи.

$$BC = (215 + 86 + 10) \cdot \frac{22}{100} = 68,42 \text{ грн.}$$

Загальновиробничі витрати вміщують витрати на утримання та експлуатацію обладнання, цехові витрати і послуги виробничого характеру. Витрати на утримання та експлуатацію обладнання вміщують витрати на технічне обслуговування машин і механізмів, витрати на поточний ремонт обладнання, цехового транспорту та інструментів, знос малоцінних і швидкозношуваних приладів, заробітну плату допоміжного персоналу та інші. Цехові витрати вміщують витрати, пов'язані з поточним ремонтом та амортизацією будівель цеху, заробітну плату керівників і спеціалістів цеху, витрати на охорону праці та техніку безпеки в цеху та інші.

Загальновиробничі витрати складають в середньому 400% до основної заробітної плати та розраховуються за формулою:

$$ЗВВ = ЗО \cdot \frac{\alpha}{100}, \text{ грн} \quad (4.3)$$

де α - % загально виробничих витрат.

$$ЗВВ = 215 \cdot \frac{400}{100} = 860 \text{ грн.}$$

Вищенаведені витрати складають виробничу собівартість.

Адміністративні витрати вміщують витрати, пов'язані з утриманням адміністративно - управлінського персоналу підприємства, а також утриманням та експлуатацією основних засобів загального виробничого призначення, охорону праці та техніку безпеки персоналу та інші [19]. Адміністративні витрати складають в середньому 300% від основної заробітної плати основних виробничих робітників та розраховуються за формулою:

$$АВ = АВ^* \cdot \frac{\beta}{100}, \text{ грн} \quad (4.4)$$

де β - % адміністративних витрат.

$$АВ = 215 \cdot \frac{300}{100} = 645 \text{ грн.}$$

Витрати на технологічну електроенергію:

$$E = T \cdot t \cdot N \quad (4.5)$$

де T – тариф на 1 кВт електроенергії;

N – кількість кВт електроенергії споживаєма у годину;

t – норма часу.

$$E = 2,68 \cdot 5 \cdot 50 = 670 \text{ грн.}$$

Калькуляція собівартості і ціни продукції наведена в таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 – Калькуляція собівартості хіміко-термічної обробки

Статті витрат	Базова технологія	Нова технологія
Сировина і основні матеріали	8000	5400
Купівельні комплектуючі вироби	-	-
Електроенергія технологічна $t \cdot \text{Тариф}$	6700	670
Основна заробітна плата основних виробничих робітників	2150	215
Додаткова заробітна плата основних виробничих робітників	860	86
Відрахування на соціальні заходи з заробітної плати основних виробничих робітників	680	68
Загальновиробничі витрати	8600	860
Собівартість виробнича	26990	7299

Економічна ефективність інноваційного проекту розраховується за показником економії експлуатаційних витрат:

$$E = (C_{\text{б}} - C_{\text{н}}) \cdot N \quad (4.6)$$

де E – економічний ефект від впровадження нової технології термообробки;

$C_{\text{б}}$ – собівартість базового виробу;

$C_{\text{н}}$ – собівартість нового виробу;

$$E = (26990 - 7299) \cdot 1000 = 19691000 \text{ грн.}$$

При визначенні економічних даних було визначено повну собівартість нового метода хіміко-термічної обробки обробки яка становить 7299 грн., прибуток в розмірі 19691000 грн.

З цього можна зробити висновок, що при використанні нового способу азотування можливо скоротити час обробки в 10 разів. Нова технологія дала змогу нам зменшити витрати майже у 4 рази, знизалась собівартість хіміко-термічної обробки. Виходячи з цього новій спосіб є економічно доцільним.

ВИСНОВКИ

Робочі лопатки одні з найвідповідальніших деталей газотурбінного двигуна, и саме тому вони повинні бути наділені необхідним комплектом властивостей.

При роботі робоча лопатка піддається сильним навантаженням та зазнає корозійного і ерозійного впливу газового потоку, отже основними необхідними характеристиками є: втомна міцність, зносостійкість та корозійна стійкість. Із можливих способів зміцнення поверхневого шару деталі було вибрано азотування, так як даний метод забезпечує найкращі характеристики поверхневого шару лопатки. У більшості випадках на підприємствах використовують газове азотування, але через занадто велику тривалість процесу, малу економічну вигоду, небезпечність для навколишньої середи, та за для забезпечення кращих характеристик деталі було обране іонно-плазмове азотування.

Для визначення оптимального режиму іонно-плазмowego азотування пера робочої лопатки було порівняно чотири режими ІПА з різними параметрами часу, тиску, температури та т.д. По результатах отриманих при проведенні випробувань на циклічну витривалість бачимо, що кращі характеристики забезпечуються режимами Р1 и Р2, при цьому тривалість процесу за режимом Р1 значно менша. За показниками пластичності поверхневого шару кращими параметрами володіють лопатки оброблені за режимом Р1. Мікроструктура лопаток після режиму відрізняється відсутністю видимих слідів деформації від режимів 58 і 36.

Виходячи з результатів проведених випробувань, було визначено, що найоптимальнішим режимом іонно-плазмowego азотування лопаток зі сплаву ВТ8 буде режим Р1.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Ф. И. Демин, Н. Д. Проничев, И. Л. Шпарев Технология изготовления основных деталей газотурбинных двигателей: под. общ. ред. проф. Ф. И. Демина. 2-е изд. Самара: Изд-во СГАУ, 2012, 324 с.
2. Жеманюк П.Д., Ольшанецкий В.Ю., Степанова Л.П. Влияние технологии изготовления и характер текстурованности лопаток ГТД. *Металознавство та обробка металів*, 1998. №3. С. 22–27.
3. Богуслаев В.А., Яценко В.К., Притченко В.Ф. Технологическое обеспечение и прогнозирование несущей способности деталей ГТД. Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2006. 335 с.
4. Гусакова Л.В. Повышение эффективности шлифования поверхностей деталей из высоколегированных и жаропрочных материалов изменением конструкции и состава абразивного инструмента. Автореферат дис. ... канд. техн. наук. Ростов н/д, 2012. 18 с.
5. Богуслаев В.О., Пухальська Г.В., Рубель О.В., Левітін В.В. Особливості деформаційного зміцнення лопаток компресора. *Металознавство та обробка металів*, 2000. №3. С. 62–64.
6. В.Л. Грешта, О.В. Іващенко, Г.Г. Трикоз, Ю.І. Кононенко Методичні вказівки та завдання до лабораторних робіт і контрольної роботи із дисципліни “*Методи локальної поверхневої обробки*” Укл.: І.М. Лазечний,. Запоріжжя: ЗНТУ, 2005. 114 с.
7. Берлин Е.В., Сейдман Л.А. Ионно-плазменные процессы в тонкопленочной технологии. Москва: Техносфера, 2010. 528 с.
8. Белоус В.А., Носов Г.И. Ионное азотирование конструкционных коррозионно-стойких и жаростойких сталей. Сб. докладов 3-й Международной конференции “*Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов*”. Часть I, 2002. С. 197–200.
9. Арзамасов Б.Н., Братухин А.Г., Елисеев Ю.С., Панайоти Т.А. Ионная

химико-термическая обработка сплавов. М: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. 400 с.

10. Каплун В.Г., Пастух Ш.М. “Особливості процесу іонного азотування в безводневих середовищах” Вісник технологічного університету Поділля. Серія 1. *Технічні науки*, 1997. №1 С. 14–17.

11. Михайлуца В.Г., Бялик Г.А., Пухальская Г.В. и др. Формирование поверхностного слоя лопаток ГТД. *Придніпровський науковий вісник. Технічні науки лопаток*. 1997. №25(36). С. 22–31.

12. Борисова Е.А., Бочвар Г.А., Брун М.Я. и др. Титановые сплавы. Металлография титановых сплавов. М.: Металлургия, 1980. 464 с.

13. Лахтин Ю.М., Коган Я.Д. Азотирование стали. М: *Машиностроение*, 1976. 256 с

14. Школьник Л.М. Методика усталостных испытаний. Справочник. М.: *Металлургия*, 1978. 304 с.

15. Трощенко В.Т., Грязнов Б.А., Налимов Ю.С. Влияние технологических и эксплуатационных факторов на сопротивление усталости и живучести рабочих лопаток ГТД. *Вибрации в технике и технологиях*, 2001, №5

16. Трощенко В.Т., Грязнов Б.А., Налимов Ю.С. и др. Сопротивление усталости и циклическая трещиностойкость титанового сплава ВТЗ-1 в различных структурных состояниях. Сообщ. 1. Методики исследования и экспериментальные результаты . Пробл. прочности, 1995. №5–6. С. 3–11.

17. Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И., Босов С.В. Рентгенографический метод исследования структурных изменений в тонком поверхностном слое металла при трении , *Заводская лаборатория*. №3.

18. Лукьянов В.С., Штыков А.Я., Ганноцкая П.И., Гликсон И.Л. Исследование эрозионной стойкости покрытий рабочих лопаток компрессора изделия 78. *Технический отчет №2*. 1.87.78.160, 1987.

19. Круглікова В.В. Методичні рекомендації щодо виконання економічного розділу дипломного проекту здобувачами вищої освіти технічних спеціальностей за освітнім ступенем «магістр», - Запоріжжя: Кафедра

підприємництва, торгівлі та біржової діяльності, НУ «Запорізька політехніка», 2020. – 12с.

20. Загальні вимоги стосовно забезпечення роботодавцями охорони праці працівників: НПАОП 0.00-7.11-12. На заміну наказу МНС України від 26.12.2011 № 1350 ; чинний від 2012-03-16. К. : МНС України, 2012. 116 с.
URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0226-12>

21. Загальні вимоги стосовно забезпечення роботодавцями охорони праці працівників: НПАОП 0.00-7.11-12. На заміну наказу МНС України від 26.12.2011 № 1350 ; чинний від 2012-03-16.
К.:МНСУкраїни,2012.116с.URL:<http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0226-12>

22. Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок: НПАОП 40.1-1.32-01. На заміну глав 5.4 5.5 7.1 7.2 7.3 7.4 7.6 Правил устроюства електроустановок, затв. Міненерго СРСР 06.07.1984 р. ; чинний від 2002-01-01.К. :Мінпраці України, 2001.

URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0272203-01/card2#Card>

23. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень: ДСН 3.3.6.042-99. Чинний від 1999-12-01. К. : МОЗ України, 1999.

URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/rada/show/va042282-99>. (Державні санітарні норми)

24. Системи протипожежного захисту: ДБН В.2.5-56:2014. На заміну ДБН В.2.5-56:2010 ; СНиП 2.04.05-91 (розділи 5 та 22) ; чинний від 2015-07-01. К. : Мінрегіон України, 2014. 191 с. (Державні будівельні норми)

25. Опалення, вентиляція та кондиціонування: ДБН В.2.5-67:2013. На заміну СНиП 2.04.05-91 ; крім розділу 5 та додатка 22. ; чинний від 2014-01-01. К. : Мінрегіонбуд України, 2013. 149 с. (Державні будівельні норми України)

26. Конспект лекцій дисципліни «Цивільний захист і охорона праці в галузі», змістовний модуль «Цивільний захист», для студентів усіх спеціальностей та всіх форм навчання / Укл.: М. О. Журавель Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка». Каф. ОП і НС, 2020 р. 49 с.

ДОДАТОК А

Охорона праці і безпека в надзвичайних ситуаціях

В даному додатку наведені основні заходи з охорони праці при дослідженні процесів іонно-плазмового азотування титанових заготовок.

А.1 Аналіз потенційних небезпек

а) Найбільш оптимальним способом є використання процесного підходу у питаннях забезпечення безпеки, згідно вимог ISO 45001:2018 «Системи менеджменту охорони здоров'я і забезпечення безпеки праці [20]. Вимоги і настанова по їх застосуванню» система управління охороною праці є невід'ємною складовою будь-яких систем виробничих процесів, що обумовлює необхідність її менеджменту. З позицій процесного підходу до забезпечення безпеки кожен виробничий процес необхідно представити як послідовність процедур та дій при досягненні потрібного результату. Важливим є вичленення найбільш небезпечних сегментів виробничого процесу та на цій підставі надати технічне рішення, яке дозволило б зменшити ступінь ризику.

Обов'язковим є розгляд вимог до роботодавця в сенсі забезпечення нормованих параметрів виробничого середовища, а саме:

б) Невідповідність вимогам до природнього та штучного освітлення, що призводить до зниження працездатності.

в) Незадовільні метеорологічні параметри повітряного середовища дослідницької лабораторії в наслідок неефективної роботи системи опалення та повітряобміну.

г) Небезпеки які пов'язані з порушеннями правил пожежної безпеки.

д) Небезпеки які пов'язані з умовами праці під час надзвичайних ситуацій.

А.2 Заходи забезпечення безпеки

В авіадвигунобудуванні використовується як газове так і іонно-плазмове азотування. В розділі надані технічні рішення які спрямовані на підвищення безпечності процесів азотування [20].



Рисунок А.1. – Проблеми процесу

Таким чином, розглянуто процес газового азотування, визначені складові та найбільш небезпечні етапи процесу представлені на рисунку А.1. Через те, що

процес газового азотування має підвищений вміст шкідливих речовин в робочій зоні, то як наслідок частина цих речовин потрапляє в організм робітників які безпосередньо контролюють цей процес. А беручи до уваги те що газове азотування це довготривалий двухстадійний процес, то обсяг шкідливих речовин збільшується з кожною годиною [21].

Для забезпечення умов безпеки приймається технічні рішення найбільш ефективним з яких є заміна газового азотування на іонно-плазмове азотування.

Сутність іонно-плазмового азотування полягає в тому, що в розрядженому до 200 Па азотомісткому газовому середовищі між катодом, на якому розташовуються оброблювані деталі, і анодом, в якості якого служать стінки вакуумної камери, збуджується аномальний тліючий розряд, який утворює активну среду (іони, атоми, збуджені молекули). Це забезпечує формування на поверхні виробу азотированного шару, що складається з зовнішньої - нитридної зони і розташовується під нею дифузійної зони.

Переваги ІПА проявляються в істотному скороченні основних витрат виробництва та зменшення шкідливо впливу робітників. Так, наприклад, в порівнянні з газовим азотуванням в печах, ІПА забезпечує:

- скорочення тривалості обробки в 2 - 5 разів, як за рахунок зниження часу нагрівання та охолодження садки, так і за рахунок зменшення часу ізотермічної витримки,
- скорочення витрат робочих газів в 20 - 100 разів,
- скорочення витрат електроенергії 1,5 - 3 рази,
- зниження деформації настільки, щоб виключити фінішну шліфування,
- поліпшення санітарно-гігієнічних умов виробництва,
- повну відповідність технології всім сучасним вимогам з охорони навколишнього середовища.

А.3 Заходи забезпечення виробничої санітарії та гігієни праці

а) Освітлення в приміщенні повинно відповідати вимогам ДБН В.2.5-28-2006 «Природне та штучне освітлення»: Освітленість від системи загального освітлення повинна складати не менше 200 лк при розрядних лампах і 100 лк при лампах розжарювання [21]. Створювати освітленість більше 750 лк при розрядних лампах і 300 лк при лампах розжарювання дозволяється тільки за наявності обґрунтування; Освітленість від світильників загального освітлення в системі комбінованого підвищувати на один ступінь за шкалою освітленості. При суміщеному освітленні для приміщень громадських будинків з боковим освітленням при розрахунковому значенні КПО (коефіцієнт природного освітлення), яке дорівнює або менше 80 % від нормованого значення, освітленість від загального штучного освітлення слід підвищувати на один ступінь за шкалою освітленості. Штучне освітлення може бути двох систем - загальне та комбіноване. Робоче освітлення слід передбачати для всіх приміщень будинків, а також ділянок відкритих просторів, призначених для роботи, проходу людей та руху транспорту. Для приміщень, які мають зони з різними умовами природного освітлення та різними режимами роботи, повинно передбачатись окреме керування освітленням таких зон. За необхідності частина світильників робочого або аварійного освітлення може бути використана для чергового освітлення.

Для освітлення приміщень слід використовувати, як правило, найбільш економічні розрядні лампи. Використання ламп розжарювання для загального освітлення допускається тільки у випадках неможливості або технікоекономічної недоцільності використання розрядних ламп. Для місцевого освітлення, крім розрядних джерел світла, рекомендується використовувати лампи розжарювання, в тому числі галогенні. Застосування ксенонових ламп у приміщеннях не дозволяється.

Освітленість робочої поверхні, створена світильниками загального освітлення в системі комбінованого, повинна складати не менше 10 % нормованої для комбінованого освітлення при таких джерелах світла, які застосовуються для місцевого освітлення. При цьому освітленість повинна бути не менше 200 лк при розрядних лампах, не менше 75 лк - при лампах розжарювання. Створювати освітленість від загального освітлення в системі комбінованого більше 500 лк при розрядних лампах і більше 150 лк при лампах розжарювання допускається тільки за наявності обґрунтувань.

Нормою освітлення для приміщень дослідницької лабораторії є 300лк. Розрахунок освітленості приміщення дослідницької лабораторії [22].

1. Визначаємо сумарний світловий потік освітлювальної установки Φ_{Σ} :

$$\Phi_{\Sigma} = \frac{E_n \cdot A \cdot B \cdot K_z \cdot z}{\eta} \quad (A.1)$$

де E_n – рівень нормованого загального освітлення, лк;

A – довжина приміщення, м; B – ширина приміщення, м;

K_z – коефіцієнт запасу;

Z – коефіцієнт нерівномірності освітлення;

η – коефіцієнт використання світлового потоку.

$$\Phi_{\Sigma} = \frac{300 \cdot 10 \cdot 5 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{0,62} = 39919 \text{ лм.}$$

2. Вибір світильника та відповідної лампи

Обираємо світильник типу ЛПП та лампу ЛХБ ($\Phi_{\text{л}}=2840 \text{ лм}$).

2.1 Розрахунок кількості світильників та ламп:

$$N_{\text{св}} = \frac{\Phi_{\Sigma}}{\Phi_{\text{л}}} \quad (A.2)$$

$$N_{\text{св}} = \frac{39919}{2840} = 14 \text{ штук.}$$

2.2 За умови встановлення двох ламп в один світильник отримуємо 7 світильників по 2 лампи.

2.3. Перевірка емпіричним методом

На рисунку А.2 зображено схему розташування світильників

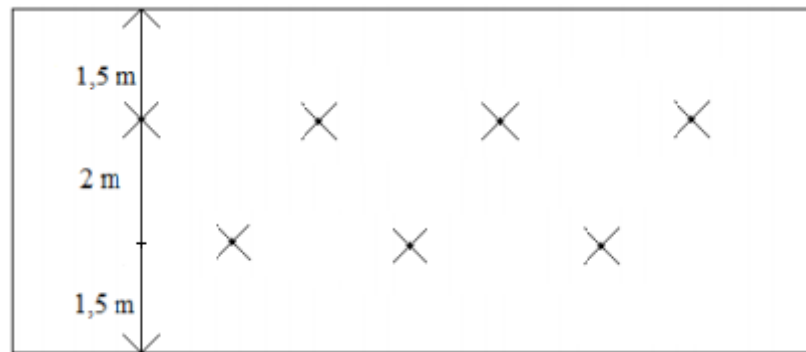


Рисунок А.2 – Схема розташування світильників

2.4 Чисельна перевірка типу світильника і кількості стандартних ламп:

$$E_p = (-10\% \dots +20\%) \cdot E_n \quad (\text{A.3})$$

2.5 Розраховуємо загальну розрахункову освітленість:

$$E_p = \frac{\Phi_{\text{л}} \cdot N_{\text{л}} \cdot \eta}{A \cdot B \cdot K_3 \cdot z} \quad (5.5)$$

$$E_p = \frac{2840 \cdot 14 \cdot 0,62}{10 \cdot 5 \cdot 1,5 \cdot 1,1} = 299 \text{ лк.}$$

Загальна розрахункова освітленість становить 299 лк, що потрапляє в інтервал $E_p = 270 \leq 299 \leq 360$ лк. Отже, рівень освітленості задовільний [23].

б) Для нормалізації параметрів мікроклімату приміщення дослідницької лабораторії рекомендовано:

- раціональне планування виробничих приміщень і оптимального розміщення в них устаткування з тепло -, холоду - та вологовиділеннями. Для зменшення термічних навантажень на працюючих передбачається максимальна механізація, автоматизація та дистанційне управління технологічними процесами і устаткуванням.

- у приміщеннях із значними площами застелених поверхонь передбачаються заходи захисту від перегрівання при попаданні прямих сонячних променів в теплий період року (орієнтація віконних прорізів схід-захід, улаштування жалюзі та ін.), від радіаційного охолодження - в зимовий (екранування робочих місць). При температурі внутрішніх поверхонь огорожувальних конструкцій, вище допустимих величин, робочі місця повинні бути віддалені від них на відстань не менше 1 м.

- у виробничих приміщеннях з надлишком (явного) тепла використовують природну вентиляцію (аерацію). Аераційні ліхтарі та шахти розташовують безпосередньо над основними джерелами тепла на одній осі. У разі неможливості або неефективності аерації встановлюють механічну загально-обмінну вентиляцію. При наявності поодиноких джерел тепловиділень оснащують обладнання місцевою витяжною вентиляцією у вигляді локальних відсмоктувачів, витяжних зонтів та ін.

- у замкнутих і невеликих за об'ємом приміщеннях (кабіни кранів, пости та пульти керування, ізольовані бокси, кімнати відпочинку тощо) при виконанні операторських робіт використовують системи кондиціонування повітря з індивідуальним регулюванням температури та об'єму повітря, що подається.

А.4. Заходи з забезпечення пожежної безпеки

Розробку заходів з пожежної безпеки починають з аналізу речовин і матеріалів, що використовуються при роботі на об'єкті, з метою визначення класу можливої пожежі (А, В, С, D, F, E) згідно ДСТУ EN 2:2014 «Класифікація пожеж (EN 2:1992, EN 2:1992/A1:2004, IDT)» та категорії його пожежної небезпеки, відповідно до вимог ДСТУ Б В.1.1-36:2016 «Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою» та СНиП 2.09.02-85 «Производственные здания». Тобто указати до якої категорії виробництва з пожежної небезпеки (А, Б, В, Г, Д) належить об'єкт (дослідницька лабораторія, конструкторське бюро, дільниця, підстанція, цех, тощо) [24].

Відповідно до категорії виробництва з пожежної небезпеки і вимог ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги», указати ступінь вогнестійкості приміщення об'єкта (дослідницької лабораторії, конструкторського бюро, дільниці, підстанції, цеху, тощо).

Показати наявність засобів виявлення загорянь і пожеж згідно вимог ДБН В.2.5-56:2014 «Системи протипожежного захисту»:

- автоматичних сигналізаторів про пожежу;
- системи пожежної сигналізації;

З огляду на пожежну небезпеку, передбачити первинні засоби пожежогасіння (вогнегасники різних видів), відповідно до вимог «Правил 58 експлуатації та типових норм належності вогнегасників», зареєстрованих в МЮ України 23.02.2018 р. За № 225/31677.

Виробничі приміщення можуть бути обладнані стаціонарними установками автоматичного пожежогасіння [24].

Комплекс протипожежних заходів для приміщення (лабораторії, офісу, тощо) обладнаного ПК з ВДТ розроблений згідно вимог НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні».

Виходячи з аналізу речовин та матеріалів, які використовуються при роботі у приміщенні (лабораторії, офісу, тощо) обладнаному ПК з ВДТ:

- згідно ДСТУ EN 2:2014 «Класифікація пожеж (EN 2:1992, EN 2:1992/A1:2004, IDT)» у приміщенні (лабораторії, офісу, тощо) обладнаному ПК з ВДТ можлива пожежа класів – А (пожежа, що супроводжується горінням твердих матеріалів) та Е (горіння електроустановок, що перебувають під напругою до 1000 В);

- відповідно до вимог ДСТУ Б В.1.1-36:2016 «Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою», воно належить до категорії «Д» з пожежної небезпеки – простір у приміщенні, у якому перебувають тверді горючі речовини та матеріали.

Оскільки приміщення (лабораторії, офісу, тощо) обладнане ПК з ВДТ належить до виробництв категорії «Д» з пожежної небезпеки, тому згідно вимог ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги» воно має II ступінь вогнестійкості.

Згідно вимог ДБН В.2.5-56:2014 «Системи протипожежного захисту», в приміщенні (лабораторії, офісу, тощо) обладнаному ПК з ВДТ встановлена система пожежної й охоронної сигналізації «Сигнал-ВК6». Яка забезпечує виявлення теплових і димових ознак пожежі і місця виникнення пожежі з точністю до місця розміщення датчика.

Оскільки приміщення (лабораторії, офісу, тощо) що обладнане ПК з ВДТ має площу 39 м², тому відповідно до вимог п. 5 розділу VI «Вибір типу та необхідної кількості вогнегасників», «Правил експлуатації та типових норм належності вогнегасників», зареєстрованих в МЮ України 23.02.2018 р. За № 225/31677 для гасіння електроустановок, що знаходяться під напругою, передбачені вуглекислотні вогнегасники типу ВВК-3,5 у кількості 2 штук (з розрахунку один вогнегасник с величиною заряду вогнегасної речовини 3 кг. І більше, на 20 м² площі приміщення). Додатково, на кожному поверсі будівлі, в якій розміщене приміщення обладнане ПК з ВДТ, передбачене два переносних порошкових вогнегасника – ВП-5. Відстань між вогнегасниками та місцями можливих загорянь не перевищує 10 м.

А.5. Заходи безпеки у надзвичайних ситуаціях

Типову інструкцію розроблено Українським НДІ цивільного захисту відповідно до ст. 130 Кодексу цивільного захисту України [25].

Залежно від існуючої або прогнозованої обстановки з питань цивільного захисту та надзвичайних ситуацій на підприємстві, в установі, організації, закладі (далі — підприємство) може бути встановлено один з трьох режимів функціонування об'єктової ланки функціональної або територіальної підсистеми єдиної державної системи цивільного захисту:

- режим повсякденного функціонування;
- режим підвищеної готовності;
- режим надзвичайної ситуації.

Режими встановлюються органами виконавчої влади, а у окремих випадках на території підприємства — його керівником.

Усі працівники підприємства, незалежно від займаних посад, повинні знати та суворо виконувати вимоги Типової інструкції щодо дій персоналу підприємства при загрозі або виникненні надзвичайних ситуацій. За невиконання вимог Інструкції персонал підприємства може бути притягнутий до адміністративної відповідальності [25].

Оповіщення адміністрації, робітників та службовців підприємства щодо надзвичайних ситуацій проводиться за заздалегідь розробленою схемою.

На випадок виникнення надзвичайної ситуації, пов'язаної із загрозою або початком забруднення повітря хімічно небезпечною чи радіоактивною речовиною всі працівники підприємства підлягають укриттю в захисній споруді цивільного захисту (вказується адреса та приналежність споруди).

Засоби індивідуального захисту (вказується які) видаються після отримання відповідного розпорядження або за рішенням керівника підприємства (вказується місце видачі). Працівники, які отримали такі засоби, повинні перевірити їх стан, провести підбір та мати постійно при собі або на робочому

місті. Протигази переводяться у бойовий стан за командою або самотійно, при наявності небезпеки забруднення повітря.

При проведенні термінової евакуації персоналу та відвідувачів з небезпечних зон залучається весь наявний службовий, а також особистий транспорт працівників підприємства, які повинні надавати його в розпорядження адміністрації.

Якщо на території підприємства або поблизу нього виникла небезпека розповсюдження особливо небезпечних інфекційних захворювань, усі працівники повинні суворо виконувати вимоги санітарно-епідеміологічної служби щодо проведення термінової профілактики та імунізації, ізоляції та лікування виявлених хворих, дотримуватися режиму із запобігання розповсюдженню інфекції [26].

При необхідності працівники, які прибули на роботу, повинні проходити санітарну обробку (вказується місце її проведення), дезінфекцію або міняти одяг, а водії транспортних засобів — здійснювати спеціальну обробку автотранспорту (вказується місце її проведення), а також виконувати інші вимоги та заходи, які перешкоджають розповсюдженню особливо небезпечних інфекційних захворювань.

Усі працівники підприємства повинні вжити необхідних заходів щодо зберігання матеріальних цінностей при загрозі або виникненні надзвичайних ситуацій. Заходи із захисту від надзвичайних ситуацій або з ліквідації їхніх наслідків повинні враховувати необхідність попередження або зменшення можливих збитків підприємству. Відповідальність за організацію охорони майна підприємства під час захисту від надзвичайних ситуацій або ліквідації їхніх наслідків покладається на (вказується посада, прізвище) [26].

ДОДАТОК Б

Презентація

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
КАФЕДРА «ФІЗИЧНОГО МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА»

ПРЕЗЕНТАЦІЯ
магістерської роботи на тему
«МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ
КОМПРЕСОРУ ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА НА ЕТАПІ ФІНІШНОЇ ОБРОБКИ»

Магістрант: студент групи ІФ-219м Дашкевич Д.В.

Науковий керівник к.т.н., доцент Ткач Д.В.

Запоріжжя, 2020 р.

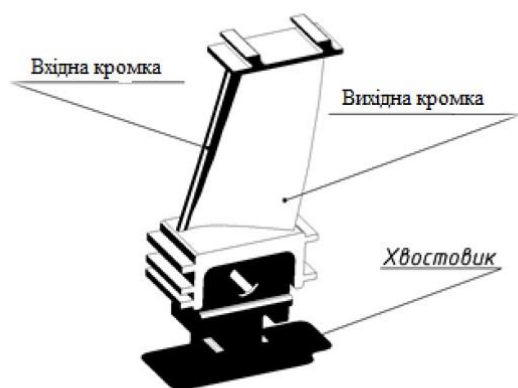
Рисунок Б.1

Мета дипломної роботи: підвищення втомної міцності та зносостійкості компресорних лопаток іонно-плазмовим азотуванням.

Задачі роботи:

- ▶ дослідити умови експлуатації робочої лопатки компресора.
- ▶ дослідити методи підвищення експлуатаційних властивостей
- ▶ визначити матеріал для виготовлення лопаток
- ▶ порівняти існуючі методи азотування
- ▶ визначити найоптимальніший режим азотування

Рисунок Б.2



Робоча лопатка компресора ГТД

Необхідні характеристики:

- зносостійкість,
- втомна витривалість,
- теплостійкість,
- корозійна стійкість.

Рисунок Б.3

Переваги іонно-плазмового азотування

- ▶ більш висока поверхнева твердість азотованих деталей,
- ▶ відсутність деформації деталей після обробки,
- ▶ підвищення межі витривалості і збільшення зносостійкості оброблених деталей,
- ▶ більш низька температура обробки, завдяки чому, в титані не відбувається структурних перетворень,
- ▶ можливість обробки глухих і наскрізних отворів,
- ▶ можливість отримання шарів заданого складу,
- ▶ відсутність забруднення навколишнього середовища,
- ▶ підвищення культури виробництва,
- ▶ зниження собівартості обробки в кілька разів.

Рисунок Б.4

BT8 - деформований жароміцний титановий сплав системи Ti - Al - Mo - Si належить до двофазних сплавів зі структурою $\alpha + \beta$

Хімічний склад BT8

Fe	C	Si	Mo	N	Ti	Al	Zr	O	H
до 0.3	До 0.1	0.2-0.4	2.8-3.8	до 0.05	87.55 - 90.9	5.8-7	до 0.5	до 0.15	до 0.015

Механічні властивості BT8

Форма	σ_B	δ_5	ψ	KCU	Термообробка
Пруток	930-980	6-8	15-20	200-300	Відпал

Рисунок Б.5

Установка для азотування

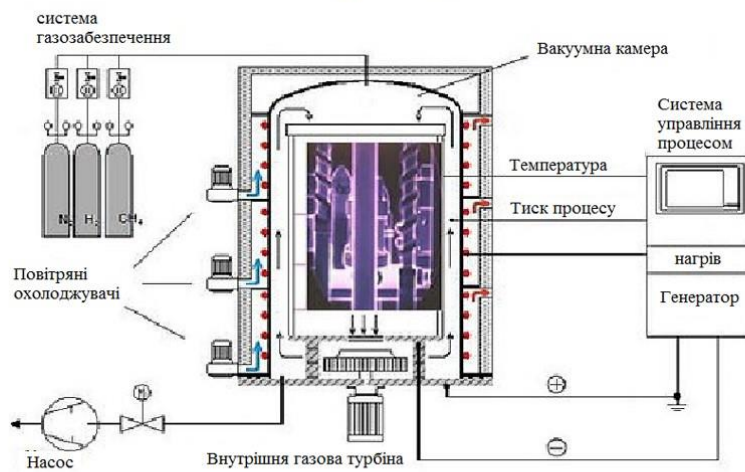


Рисунок Б.6

Режими іонно-плазмового азотування лопаток при випробуванні на втому

Режим	T°, C	P, Па	N ₂ %	A _v ,%	H ₂ ,%	τ, хв	H_{100}^{μ}	
							До ПА	Після ПА
36	775	192	22	68	10	240	410	648
37	550	64	9	86	5	30	405	591
P2	550	32	2	97	1	30	415	544
P1	550	240	9	86	5	20	408	559

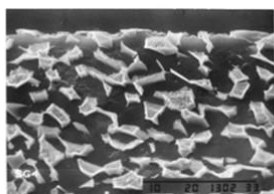
Рисунок Б.7

Режими ПА та результати випробувань на втому

Режим	τ, хв	P, Па	H, %	σ, МПа	$\bar{N} \cdot 10^6$, цикл.
36	240	192	58	550	0,352
58	30	64	46	550	1,124
P2	30	32	31	550	1,757
P1	20	240	37	550	1,922

Рисунок Б.8

Мікроструктура лопаток після ВП + ШІА



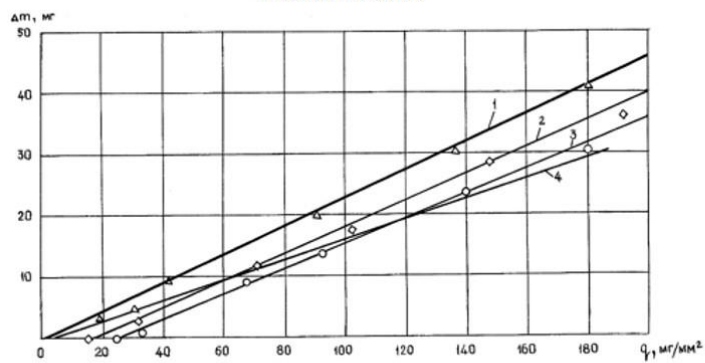
Мікроструктура лопаток після ВП + ПІА

Результати випробування на втому методом “сходи”

Параметри виривалості	ПА після ВП (режим Р1)	ПА після ВП (режим Р2)
$\bar{\sigma}_{-1}$, МПа	464	443

Рисунок Б.10

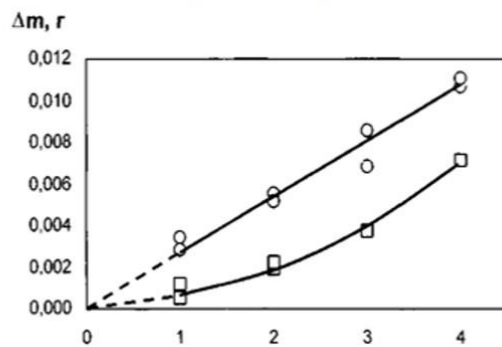
Залежність втрати маси зразків від величини пилового навантаження



1 - BT8; 2 - TiN ($\delta_1 = 4 \dots 8$ мкм); 3 - TiN ($\delta_2 = 12$ мкм); 4 - іонно-плазмове азотування

Рисунок Б.11

Криві зношування лопаток компресора в газообразній середі



○ - у вихідному стані, □ - після іонного азотування.

Рисунок Б.12