

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет робототехніки та штучного інтелекту

(повне найменування факультету)

Кафедра автоматизації та безпілотних систем

(повне найменування кафедри)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «БАКАЛАВР»**

**ПЛАЗМОВА УСТАНОВКА УПУ-3Д
UPU-3D PLASMA INSTALLATION**

спеціальність 153 Мікро- та наносистемна техніка
(шифр і назва спеціальності)

освітня програма «Мікро- та наносистемна техніка»
(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи МНТ-41
ДЬОМІНОВ Артем Юрійович

(підпис)

Керівник:
к.т.н., доцент
ПТАШЕНЧУК Віталій Віталійович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
«__» _____ 2026 р.
к.т.н., доцент

Гарант освітньої програми:
ПТАШЕНЧУК Віталій Віталійович

(підпис)

Луцьк–2026 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: комп'ютерних та інформаційних технологій

Кафедра: автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Ступінь вищої освіти: бакалавр

Галузь знань: 15 Автоматизація та приладобудування

Спеціальність: 153 Мікро- та наносистемна техніка

Освітня програма: «Мікро- та наносистемна техніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКІТ

к.т.н., доцент Олександр ПОВСТЯНОЙ

«__» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

ДЬОМІНОВА Артема Юрійовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи: плазмова установка УПУ-3Д

Керівник роботи: к.т.н., доцент ПТАШЕНЧУК Віталій Віталійович
затвержені наказом закладу вищої освіти від «31» 12 2025 р. №307/01-04

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи «01» червня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи: потужність плазмотронної установки, кВт – 20 – 60; напруга живлення установки, В (частота, Гц) – 50 -150 (50); максимальний струм дуги плазмотрона, А – 400; плазмоутворюючий газ – аргон, гелій, азот; межі робочого тиску в камері напилення, Па – 13,3 - 6,8 · 10⁴.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що потрібно розробити):
Анотація. Вступ. 1. Загальнотехнічна частина. 2. Розрахунково-конструкторська частина.
3. Спеціальна частина. 4. Висновки. 5. Список використаних джерел.

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:

1. Загальний вигляд установки(1 лист формату А1). 2. Структурна схема установки (1 лист формату А1). 3. Принципова схема установки (1 лист формату А1). 4. Складальне креслення черв'ячній редукторf(1 лист формату А1) 5. Деталювання (1 лист формату А1).

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1. Загально-технічна частина	ПТАШЕНЧУК В. В.		
Розділ 2. Розрахунково-конструкторська частина	ПТАШЕНЧУК В. В.		
Розділ 3. Спеціальна частина	ПТАШЕНЧУК В. В.		
Висновки	ПТАШЕНЧУК В. В.		
Нормоконтроль	ЛАПЧЕНКО Ю. С.		
Гарант ОП	ПТАШЕНЧУК В. В.		
Показник запозичень тексту		9,39 %	
Академічна доброчесність	ЛАПЧЕНКО Ю. С.		

7. Дата видачі завдання «17» січня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Обґрунтування теми	До 20.01.2026 р.	
2.	Огляд літератури із досліджуваної проблеми	До 25.01.2026 р.	
3.	Розділ 1. Загально-технічна частина	До 01.02.2026 р.	
4.	Розділ 2. Розрахунково-конструкторська частина	До 15.02.2026 р.	
5.	Розділ 3. Спеціальна частина	До 25.02.2026 р.	
6.	Висновки	До 01.03.2026 р.	
7.	Список літератури	До 10.03.2026 р.	
8.	Формування списку використаних джерел	До 20.03.2026 р.	
9.	Креслення загального вигляду установки УПУ-3Д	До 01.04.2026 р.	
10.	Креслення структурної схеми установки УПУ-3Д	До 10.04.2026 р.	
11.	Креслення принципової схеми установки УПУ-3Д	До 20.04.2026 р.	
12.	Креслення складалки редуктора установки УПУ-3Д	До 01.05.2026 р.	
13.	Креслення деталей редуктора установки УПУ-3Д	До 05.05.2026 р.	
14.	Формування додатків (специфікацій)	До 15.05.2026 р.	
15.	Нормоконтроль	До 25.05.2026 р.	
16.	Інструментальна перевірка на академічний плагіат	До 01.06.2026 р.	
17.	Представлення кваліфікаційної роботи бакалавра до захисту	До 05.06.2026 р.	

Здобувач вищої освіти

(підпис)

(ДЬОМІНОВ А. Ю.)

(прізвище, ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

(підпис)

(ПТАШЕНЧУК В. В.)

(прізвище, ініціали)

АНОТАЦІЯ

Дьомінов А. Ю. Плазмова установка УПУ-3Д. Рукопис.

Кваліфікаційна робота бакалавра ОП «Мікро - та наностистемна техніка».
Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2026.

Метою роботи є дослідження процесів плазмового формування захисних покриттів газотурбінних лопаток..

Випускна робота бакалавра складається з вступу, основних трьох розділів, висновків, літературних джерел та додатків. У першому розділі роботи розглянута характеристика установки УПУ-3Д, проведено порівняльний огляд аналогів та розглянуті основні фізичні процеси її роботи. В другому розділі роботи описано будову, роботу, наведені структурна та принципова схема установки, проведено розрахунок плазмотронного пристрою та вакуумного насосу. В третьому розділі розглянуті технологічні аспекти формування захисних покриттів та контролю параметрів їх якості.

Ключові слова: покриття, нанесення, плазма, температура, зносостійкість.

					ВР 240.00.00.000 ПЗ			
Зм.	Лист	№ докум.	підпис	дата				
Розробив	Дьомінов				Плазмова установка УПУ-3Д	Літера	Лист	Листів
Перевірив	Пташенчук						3	50
Н. Контр.	Лапченко					ЛНТУ		
Затверд.	Гуменюк					каф. АтаБС, гр. МНТ-41		

ANNOTATION

Deminov A. Plasma installation UPU-3D. Manuscript.

Qualification work of the bachelor's OP «Micro - and nanosystems technology».
Lutsk National Technical University. Lutsk, 2026.

The purpose of the work is to study the processes of plasma formation of protective coatings of gas turbine blades.

The bachelor's thesis consists of an introduction, three main sections, conclusions, literature sources and appendices. The first section of the work considers the characteristics of the UPU-3D installation, conducts a comparative review of analogues and considers the main physical processes of its operation. The second section of the work describes the structure, operation, provides a structural and schematic diagram of the installation, and calculates the plasmatron device and vacuum pump. The third section considers the technological aspects of forming protective coatings and controlling their quality parameters.

Keywords: coating, application, plasma, temperature, wear resistance.

					ВР 240.00.00.000 ПЗ	Лист
						4
Зм	Лист	№ докум.	підпис	дата		

ЗМІСТ

стор.

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 ЗАГАЛЬНО-ТЕХНІЧНА ЧАСТИНА	
1.1 Технічна характеристика та службове призначення установки для нанесення теплозахисних покриттів УПУ-3Д.....	8
1.2 Огляд аналогів та характеристика методів нанесення теплозахисних покриттів.....	9
1.3 Аналіз фізичних перетворень, які використані в роботі установки УПУ-3Д	21
РОЗДІЛ 2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА	
2.1 Будова та принцип роботи установки для нанесення захисних покриттів УПУ-3Д	21
2.2 Структурна схема установки УПУ-3Д.....	32
2.3 Принципова схема установки плазмового нанесення захисних покриттів УПУ-3Д	34
2.4 Розрахунок потужності плазмотрону.....	35
2.5 Розрахунок продуктивності вакуумного насосу вакуумметричного вузла установки.....	38
РОЗДІЛ 3 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА	
3.1 Технологічні особливості нанесення захисних покриттів.....	40
3.2 Контроль якості захисних покриттів.....	42
ВИСНОВКИ.....	47
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДДЕРЕЛ.....	49
ДОДАТКИ.....	51

ВСТУП

Захисні покриття деталей високонавантажених вузлів та механізмів забезпечують своєрідну ізоляцію матеріалів від агресивних середовищ та значно подовжують термін їх експлуатації за призначенням, знижуючи витрати на ремонт та обслуговування. Нанесення захисних покриттів має важливе значення в авіобудуванні та газотурбінній промисловості, де робочі поверхні деталей піддаються високим впливам температур з одночасним силовим навантаженням та дії агресивних середовищ при згоранні палива.

Одним з ефективних способів підвищення стійкості деталей впливу агресивних середовищ є застосування високоефективних технологій нанесення захисних покриттів, що підвищує ресурс роботи деталей в рази. Одним з таких способів є технологія плазмового газотермічного нанесення.

Актуальність теми – нанесення захисних покриттів на робочі поверхні турбінних лопаток та інших деталей проводиться для забезпечення захисту їх від екстримальних температур, газової корозії та ерозії, що дає змогу збільшити термін служби деталей у рази та значно знизити питому витрату палива в авіаційних та промислових газотурбінних установках.

Об'єкт дослідження – установка плазмового нанесення захисних покриттів УПУ-3Д.

Предмет дослідження – процеси формування захисних покриттів.

Мета роботи – дослідити процеси плазмового формування захисних покриттів газотурбінних лопаток.

Для досягнення поставленої мети поставлені наступні завдання:

1. Розглянути технічні параметри та службове призначення установки плазмового нанесення захисних покриттів УПУ-3Д.
2. Провести огляд існуючих аналогів та технологій нанесення захисних покриттів.

3. Провести опис фізичних перетворень, які використовуються в роботі утановки.

4. Розглянути будову та принцип роботи утановки плазмового нанесення захисних покриттів УПУ-3Д.

5. Розробити структурну схему утановки плазмового нанесення захисних покриттів УПУ-3Д.

6. Розробити принципову схему утановки плазмового нанесення захисних покриттів УПУ-3Д.

7. Провести розрахунок потужності плазмотрону.

8. Провести розрахунок необхідної продуктивності вакуумного насосу.

9. Описати аспекти перевірки якості покриттів турбінних лопаток.

10. Провести дослідження стійкості захисних покриттів до теплозмін.

					ВР 240.00.00.000 ПЗ	Лист
						7
Зм	Лист	№ докум.	підпис	дата		

РОЗДІЛ 1

ЗАГАЛЬНО-ТЕХНІЧНА ЧАСТИНА

1.1 Технічна характеристика та службове призначення установки для нанесення захисних покриттів УПУ-3Д

Універсальна плазмова установка для нанесення захисних покриттів моделі УПУ-3Д (рис. 1.1) призначена для нанесення як зносостійких, так і фрикційних та ізоляційних і інших спеціальних покриттів на поверхні деталей методом високотемпературного плазмового напилення порошкових матеріалів [1]. В якості плазмоутворюючих газів як правило застосовуються азот, аргон, гелій або їх суміші



Рисунок 1.1 – Плазмова установка УПУ-3Д [1]

Установка УПУ-3Д має наступні технічні характеристики [1]:

1. Потужність плазмотронної установки, кВт – 20 - 60;
2. Напряга живлення установки, В (частота, Гц) – 50 -150 (50);
3. Максимальний струм дуги плазмотрона, А – 400;
4. Плазмоутворюючий газ – аргон, гелій, азот;
5. Межі робочого тиску в камері напилення, Па – 13,3 - 6,8 · 10⁴;

					ВР 240.00.00.000 ПЗ	Лист
Зм	Лист	№ докум.	підпис	дата		8

6. Дистанція до поверхні напилення, см – до 85;
7. Об'єм камери напилення, м³ – 1,3;
8. Розміри напилюваної деталі, мм:
 - 8.1 Циліндрична поверхня:
 - довжина – не більше 310;
 - діаметр – не більше 200;
 - 8.2. Плоска поверхня:
 - довжина – до 310;
 - ширина – до 150;
9. Допустима температура в камері напилення, К – 673;
10. Витрата плазмоутворюючих газових сумішей, м³/с: 0,00025 – 0,0017;
11. Продуктивність процесу напилення, кг/с – до 0,00033;
12. Розмір частинок порошкових матеріалів для напилення, мкм – 10-100;
13. Ресурс роботи електрольного сопла, год (не менше) – 4;
14. Габаритні розміри установки, мм (не менше) – 2240x1610x1260;
15. Вага установки, кг (не більше) – 1100.

1.2 Огляд аналогів та характеристика методів нанесення теплозахисних покриттів

Установка нанесення захисних покриттів SEO–TECH серії МАП (рис. 1.2). Така установка призначена для нанесення як багатокомпонентних конденсованих, дифузійних так і конденсовано-дифузійних покриттів на деталях авіаційної техніки [2]. Сфера застосування наведеної установки охоплює виробничі лінії ремонтних підприємств авіадвигунів та турбін до них.

Для забезпечення належного функціонування технологічного процесу нанесення захисних покриттів установка забезпечена наступними компонентами [2]:

- вакуумною камерою з приводними механізмами системи вакуумування;
- охолоджувальною системою;

- пневмосистемою;
- пультом керування;
- силовим вузлом.



Рисунок 1.2 – Установа нанесення захисних покриттів
SEO–TECH серії МАП [2]

Основні технічні характеристики установки SEO–TECH серії МАП наведені в таблиці 1.1

Таблиця 1.1 – Технічні характеристики установки SEO–TECH [2]

№	Параметр	Значення
1	2	3
1	Вхідні параметри електроенергії установки: – рід струму – напруга номінальна – частота струму номінальна – споживана потужність, не більше	змінний трифазний 380 В 50/60 Гц 60 Вт

Продовження таблиці 1.1

1	2	3
2	Інверторне джерело живлення дугових випарників: – температура охолоджуючої води / протік – споживана потужність, не більше – номінальний рівень потужності в навантаженні – максимальний струм навантаження – діапазон зміни струму навантаження	20...25°C/10...20 л/хв 35 кВт 30 кВт 1200 А 60...1200 А (з кроком 1 А)
3	Джерело живлення зміщення підкладки: – споживана потужність, не більше – діапазон регулювання вихідної напруги – тип вихідної напруги – діапазон регулювання вихідного струму – інтерфейс віддаленого управління	11 кВт 20...300 В (з кроком 1 В) імпульсна постійна 0,5...33,33 А (з кроком 0,01 А) RS-485
4	Охолодження (надається замовником)	водяне замкнуте
5	Умови експлуатації: – допустима температура в приміщенні – максимальна відносна вологість – атмосферний тиск	15...35 °C до 80 % при 25 °C 866,6...1067 мбар
6	Маса установки, не більше	4000 кг
7	Габаритні розміри установки (глибина × ширина × висота), не більше	3000×4000×2700 мм
8	Час досягнення робочого вакууму в вакуумній камері при повторному запуску, не більше	40 хв
9	Робочий тиск у камері, не більше	5×10 ⁻⁵ мбар

Зм	Лист	№ докум.	підпис	дата

Продовження таблиці 1.1

1	2	3
10	<p>Максимальні габарити деталей, що обробляються:</p> <ul style="list-style-type: none"> – діаметр виробу – довжина виробу 	<p>120 мм</p> <p>150 мм</p>
11	<p>Привід вертикального переміщення катода (нижня і верхня межа регулюється програмно):</p> <ul style="list-style-type: none"> – максимальний діапазон переміщення – точність позиціонування катода, не менше 	<p>0...300 мм</p> <p>± 1 мм</p>
12	<p>Механізм обертання виробів, що напилюються:</p> <ul style="list-style-type: none"> – кут обертання навколо осі катода – швидкість обертання виробів 	<p>0...360°</p> <p>0...2 об/хв (плавно)</p>
13	Кількість одночасно оброблюваних виробів	12, 24, кратно 24
14	Система управління	комп'ютерна
15	<p>Керуючий комп'ютер</p> <p>Програма управління забезпечує:</p> <ul style="list-style-type: none"> – ручний і автоматичний режими роботи вакуумної системи – діагностику функціонування основних систем установки – блокування роботи установки при відключенні живлення – контроль безаварійної роботи установки 	промисловий
16	Тривалість безперервної роботи, не менше	8 годин
17	Гарантований термін служби (з дня введення в експлуатацію у Замовника)	3 роки

Зм	Лист	№ докум.	підпис	дата

Установка для нанесення захисних покриттів SEO-TEC MS (рис. 1.3). Ця установка застосовується для нанесення на поверхні деталей багатофункціональних захисних нанокompозитних покриттів зі сплавів Zr, Ti, Cr товщиною 10-25 мкм а також металеві, оксидні, карбідні та інші типи покриттів на вироби різного призначення, виготовлених зі сталей та титанових сплавів, зокрема лопатки газотурбінних двигунів [3].



Рисунок 1.3 – Установка нанесення захисних покриттів SEO-TEC MS [3]

Програмне забезпечення установки передбачає наступні функції [3]:

- автоматичний та ручний режим відкачування повітря з камери;
- відображення мнемосхеми режимів роботи установки та усіх наявних параметрів системи управління даною установкою на екрані монітора;
- програмування наявних режимів напilenня захисних матеріалів та їх відтворення;
- блокування роботи установки при виникненні аварійних ситуацій та некоректній роботі систем установки.

Основні технічні параметри установки нанесення захисних покриттів SEO-TEC MS наведені в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Технічні параметри установки SEO-TEC MS [3]

№	Параметр	Значення
1	2	3
1	Мережа живлення	380V / 50Hz (60Hz)
2	Потужність, що споживається установкою, кВт, не більше	60
3	Охолодження	водяне замкнуте
4	Маса установки, kg, не більше	2000
5	Габаритні розміри: (довжина, ширина, висота), мм, не більше	2800 × 3500 × 2100
6	Час досягнення робочого вакууму, хв, не більше	20
7	Система розпилення	магнетронна
8	Іонне джерело: – робочий газ – довжина очищення деталей, мм	багатоосередкове аргон 200
9	Система електроживлення магнетронів: – максимальна споживана потужність 1 каналу, kW – вхідна напруга, V – вихідний струм, A – режим роботи – частота, kHz	13,6 65 - 650 0,1 - 18,5 DC, PULSE 1 - 100
10	Блок живлення іонного джерела: – мережа живлення: – максимальна вихідна потужність, kW – максимальний вихідний струм, A	трифазна 2 1,0
11	Система напуску газу	(H ₂ ; C ₂ H ₂ ; Ar)
12	Нагрівач: – температура нагрівання виробу, до °C	Резистивний 500

Зм	Лист	№ докум.	підпис	дата

BP 240.00.00.000 ПЗ

Лист

14

3. Електронно-променева гармата.
4. Стробоскопічне оглядове вікно.
5. Шафа керування з високовольтним джерелом живлення гармати.
6. Система охолодження камери, тигля та гармати.
7. Пневмосистема для забезпечення роботи приводу подачі зразків та елементів вакуумної системи.
8. Система подачі газів.



Рисунок 1.4 – Установка серії SEO-EBPVD TEC [4]

Програма керування установкою забезпечує [4]:

- автоматичний та ручний режим керування вакуумною системою;
- відображення мнемосхеми вакуумної системи на екрані монітора установки;
- програмування та відтворення основних режимів напilenня захисних покриттів;
- контроль безаварійної роботи установки.

Основні технічні параметри установки нанесення захисних керамічних покриттів серії SEO-EBPVD TEC наведені в таблиці 1.4

Таблиця 1.4 – Технічні параметри установки SEO-EBPVD ТЕС [4]

№	Параметр	Значення
1	2	3
1	Мережа живлення	380V, 50/60 Hz
2	Потужність, що споживається установкою, kVA, не більше	35
3	Охолодження	стаціонарне водяне
4	Маса установки, kg, не більше	11000
5	Габаритні розміри: (довжина, ширина, висота), mm, не більше	4000 × 2000 × 2000
6	Вакуумна система	двоступенева з дифузійним насосом
7	Робочий тиск у модулі наплення, не більше:	$1 \times 10^3 - 1 \times 10^4$
8	Температура нагрівання деталей, °C	950±50
9	Система напуску газу	2 канали (O ₂ , Ar)
10	Тигель для випаровування	водоохолоджуваний
11	Переміщення штабика в тиглі по вертикальній осі, mm	від 150
12	Візуалізація та спостереження за процесом випаровування	стробоскопічне, оглядове вікно
13	Електронно-променева гармата – потужність електронного променя, kW – прискорююча напруга, kV – частота розгортки електронного променя, Hz, не більше – форма розгортки	газорозрядна від 20 від 20 100 спіралеподібна
14	Система керування установки	комп'ютерна
15	Програмне забезпечення	SEO TECH Control

Якість отриманих захисних покриттів, їх склад, структура та експлуатаційні властивості в значній мірі визначаються технологією їх формування. Загалом можна виділити два основні способи отримання захисних покриттів: дифузія та напилення [5].

Дифузійне покриття отримується в ході хіміко-термічної обробки, при якому атоми легуючих елементів таких як цинк, хром, алюміній, нікель, бор та інші впроваджуються в кристалічну решітку поверхневого шару оброблюваної деталі [5]. В результаті такого процесу створюється міцний поверхневий захисний шар, який стає частиною усього металу виробу, а не лише плівкою на його поверхні. Особливістю дифузійного покриття також є незначні зміни розмірів деталі.

Напилення поверхонь деталей представляє собою процес нанесення захисних шарів для покращення їх експлуатаційних властивостей та подовження терміну їх роботи [5]. Вони сутєво збільшують зносостійкість, корозійну стійкість, термостійкість та твердість металевих виробів. Напиленні покриття завжди пов'язані зі зміною розмірів деталей, що необхідно враховувати при реставрації деталей.

Лазерне осадження покриттів. В ході застосування лазерів в процесах нанесення захисних покриттів швидкість осадження останніх досягає величин 5-10 мм/с. Процес характеризується високою продуктивністю. Для захисту від окислення нанесення захисних покриттів відбувається в середовищі захисних газів. Покращення адгезії покриття спостерігається при незначному підплавленні поверхні основи. До недоліків процесу лазерного нанесення варто віднести утворення пор і значних розтягуючих залишкових напружень в покритті, які в подальшому призводять до появи розтріскувань захисних шарів та негативно впливають на циклічну довговічність сплавів.

Електронно-променеве напилення захисних покриттів. При реалізації електронно-променевого способу нанесення захисних покриттів випаровування матеріалу забезпечується бомбардувальним потоком електронів, основна частка енергії яких, витрачається на нагрівання матеріалу, який в

подальшому конденсується на поверхні деталі. Для забезпечення належного зчеплення плівки покриття з поверхнею деталі, останню підігрівають. Підігрів забезпечує також формування необхідної структури захисного покриття. Для отримання якісних однорідних по складу та структурі покриттів проводиться обертальний або зворотно-поступальний рух оброблюваної деталі.

Плазмове напилення захисного матеріалу. В процесі плазмового напилення захисне покриття формується з великого числа дрібних розплавлених частинок, які переносяться на поверхню основи при розплавленні порошку. У існуючих технологіях плазмового напилення захисних покриттів велике значення у формуванні якісного покриття мають час перебування частинок в плазмі і час доставки нагрітих частинок до поверхні основного матеріалу. У потоці плазми частинки порошку захисного матеріалу нагріваються приблизно до 10000 К а сама передача тепла від плазми до частинок порошку забезпечується процесами теплопровідності та конвекції. Покриття формується шляхом поетапного укладання частинок, на поверхню основи. Для зменшення пористості та підвищення однорідності захисного покриття проводять зменшення розміру напилюваних частинок до фракції 10-20 мкм.

Плазмове напилення переважно проводиться у вакуумі, що дає змогу формувати якісні покриття без зайвих частинок. Як плазмоутворюючі гази використовуються зазвичай Ar, H₂, He, N₂ або їхні суміші.

Провівши огляд установок по нанесенню захисних покриттів та методів їх формування можна зробити висновок, що плазмове напилення захисних матеріалів є сучасним та високоефективним способом підвищення надійності та довговічності важконавантажених деталей.

Вакуумно-плазмова технологія має ряд переваг:

1. Швидкість частинок напилюваних речовин в 2-3 рази вища, ніж при плазмовому напиленні на повітрі. Це забезпечує вищу щільність покриттів, менш ніж до 0,5 % зменшує пористість, підвищує якість поверхонь.

2. Покращуються умови для взаємодифузії між покриттям і підложкою або основою.

					ВР 240.00.00.000 ПЗ	Лист
						19
Зм	Лист	№ докум.	підпис	дата		

3. При нанесенні покриттів у вакуумі відсутні реакційні гази, які можуть призводити до окислення металів, погіршення зчеплення і сколювання кераміки. Склад покриття на деталях повністю відповідає складу початкового матеріалу для покриття.

4. Високий відсоток використання матеріалів для покриття (до 40 %). При вакуумплазмовому напиленні одержують покриття щільніші, ніж в установках електронно-променевого випаровування.

5. Найбільш висока точність контролю складу покриття, чим при будь-якому іншому процесі.

6. Метод дозволяє напилювати матеріали з великою відмінністю тиску пари при збереженні низьких значень температури поверхні деталей (200-300°C), що виключає структурні зміни в поверхневому шарі основи. Плазмовий метод широко використовується для нанесення як керамічних, так і металевих покриттів.

Також варто відмітити деякі негативні особливості процесу вакуумплазмового напилення захисних покриттів, а саме:

- застосування матеріалів тільки в порошковій формі;
- застосування матеріалів із стабільною рідкою фазою;
- мінімальна товщина покриттів обмежена розмірами частинок порошоків;
- метод не дозволяє покривати внутрішні поверхні;
- розміри деталей, що покриваються, обмежені розмірами вакуумної камери.

Підсумовуючи можна зробити висновок, що плазмовий метод нанесення захисних покриттів є сучасним та ефективним способом отримання металевих і керамічних покриттів, які знаходять широке застосування на робочих і соплових лопатках газових турбін, авіаційних двигунів та інших важконавантажених деталях силових вузлів.

1.3 Аналіз фізичних перетворень, які використані в роботі установки УПУ-3Д

Основні фізичні перетворення при плазмовому нанесенні захисних покриттів являють собою цілий ланцюг термодинамічних та кінетичних перетворень речовини. Сюди можна віднести генерацію високотемпературної плазми, розплавлення вихідного матеріалу (порошку, дроту) із зміною агрегатного стану, перенесення високошвидкісного потоку частинок та їх подальша кристалізація при взаємодії з основою оброблюваної деталі.

Увесь цикл наявних змін включає чотири ключові етапи фізичних перетворень:

1. Генерація низькотемпературної плазми, яка забезпечується електричною дугою, яка підпалюється між катодом та анодом плазмотрону. В подальшому робочий газ, яким може бути аргон, азот, водень або гелій іонізується під впливом електричного поля та сформованих високих температур, переходячи у стан низькотемпературної плазми. Температура плазмового струменя в такому випадку досягає значення 5000-15000 °С, чого цілком достатньо для ефективного плавлення та нанесення усіх наявних захисних покриттів.

2. Нагрівання та плавлення захисного матеріалу шляхом впровадження його в плазмовий струмінь у вигляді порошку з фракцією 10-100 мкм та подальшою його трансформацією:

– фазовий перехід, при якому тверді частинки матеріалу поглинають колосальну теплову енергію струменя і переходять у рідкий стан;

– інтенсифікація процесу плавлення, при якій матеріал нагрівається до температур, близьких до точки кипіння, але в умовах короткочасного перебування в струмені (мілісекунди) випаровування не перевищуючи допустимих меж.

3. Динамічне перенесення, при якому плазмовий струмінь прискорює розплавлені мікрокраплини захисного матеріалу до швидкостей порядку 300-600 м/с та формується двофазний потік, який складається з розпеченого газу та

рідких частинок. Краплі матеріалу набувають сферичної форми під дією сил поверхневого натягу.

4. Зіткнення, деформація та кристалізація захисного матеріалу. Потік розплавленого захисного матеріалу спрямовується на попередньо підготовлену поверхню деталі, якою є основа або підкладка. При взаємодії з основою рідкі краплі захисного матеріалу миттєво розплющуються, утворюючи тонкі пелюстки завтовшки кілька мікрометрів. Відбувається фізико-хімічне зчеплення розплавленого матеріалу з основою, яка забезпечує високу міцність кріплення покриття. Через значне відведення тепла вглиб холодної деталі відбувається процес гартування, краплі матеріалу при цьому тверднуть зі швидкістю до $(10^6) \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$.

Завдяки процесу миттєвої кристалізації формується дрібнозерниста структура захисного покриття з високими механічними властивостями (зносостійкість, корозійна стійкість та інш.). Захисний матеріал міцно з'єднується з основою оброблюваної деталі без її термічної деформації.

					ВР 240.00.00.000 ПЗ	Лист
						22
Зм	Лист	№ докум.	підпис	дата		

РОЗДІЛ 2

ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

2.1 Будова та принцип роботи установки для нанесення захисних покриттів УПУ-3Д

Установка для нанесення захисних покриттів моделі УПУ-3Д загалом складається з таких основних елементів та вузлів (рис. 2.1), а саме:

- вакуумної камери, з охолоджувальною водяною сорочкою;
- завантажувального вікна;
- маніпулятора;
- системи вакуумування;
- пульта управління установкою;
- джерела живлення;
- системи охолодження;
- плазмотрона;
- підйомного механізму;
- порошкодозувального механізму.

Вакуумна камера установки являє собою ємність циліндричної форми з внутрішнім діаметром порядку 1050 мм та висотою 2100 мм.

Завантажувальне вікно змонтоване на корпусі камери установки з використанням кронштейнів та виконує також функцію оглядового вікна. Завантажувальне вікно має діаметр 226 мм.

Маніпулятор знаходиться в середині камери установки та дозволяє змінювати орієнтацію деталі в просторі в процесі її обробки.

Підйомний механізм дає можливість регулювати положення деталі в вертикальній площині, змінювати дистанцію напилення та регулювати якість покриттів.

Плазмотрон застосовується для утворення низькотемпературної плазми та розміщений у верхній частині камери.

					ВР 240.00.00.000 ПЗ	Лист
						23
Зм	Лист	№ докум.	підпис	дата		

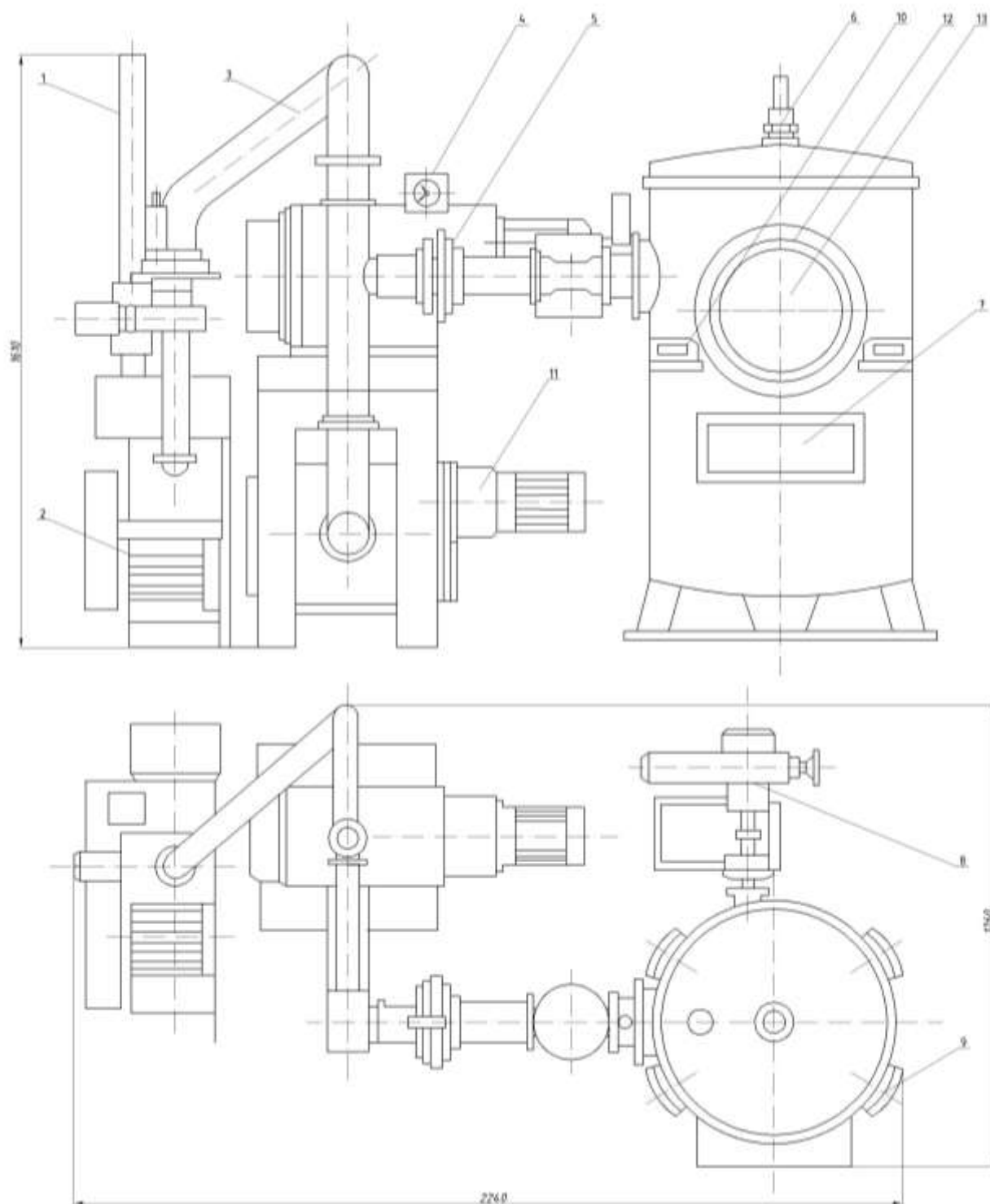


Рисунок 2.1 – Установка УПУ-3Д:

1 – витяжка; 2 та 5 – вакуумний насос; 3 – вакуумопровід; 4 – вакуумметричний пристрій; 6 – плазмотрон; 7 – пульт управління; 8 – привід підйомного механізму; 9 – привід переміщення деталі в просторі; 10 – вакуумметр; 11 – порошкодозувальний механізм установки; 12 та 13 – завантажувальне та оглядове вікно, 14 – корпус камери наплення покриттів

Зм	Лист	№ докум.	підпис	дата

ВР 240.00.00.000 ПЗ

Лист

24

Основним функціональним робочим вузлом плазмової установки по нанесенню захисних покриттів є плазмотрон, який забезпечує генерування плазмового струменя та формує високошвидкісний потік частинок напилюваного захисного матеріалу, який знаходиться в розплавленому високопластичному стані. На сьогоднішній час залежно від особливостей процесу нанесення захисного покриття існує багато різних конструкцій плазмотронних пристроїв. Для реалізації напилення порошковими сплавами найбільшого поширення набули плазмотронні пристрої постійного струму та прямої полярності. Плазмотрони зворотної полярності застосовують переважно для напилення захисних покриттів на алюмінієві вироби.

Незважаючи на велику різноманітність наявних конструкцій плазмотронних пристроїв, принцип їхньої дії та конструкція дуже схожі. Принцип роботи плазмотронів заснований на стисненні дуги водоохолоджуванним соплом та газом, який проходить через нього. Плазмотрон загалом складається з водоохолоджуваних катодів та анода, які відокремлені один від одного ізолюючим матеріалом, яким найчастіше є текстоліт. У катоді плазмотронного пристрою закріплений вольфрамовий електрод, який за рахунок цього має високу теплостійкість і не плавиться в ході роботи. В аноді плазмотронна передбачені спеціальні канали для формування плазмової дуги, подачі газів та порошку.

Необхідні компоненти, такі як електроенергія, плазмоутворюючий газ, вода для охолодження та безпосередньо сам порошковий матеріал захисного покриття підводяться до плазмотрона в необхідній кількості через пульт управління. На ньому розташовані спеціальні пускові, вимірювальні та сигнальні прилади та пристрої для контролю основних параметрів роботи плазмотронної установки, таких як тиск плазмоутворюючого та транспортуючого газів та охолоджувальної води. При їх недостатніх витратах і тисках включається режим захисту від пошкодження завдяки розриву релем відповідних електричних ланцюгів і автоматичному відключенні джерела живлення плазмової дуги, не даючи плазмотрону розплавитися.

					ВР 240.00.00.000 ПЗ	Лист
						25
Зм	Лист	№ докум.	підпис	дата		

Конструкції плазмотронного пристрою повинна забезпечувати виконання наступних основних вимог:

- високу надійність;
- стабільність роботи плазмотрону по забезпеченню параметрів робочої дуги;
- великий термін служби при безперервній роботі плазмотрону;
- вільне проходження порошку матеріалу різної форми у зону наплення через канали плазмотронного пристрою;
- можливість використання в якості захисного матеріалу наплавних металів у вигляді дротів або прутків;
- достатнє і надійне охолодження робочих ділянок плазмотрона, схильних до появи високого теплового навантаження;
- можливість реалізації наплення деталей різної форми, включаючи зовнішні та внутрішні поверхні.

Експлуатація плазмотронних пристроїв у реальних виробничих умовах показала високу надійність таких пристроїв по генеруванні теплової енергії. Як правило, плазмотронні пристрої виходять з ладу через розплавлення плазмоутворюючого сопла, яке відбувається в результаті порушення режиму наплення та недостатнього водоохолодження. Перегрівання сопла плазмотрону відбувається в основному через завищене значення сили струму, яке перевищує допустиму величину або через замикання плазмотрона на деталь. Найчастіші технічні несправності в ході роботи плазмотронних пристроїв полягають у забиванні зовнішнього сопла, недостатньо висушеним порошком та підгорянні вольфрамового електрода. У першому випадку сопло плазмотрона прочищають спеціальною металевою щіткою, у другому проводять встановлення нового електрода.

В установці УПУ-3Д застосований модернізований багатосекційний плазмотронний пристрій ПН-7М (рис. 2.2) з аксіальною подачею газу та шістьма міжелектродними вставками, за рахунок чого досягнуто підвищення робочої напруги до 380 В.

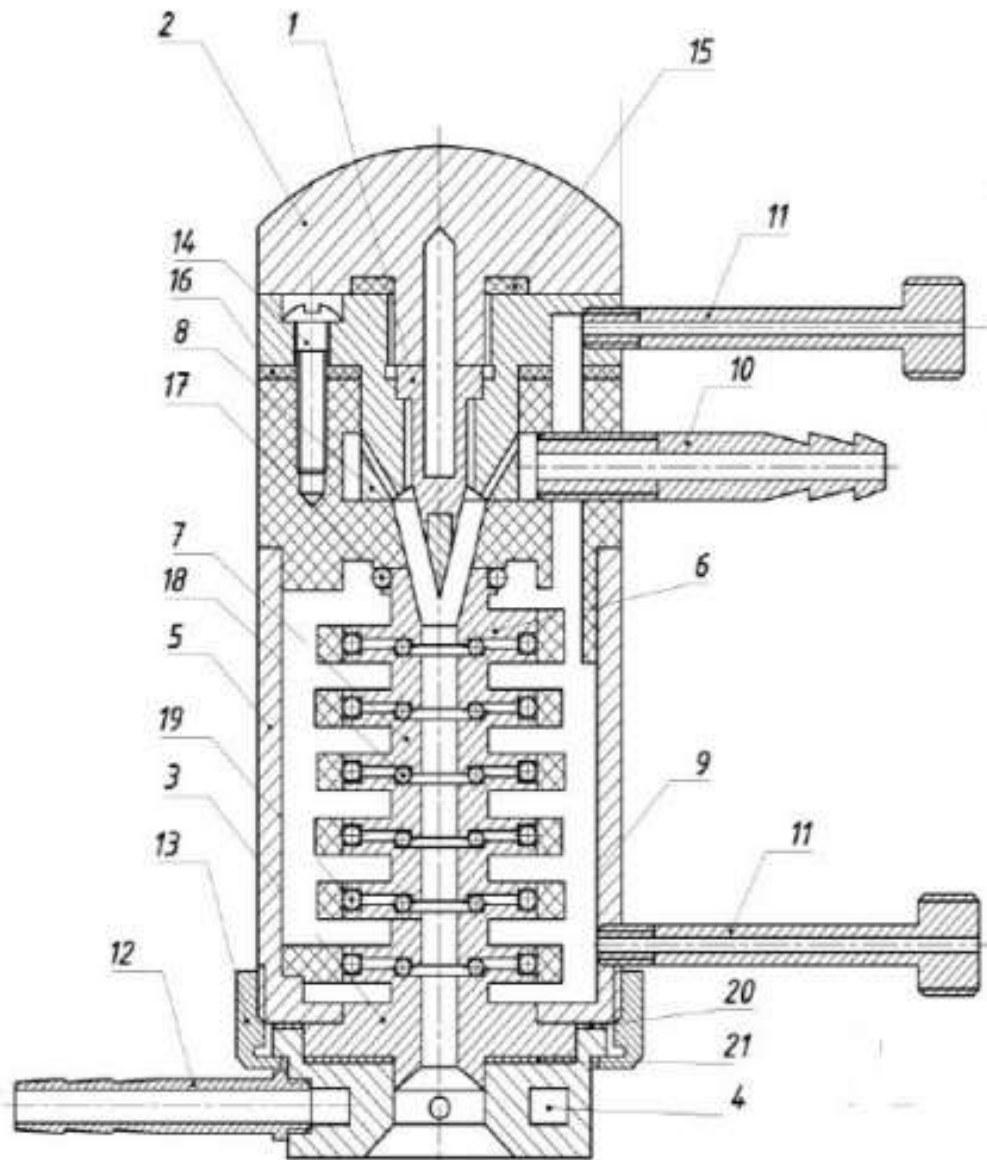


Рисунок 2.2 – Плазмотрон [6]:

1 – катод; 2 – кришка; 3 – анод; 4 – сопло; 5 – стальний кожух; 6 – вхідна секція міжелектродної вставки; 7 – секція міжелектродної вставки; 8 – втулка; 9 – корпус катода; 10 – трубка підведення повітря; 11 – трубка підведення і відведення охолоджуючого засобу (води); 12 – штуцер підведення порошку; 13 – гайка; 14 – стяжний гвинт; 15-21 – прокладки

Наведена конструкція плазмотрону забезпечує отримання захисних покриттів з різноманітних матеріалів та з високою міцністю зчеплення з основою оброблюваної деталі.

Зм	Лист	№ докум.	підпис	дата

Після плазмотрону порошкодозувальний механізм є найважливішим вузлом установки, та в значній мірі визначає якість напилення. Властивості отриманих захисних покриттів та технологічні характеристики самого процесу напилення значно залежать від таких параметрів роботи порошкового дозувального механізму, як подача порошку, рівномірність подачі, можливість одночасного напилення порошків різної зернистості та маси.

Від правильності та стабільності роботи дозувального пристрою залежить якість отриманих захисних покриттів. Конструкція наявних порошкодозувальних пристроїв досить різноманітна. За принципом роботи вони поділяються на такі види:

- механічні;
- вібраційні;
- електромагнітні.

Найбільшу стабільність подачі порошку забезпечує порошкоживлювач з механічним дозуванням і саме він є більш перспективним при проведенні процесу нанесення порошкових матеріалів плазмовим напиленням на лопатки газотурбінних двигунів.

У комплект установки УПУ-3Д входить порошковий дозувальний механізм механічного типу. Такий механізм складається з бункера, міксера та дискового приводу регулювання подачі порошку. Газова система дозувального пристрою складається з ротаметра, запобіжних клапанів, електромагнітних вентилів, дроселів та шлангів. Керування роботою дозувального механізму проводиться за допомогою контролера. Для приводу дозувального пристрою застосовується електродвигун постійного струму.

Дозувальний пристрій подачі порошку може працювати як в автономному режимі, так і керуватися центральною панеллю оператора. подача порошку відбувається за допомогою азоту або аргону.

Порошкодозувальний механізм (рис. 2.3) забезпечує подання необхідної кількості порошку захисного матеріалу покриття в струмінь плазмового потоку.



Рисунок 2.3 – Порошкодозувальний пристрій установки УПУ-3Д [7]

В установці УПУ-3Д для плазмового нанесення покриттів в контрольованій атмосфері для рівномірного дозування порошкового матеріалу застосовується спеціальний механізм роторного типу. Порошок з бункера дозувального механізму подається в канал над ротором у формі шестерні та заповнює її пази. В подальшому при обертанні ротора порошок висипається в нижню частину дозувального механізму та транспортується газом потрапляє в плазмотронний пристрій. Ущільнюючі прокладки запобігають підсмоктуванню повітря а дозування подачі порошкового захисного матеріалу забезпечується зміною частоти обертання ротора.

Для належного функціонування установки плазмового напилення моделі УПУ-3Д використовується штатне джерело живлення дуги плазмотронного пристрою, яким є спеціалізований тиристорний випрямляч серії ДПН-160/600.

Це джерело забезпечує плавне регулювання робочого струму в діапазоні від 60 до 600 А та стабільне горіння дуги, необхідне для якісного процесу нанесення металевих і керамічних покриттів.

Для функціонування самої установки її потрібно підключення до промислової електромережі 380 В із споживаною потужністю до 35 кВт, а також підведення стисненого газу (аргон, гелій, азот, водень) та системи автономного водяного охолодження. Джерело живлення разом із шафою управління (рис. 2.4) входять до базового комплексу комплексу обладнання.



Рисунок 2.4 – Джерело живлення установки УПУ-3Д [7]

Електрична схема джерела постійної напруги ДПН 160/600 та ланцюгів її управління представлена на рисунку 2.5.

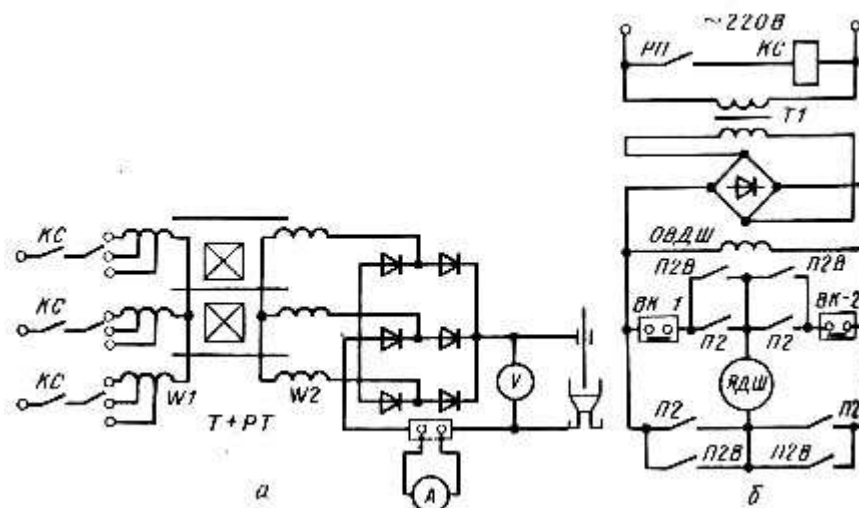


Рисунок 2.5 – Електрична схема ДПН 160/600 (а) та схема ланцюгів управління (б) [7]

Зм	Лист	№ докум.	підпис	дата

Основними технічними характеристиками джерела живлення моделі ДПМ 160/600 є [6]:

- номінальний робочий струм в межах 600 А;
- максимальна напруга холостого ходу складає 160 В;
- межі регулювання робочої напруги складають від 40 до 70 В;
- межі регулювання робочого струму знаходяться в межах від 200 до 600 А;
- номінальна споживана потужність джерела складає 45 кВА;
- ККД джерела на рівні 0,73;
- маса 915 кг.

Трансформатор Т (рис. 2.5) під'єднується до мережі через силовий контактор КС. Первинна обмотка трансформатора W секційна, що дає можливість ступінчастого регулювання необхідного значення напруги холостого ходу, наприклад, у випадку застосування різних плазмоутворюючих газів.

Регулювання робочого струму плазмотрону забезпечується переміщенням спеціальних магнітних шунтів, при якому відбувається зміна частки магнітного потоку, створеного первиною обмоткою трансформатора.

Для забезпечення різних значень напруг холостого ходу реалізований поділ первинної обмотки трансформатора на три секції. Дві окремі секції обмотки розташовані над вторинною обмоткою. Третя ж секція знаходиться по іншу сторону шунта. Рівні напруг змінюють перенесенням перемички на панелі трансформатора.

Робота установки УПУ-3Д полягає в швидкому нагріванні та розплавленні плазмою частинок порошку до 10000 К теплопровідністю та конвекцією та подачі їх на поверхню оброблюваної деталі де вони розтікаються при цьому і в подальшому кристалізуються. Наступні порції розплавленого порошку падають на уже закристалізовані поверхні та утворюють пластинчасту структуру. Захисне покриття формується поетапним укладанням частинок захисного матеріалу на оброблювану поверхню.

2.2 Структурна схема установки УПУ-3Д

На рисунку 2.6 представлена структурна схема установки в УПУ-3Д в якій представлені основні її функціональні елементи та їх взаємозв'язок між собою, що полегшує розуміння процесів її роботи.

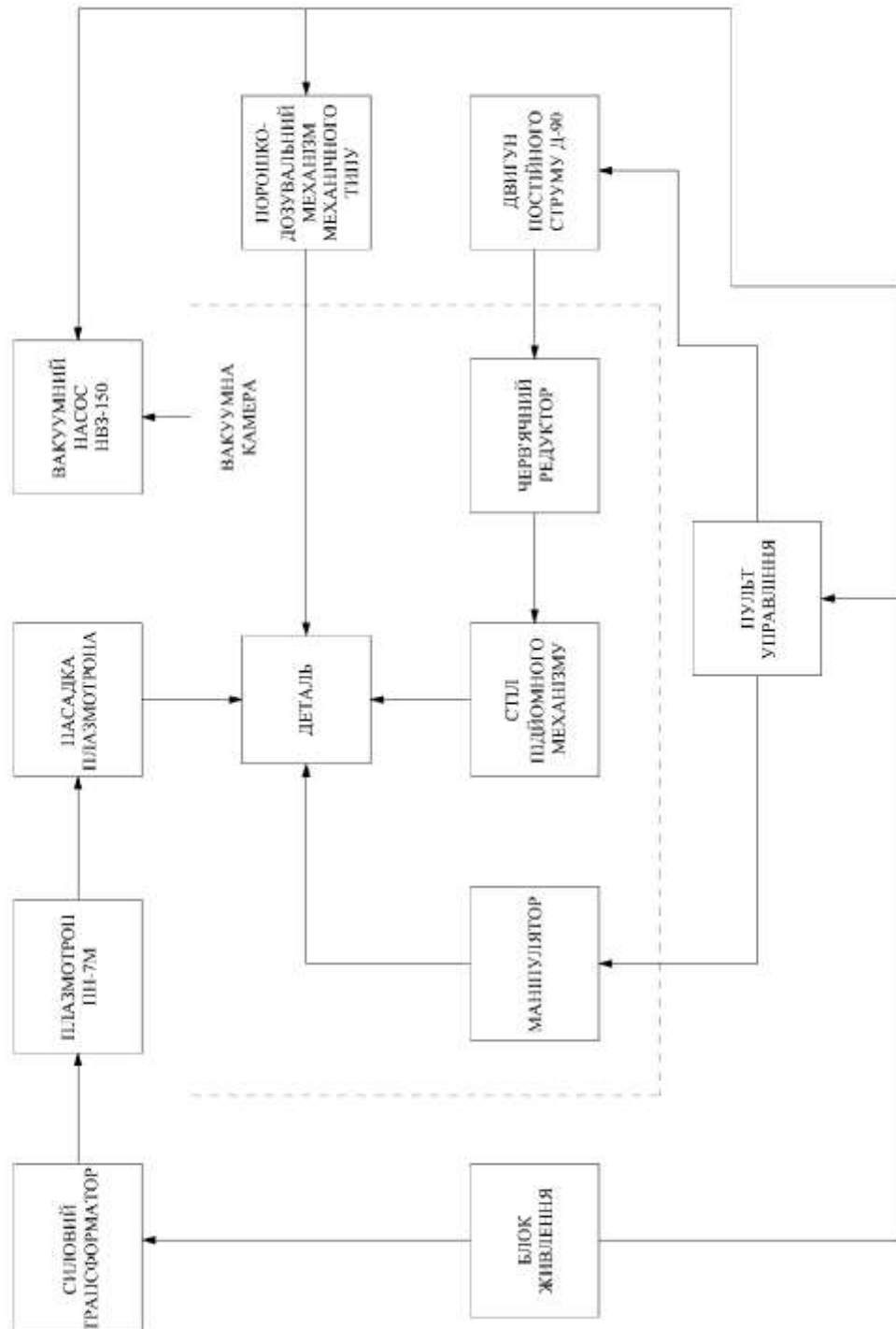


Рисунок 2.6 – Структурна схема установки УПУ-3Д

Зм	Лист	№ докум.	підпис	дата

Насадка плазмотронного пристрою застосовується для збільшення величини тиску плазмового струменя та подальшої подачі його на оброблювану поверхню.

Маніпуляторний пристрій застосовується для заданого переміщення деталі в робочій камері установки в ході оброблення важкодоступних зон оброблюваних деталей.

Стіл підйомного механізму застосовується для утримування оброблюваної деталі в процесі напилення захисного покриття.

Черв'ячний редуктор установки забезпечує плавне опускання та піднімання столика утримування оброблюваної деталі та проводити регулювання дистанції від сопла плазмотрона до основи підложки в межах від 20 до 85 см.

Вакуумний насос моделі НВЗ-150 забезпечує видалення газів та парів з робочої камери шляхом відкачування до встановленого рівня розрідженості камерного середовища та сприяє забезпеченню високої якості та чистоти захисного покриття.

Порошкодозувальний механізм використовується для подачі мікрогранул захисного матеріалу в напрямку потоку плазмового струменя в необхідній кількості для отримання якісного покриття.

Електродвигун постійного струму моделі Д-90 застосовується в якості приводу черв'ячного редуктора та забезпечує опускання і піднімання столика для розміщення оброблювангї деталі.

Система вакуумування проводить видалення частинок пилу з камери шляхом відкачування повітря та створення розрідженості в робочій зоні.

Пульт упавління застосовується для керування функціональними елементами установки, зокрема плазмотроном, маніпулятором та іншими вузлами та забезпечує необхідні параметри процесу нанесення теплозахисних покриттів: товщину захисного покриття, температура плазми, дистанції напилення та ін.

					ВР 240.00.00.000 ПЗ	Лист
Зм	Лист	№ докум.	підпис	дата		33

2.3 Принципова схема установки плазмового нанесення захисних покриттів УПУ-3Д

Принципова схема установки нанесення захисних покриттів моделі УПУ-3Д представлена на рисунку 2.7.

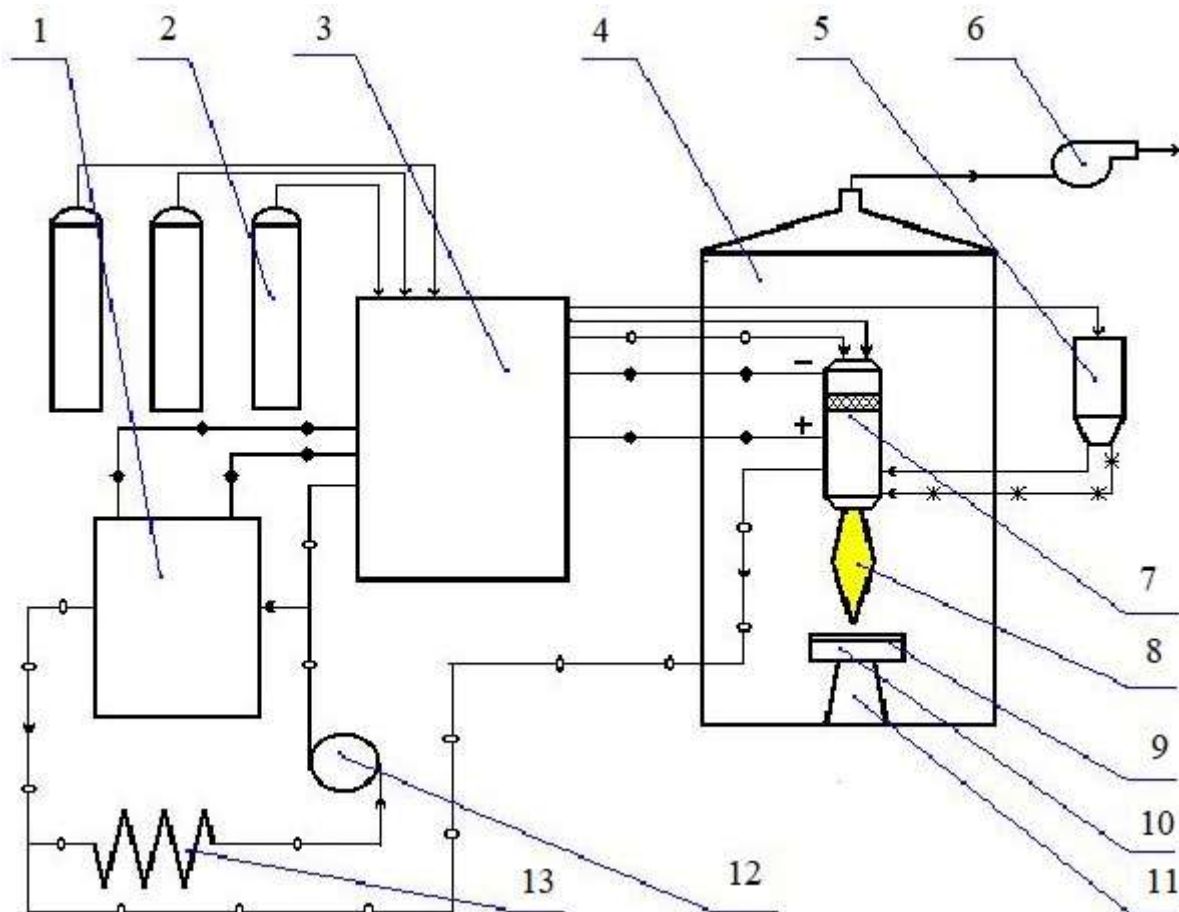


Рисунок 2.7 – Принципова схема установки УПУ-3Д [8]:

1 – джерело живлення функціональних елементів установки; 2 – балони з газом; 3 – пульт управління елементами установки; 4 – робоча камера для наплення захисного матеріалу; 5 – порошковий дозатор механічного типу; 6 – витяжний вентилятор; 7 – плазмотронний пристрій; 8 – плазмовий струмінь; 9 – напилуване захисне покриття; 10 – деталь; 11 – пристрій для переміщення виробу; 12 – водяний насос; 13 – охолоджувач

Зм	Лист	№ докум.	підпис	дата

2.4 Розрахунок потужності плазмотронного пристрою

Захисні покриття в ході їх напилення на оброблювані поверхні плазмотронним пристроєм отримуються шляхом нанесення розплавлених мікрогранул на основу. Якість таких покриттів визначається повнотою проплавлення порошку захисного матеріалу під час проходження його в плазмовому потоці та коефіцієнтом осадження матеріалу.

Величину теплової потужності плазмотрона, необхідної для розплавлення частинок матеріалу в струмені плазми, можна визначити за допомогою виразу (2.1) [9]:

$$P = 2,99 \frac{V^{1.5} \cdot d \cdot D^{0.5}}{\eta \cdot R_0^{1.25} [l_k + 6(R_0 - R)]^{0.6}}, \quad (2.1)$$

де V – витрата плазмоутворюючого газу, $\text{м}^3/\text{с}$;

d – діаметр частинок порошку, м ;

D – параметр важкості плавлення матеріалу захисного покриття, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{м}^3)$;

T_0 – початкова температура частинок порошку захисного матеріалу, К ;

η – ККД плазмотронного пристрою;

R_0 – значення радіусу сопла насадки плазмотронна, м ;

l_k – відстань від точки подачі порошку до плазмотрона до зрізу сопла його насадки, м ;

R – поточний радіус траєкторії частинок порошкового матеріалу, $R=0,9R_0$;

$l_k + 6(R_0 - R)$ – шлях руху частинки захисного матеріалу в ізотермічній ділянці плазмового струменя.

Величину параметра важкості плавлення матеріалу захисного покриття можна визначити за допомогою виразу (2.2) [9]:

$$D = C_e^2 \cdot T_{пл}^2 \cdot \rho_r, \quad (2.2)$$

де C_e – теплоємність частинок мікрогранули, $\text{кДж}/\text{кг} \cdot \text{град.}$;

T_{nl} – температура проплавлення частинок порошку, К;

ρ_r – густина частинки порошку залежно від його матеріалу, кг/м³;

Теплоємність частинок захисного матеріалу можна визначити за допомогою виразу (2.3) [9]:

$$C_e = \frac{i_r}{T_{nl} - T_0} = \int_{T_0}^{T_{nl}} C_r dT - \frac{i_r}{T_{nl}} - T_0, \quad (2.3)$$

де T_{nl} – температура проплавлення частинок порошку, К;

i_r – значення теплоти плавлення частинок порошку захисного матеріалу, кДж/кг;

C_r – істинне значення теплоємності частинки порошку захисного матеріалу, кДж/кг·град;

T_0 – початкова температура частинок порошку захисного матеріалу, К;

Чим вище значення параметра важкості плавлення порошкового матеріалу, тим більше значення теплової потужності має забезпечити плазмотрон для нагрівання частинок порошку до стану їх повного проплавлення. Зміна значення теплової потужності залежно від величини параметра важкості плавлення D матеріалу, при різних витратах плазмоутворюючого газу варіюється в межах 20-60 кВт. При невеликих витратах плазмоутворюючого газу та формуванні ламінарного потоку, ККД плазмотронного пристрою невеликий та складає 0,1-0,3 [9].

Проведемо визначення величини потужності плазмотронного пристрою при ККД 0,1 та 0,2 та витратах плазмоутворюючого газу на рівні $5 \cdot 10^{-4}$ - $6,7 \cdot 10^{-4}$ м³/с для частинок порошкової суміші Co-Cr-Al-Y-Si величиною 80 мкм та для гранул ZrO₂ величиною 60 мкм. Решту значень величин необхідних для розрахунку потужності візьмемо з паспортних даних плазмотронного пристрою ПН-7М:

– $R_0 = 5 \cdot 10^{-3}$ м;

– $l_k = 2,1 \cdot 10^{-2}$ м.

Значення теплофізичних параметрів захисних матеріалів візьмемо з довідникової літератури [10] (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Теплофізичні параметри захисних матеріалів [10]

Матеріал	$T_{пл}, K$	$C_e, кДж/(кг \cdot град)$	$\rho_r, кг/м^3$	$D \cdot 10^{-10},$ $кДж^2/(кг \cdot м^3)$
Co	1789	0,379	8900	1,420
Cr	2173	0,806	6950	2,132
Al	932	1,683	2700	0,664
Si	1683	2,046	2400	2,846
ZrO ₂	2950	0,874	6270	4,160

Відповідно до наведених формул та довідкових даних проведемо визначення мінімальної потужності плазмотронного пристрою.

1. ККД плазмотронного пристрою на рівні 0,1

При формуванні захисного покриття з порошкової суміші Co-Cr-Al-Y-Si потужність визначиться за формулою (2.1):

При витраті плазмоутворюючого газу $v_r = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ потужність плазмотрону складе:

$$P = 2,99 \frac{(5 \cdot 10^{-4})^{1,5} \cdot 8 \cdot 10^{-5} \cdot (2,132 \cdot 10^{10})^{0,5}}{0,1 \cdot (5 \cdot 10^{-3})^{1,25} [2,1 \cdot 10^{-2} + 6 \cdot (5 \cdot 10^{-3} - 4,5 \cdot 10^{-3})]^{0,6}} = 18,5 \text{ кВт.}$$

при $v_r = 6,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$:

$$P = 2,99 \frac{(6,7 \cdot 10^{-4})^{1,5} \cdot 8 \cdot 10^{-5} \cdot (2,132 \cdot 10^{10})^{0,5}}{0,1 \cdot (5 \cdot 10^{-3})^{1,25} [2,1 \cdot 10^{-2} + 6 \cdot (5 \cdot 10^{-3} - 4,5 \cdot 10^{-3})]^{0,6}} = 28,7 \text{ кВт.}$$

При формуванні захисного покриття ZrO₂ потужність плазмотронного пристрою визначимо за формулою (2.1):

при $v_r = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$:

$$P = 2,99 \frac{(5 \cdot 10^{-4})^{1,5} \cdot 6 \cdot 10^{-5} \cdot (4,160 \cdot 10^{10})^{0,5}}{0,1 \cdot (5 \cdot 10^{-3})^{1,25} \cdot [2,1 \cdot 10^{-2} + 6 \cdot (5 \cdot 10^{-3} - 4,5 \cdot 10^{-3})]^{0,6}} = 19,5 \text{ кВт.}$$

при $v_r = 6,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$:

$$P = 2,99 \frac{(6,7 \cdot 10^{-4})^{1,5} \cdot 6 \cdot 10^{-5} \cdot (4,160 \cdot 10^{10})^{0,5}}{0,1 \cdot (5 \cdot 10^{-3})^{1,25} \cdot [2,1 \cdot 10^{-2} + 6 \cdot (5 \cdot 10^{-3} - 4,5 \cdot 10^{-3})]^{0,6}} = 30 \text{ кВт.}$$

2. ККД плазмотронного пристрою 0,2

При формуванні захисного покриття з порошкової суміші Co-Cr-Al-Y-Si потужність визначиться за формулою (2.1):

при $v_r = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$:

$$P = 2,99 \frac{(5 \cdot 10^{-4})^{1,5} \cdot 8 \cdot 10^{-5} \cdot (2,132 \cdot 10^{10})^{0,5}}{0,2 \cdot (5 \cdot 10^{-3})^{1,25} \cdot [2,1 \cdot 10^{-2} + 6 \cdot (5 \cdot 10^{-3} - 4,5 \cdot 10^{-3})]^{0,6}} = 9,2 \text{ кВт.}$$

при $v_r = 6,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$:

$$P = 2,99 \frac{(6,7 \cdot 10^{-4})^{1,5} \cdot 8 \cdot 10^{-5} \cdot (2,132 \cdot 10^{10})^{0,5}}{0,2 \cdot (5 \cdot 10^{-3})^{1,25} \cdot [2,1 \cdot 10^{-2} + 6 \cdot (5 \cdot 10^{-3} - 4,5 \cdot 10^{-3})]^{0,6}} = 14,3 \text{ кВт.}$$

При формуванні захисного покриття ZrO_2 потужність плазмотронного пристрою визначимо за формулою (2.1):

при $v_r = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$:

$$P = 2,99 \frac{(5 \cdot 10^{-4})^{1,5} \cdot 6 \cdot 10^{-5} \cdot (4,160 \cdot 10^{10})^{0,5}}{0,2 \cdot (5 \cdot 10^{-3})^{1,25} \cdot [2,1 \cdot 10^{-2} + 6 \cdot (5 \cdot 10^{-3} - 4,5 \cdot 10^{-3})]^{0,6}} = 9,7 \text{ кВт.}$$

при $v_r = 6,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$:

$$P = 2,99 \frac{(6,7 \cdot 10^{-4})^{1,5} \cdot 6 \cdot 10^{-5} \cdot (4,160 \cdot 10^{10})^{0,5}}{0,2 \cdot (5 \cdot 10^{-3})^{1,25} \cdot [2,1 \cdot 10^{-2} + 6 \cdot (5 \cdot 10^{-3} - 4,5 \cdot 10^{-3})]^{0,6}} = 15 \text{ кВт.}$$

2.5 Розрахунок продуктивності вакуумного насоса вакуумметричного вузла установки

При напиленні захисних покриттів на більшості деталей, зокрема соплових лопаток газотурбінних установок достатнім є тиск середовища в вакуумній камері на рівні 5500-6000 Па. Продуктивність вакуумного насоса для створення такого тиску визначаємо за формулою (2.4) [11]:

$$Q = Q_0 \cdot \frac{P_0}{P_d} \cdot \left(1 + \frac{Q_0 + P_0 + T_z}{P_0 + T_z} \right), \quad (2.4)$$

										Лист
										38
Зм	Лист	№ докум.	підпис	дата						

де Q_0 – кількість газу, що відкачується при атмосферному тиску ($6,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$);

P_r – тиск газу в камері, при якому здійснюється процес наплення (5000-6000 Па).

P_0 – атмосферний тиск, 101300 Па;

T_r – температура газу в камері, 393 К;

T_0 – температура при нормальних умовах, 293 К.

Для отримання робочого тиску величиною 5000 Па необхідна продуктивність вакуумного насосу за формулою (2.4) матиме значення:

$$Q = 6.7 \cdot 10^{-4} \frac{101300}{5000} + 6.7 \cdot 10^{-4} \frac{101300 \cdot 393}{5000 \cdot 293} = 0,02 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Для отримання робочого тиску величиною 6000 Па необхідна продуктивність вакуумного насосу за формулою (2.4) матиме значення:

$$Q = 6.7 \cdot 10^{-4} \frac{101300}{6000} + 6.7 \cdot 10^{-4} \frac{101300 \cdot 393}{6000 \cdot 293} = 0,016 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Відповідно до проведених розрахунків обираємо вакуумний насос НВЗ-150, який має продуктивність відкачування $0,2 \text{ м}^3/\text{с}$ чого цілком достатньо для створення необхідного рівня вакууму в робочій камері установки.

РОЗДІЛ 3 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1 Технологічні особливості нанесення захисних покриттів

Технологічний процес нанесення захисних покриттів включає наступні основні операції:

- попередню підготовку поверхні оброблюваного виробу для забезпечення міцного зчеплення захисного матеріалу;
- підготовку матеріалу (сушка порошку);
- нанесення захисного покриття;
- механічну обробку покриття після напилення та контроль його якості.

Основні операції по формуванню захисних покриттів наведені на рисунку 3.1.



Рисунок 3.1 – Схема технологічного процесу отримання захисних покриттів [6]

Зм	Лист	№ докум.	підпис	дата

Сформоване захисне покриття повинно бути суцільним, однорідного кольору, без часток нерозплавленого металу, без тріщин, відшарування або здуття. Шорсткість шару захисного покриття в межах 80..100 мкм. Захисне покриття має бути міцно зчеплене з основним металом виробу та не відшаровуватись при випробуванні його методом подряпин. Пористість покриття повина складати не більше 20 %.

Варіант теплозахисного покриття для турбінних лопаток енергетичних установок та двигунів наведений на рисунку 3.2. Теплозахисне покриття має у своєму складі жаростійкий підшар 3, нанесений на лопатку 2 методом плазмового напилення.

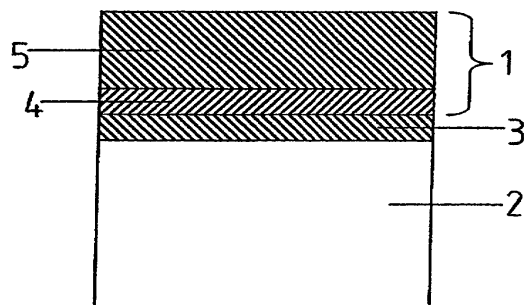


Рисунок 3.2 – Теплозахисне покриття турбінних лопаток [6]:

1 – теплозахисне покриття; 2 – лопатка; 3 – зв'язуюче покриття;
4 та 5 – перший та другий теплозахисний шар

Підшар 3 (рис. 3.2) можна отримати з корозійностійкого та стійкого до окислення відповідного алюмінієвого сплаву, наприклад $MeCrAlY$ або з нікель- або кобальт-алюмініду, за необхідності модифікованого добавкою хрому чи одним або декількома благородними металами (осмію або родій).

Теплозахисні покриття на основі кераміки як правило складаються з двох окремих шарів, при цьому мають однаковий хімічний склад. Перший шар 4 наноситься на зв'язуюче покриття 3 а другий зовнішній захисний шар 5 наноситься на поверхню першого захисного шару 4. Перший захисний шар 4, має відносно більшу щільність та володіє високою адгезією до основного покриття і має при цьому більшу механічну міцність, ніж зовнішній шар 5.

Другий зовнішній захисний шар 5 у порівнянні з першим захисним шаром 4 має пористу структуру, завдяки чому володіє значно нижчою теплопровідністю ніж перший захисний шар та забезпечує захист від негативного впливу високих температур основний метал виробу.

В процесі нанесення захисних покриттів для забезпечення оптимальних параметрів захисного покриття необхідно використовувати оптимальні параметри технологічного процесу, до числа яких відносяться сила струму та напруга, витрата газу, температура потоку, швидкість і розмір руху частинок порошку, дистанція напилення а також температура основи або підкладки оброблюваного виробу. Наведені параметри в значній мірі формують мікроструктура захисного покриття, його вердість, міцність, залишкові напруження в ньому та визначають надійність і довговічність оброблюваних деталей.

3.2 Контроль якості захисних покриттів

Повний контроль якості отриманих захисних покриттів методом плазмового або іншого методу їх формування полягає у проведенні наступних операцій:

- візуальний огляд поверхні отриманого захисного покриття;
- контроль захисного покриття на мікротвердість;
- контроль рівня товщини захисного покриття;
- контроль адгезійних властивостей захисного покриття;
- контроль захисного покриття на крихкість;
- контроль пористості захисного покриття;

Захисні покриття робочих деталей (лопаток) енергетичних установок, газових та парових турбін, авіаційних двигунів піддаються контролю їх стійкості до теплових змін.

Всі деталі після нанесення захисного покриття, піддаються візуальному огляду за допомогою мікроскопа.

Мікротвердість напилених захисних покриттів деталей виробів перевіряється на мікротвердомірі моделі ПМТ-3 (рис. 3.3) з прикладанням до 0,5 кгс.



Рисунок 3.3 – Мікротвердомір ПМТ-3 [13]

Результати вимірювань мікротвердості наведені в таблиці 3.1

Таблиця 3.1 – Результати мікротвердості захисних покриттів

Вид покриття	Фаза	Твердість(H50), МПа
плазмове двошарове покриття: підшар: Co-Cr-Al-Y-Si робочий шар: Co-Cr-Al-Y-Si+15%ZrO ₂ ,	сіра	4630
	темно-сіра	4630
	світла	6310
	сіра	4630
плазмове тришарове покриття: підшар: Co-Cr-Al-Y-Si проміжний шар: Co-Cr-Al-Y-Si+15%ZrO ₂ , робочий шар ZrO ₂	сіра	5210
	світла	5350
	сіра	6040
	світла	14200

За отриманими результатами найбільшою мікротвердістю володіє плазмове тришарове покриття $\text{Co-Cr-Al-Y-Si}+15\%\text{ZrO}_2$, яке забезпечує найкращу зносостійкість.

Для вимірювання товщини сформованих захисних жаростійких і теплозахисних покриттів лопаток турбін застосовують як правило методи неруйнівного контролю, які дають змогу визначити товщину покриття без пошкодження виробу з можливістю його подальшого використання за призначення. Такі методи дають можливість визначити товщину мікронного захисного покриття від 20 до 300 мкм.

Адгезія захисного покриття з основним матеріалом виробу перевіряється методом нанесення сітки подряпин спеціальним алмазним наконечником з інтервалом величиною 0,5 мм та глибиною до основного матеріалу виробу. Наявність сколів хоча б в одному з кутів квадратів сітки свідчить про неякісне покриття або брак (рис. 3.4).

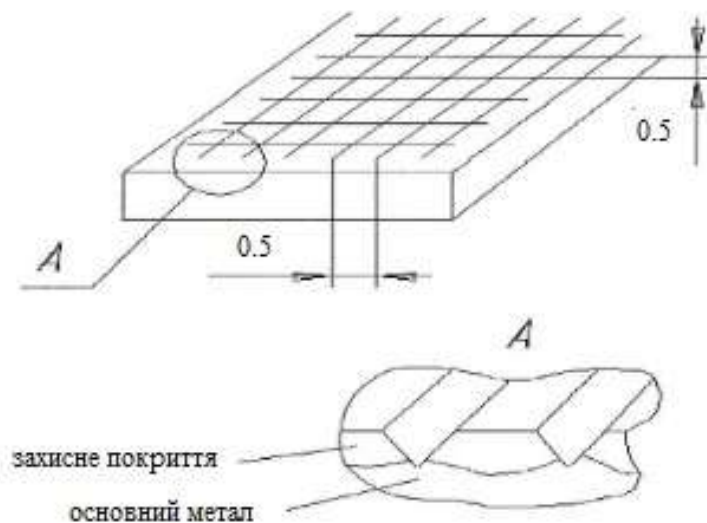


Рисунок 3.4 –Контроль адгезійних властивостей захисного покриття методом нанесення сітки подряпин на його поверхні [12]

Крихкість захисного покриття оцінюється за видом відбитка твердості за Віккерсом при навантаженні 5 кгс або при навантаженні 200 гс на мікротвердомірі ПМТ-3. Пористість іонно-плазмових покриттів перевіряється

по необхідності у деталей, що працюють в агресивних середовищах, методом накладання фільтрувального паперу.

Дослідження стійкості захисних покриттів лопаток турбін до теплозмін зумовлене високою швидкістю їх нагрівання до значних температур, які досягають 1000 °С і більше. Такі дослідження проводяться на спеціальній установці.

Покриття, які наносяться на деталі газотурбінних установок, повинні мати високу стійкість до теплозмін. На протязі хвилини при запуску турбіни соплові лопатки нагріваються від температури навколишнього середовища до температури 950-1000°С та вище. З метою оцінювання стійкості до теплозмін плазмових покриттів, необхідно провести дослідження на спеціальній установці (рис. 3.5), яка забезпечує нагрівання поверхні лопатки електричним струмом до величини 1000 °С за 30 секунд та витримку деталі при цій температурі протягом 30 секунд з наступним охолодження за 60 секунд.

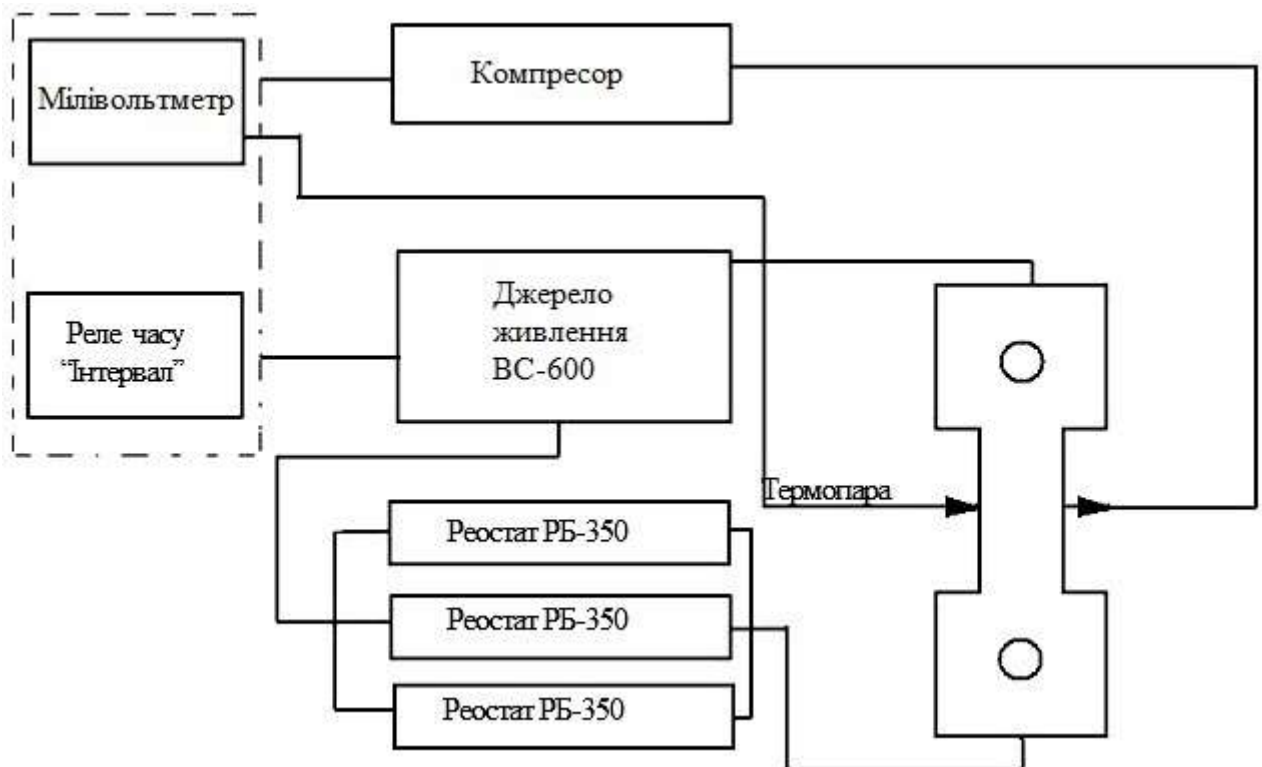


Рисунок 3.5 – Схема установки дослідження теплозмін захисних покриттів

Результати досліджень стійкості захисних покриттів турбінних лопаток до теплосмін наведені в таблиці 3.2

Таблиця 3.2 – Результати досліджень покриттів до теплосмін

Склад покриття	Товщина покриття, мкм			Кількість циклів	Примітка
	Підшар	Проміжний	Керамічний		
Co-Cr-Al-Y-Si+15%ZrO2	100	650		1300	відшарування
Co-Cr-Al-Y-Si+15%ZrO2	100	400		1450	відшарування
Co-Cr-Al-Y-Si+15%ZrO2	100	600		1350	відшарування
Co-Cr-Al-Y-Si+15%ZrO2	100	450		1380	відшарування
Co-Cr-Al-Y-Si+15%ZrO2	100	350		1430	відшарування
Co-Cr-Al-Y-Si+15%ZrO2	100	250		1500	без відшар.
Co-Cr-Al-Y-Si+15%ZrO2	100	200		1500	без відшар.
Co-Cr-Al-Y-Si+15%ZrO2	100	250		1500	без відшар.
Co-Cr-Al-Y-Si+15%ZrO2	100	150		1500	без відшар.
Co-Cr-Al-Y-Si+15%ZrO2, ZrO2		100	0,15	1500	відшарування
Co-Cr-Al-Y-Si+15%ZrO2, ZrO2	100	50	0,20	1500	без відшар.

Наведені результати дають змогу оцінити якість захисних покриттів для ефективного захисту турбінних лопаток від агресивних факторів впливу під час їх роботи та підвищити надійність газотурбінних установок та авіаційних двигунів.

ВИСНОВКИ

Проведено розгляд технічних параметрів та призначення установки УПУ-3Д для плазмового напилення захисних покриттів. Плазмова установка моделі УПУ-3Д є універсальною та дає можливість формувати зносостійкі захисні покриття з металевих та неметалевих матеріалів, зокрема керамічних методом високотемпературного плазмового напилення порошкових матеріалів в середовищі плазмоутворюючих газів (азот, аргон, гелій).

Проведено огляд існуючих аналогів та технологій нанесення захисних покриттів. Провівши огляд установок по нанесенню захисних покриттів та методів їх формування можна зробити висновок, що плазмове напилення захисних матеріалів є сучасним та високоефективним способом підвищення надійності та довговічності важконавантажених деталей.

Проведено опис фізичних перетворень, які використовуються в роботі установки. Фізичні перетворення при плазмовому нанесенні захисних покриттів являють собою цілий ланцюг термодинамічних та кінетичних перетворень речовини, до яких відноситься генерація високотемпературної плазми, розплавлення порошку із зміною агрегатного стану, перенесення високошвидкісного потоку частинок та їх подальша кристалізація при взаємодії з основою оброблюваної деталі. Опис фізичних перетворень дав можливість детально описати роботу установки та полегшити розуміння процесів її функціонування.

Розглянуто будову та принцип роботи установка плазмового нанесення захисних покриттів УПУ-3Д. Основним функціональним робочим вузлом плазмової установки по нанесенню захисних покриттів є плазмотрон, який забезпечує генерування плазмового струменя, формує високошвидкісний потік частинок напилюваного захисного матеріалу та визначає в значній мірі якість захисних покриттів.

					ВР 240.00.00.000 ПЗ	Лист
						47
Зм	Лист	№ докум.	підпис	дата		

Розроблено структурну схему установки плазмового нанесення захисних покриттів УПУ-3Д та наведено взаєморв'язок між основними її функціональними елементами.

Розроблено принципову схему установки плазмового нанесення захисних покриттів УПУ-3Д, яка полегшує розуміння принципів її роботи.

Проведено розрахунок потужності плазмотрону та встановлені значення енергії, необхідної для якісного проплавлення частинок захисного покриття.

Проведено розрахунок необхідної продуктивності вакуумного насосу для належного рівня розрідженості в робочій камері, яке забезпечується вакуумним насосом НВЗ-150.

Описано аспекти перевірки якості захисних покриттів турбінних лопаток. Повний контроль якості отриманих захисних покриттів методом плазмового методу їх формування полягає у проведенні контролю захисного покриття на мікротвердість, рівня товщини захисного покриття, адгезійних властивостей, крихкість та пористість.

Проведені дослідження стійкості захисних покриттів та наведена схема установки для їх реалізації. За отриманими результатами найбільшою стійкістю володіє плазмове тришарове покриття $\text{Co-Cr-Al-Y-Si}+15\%\text{ZrO}_2$, яке забезпечую найкращу зносостійкість.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Устангвака для нанесення теплозахисних покриттів моделі УПУ-3Д. URL: <https://studfile.net/preview/15107511/page> (дата звернення: 10.04.2026 р.).
2. Установка нанесення захисних покриттів SEO-TECH серії МАП. URL: <https://seo-tec.com.ua/Sputtering/Sputtering.html> (дата звернення: 12.04.2026 р.).
3. Установка нанесення захисних покриттів SEO-TEC MS. URL: <https://seo-tec.com.ua/Sputtering/Sputtering.html> (дата звернення: 12.04.2026 р.).
4. Установка нанесення захисних покриттів SEO-EBPVD TEC. URL: <https://seo-tec.com.ua/Sputtering/Sputtering.html> (дата звернення: 14.04.2026 р.).
5. Бодрова Л. Г. Технологія конструкційних матеріалів та матеріалознавство: навч. посіб. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2023. 157 с.
6. Білик І. І., Руденький С. О. Технологія нанесення покриттів та їх властивості: навч. посіб. Київ: КПІ, 2023. 120 с.
7. Плазмова обробка матеріалів. URL: <https://pedia.com.ua/hroshi/plazmova-obrobka-materialiv.html> (дата звернення: 18.05.2026 р.).
8. Обладнання для проведення плазмового напилення. URL: <https://studfile.net/preview/15107511/page:7/> (дата звернення: 20.05.2026 р.).
9. Оптимізація конструкції плазмотрону для поверхневої модифікації сталевих виробів. URL: <https://www.academia.edu/71535958/> (дата звернення: 21.05.2026 р.)
10. Попович В. В., Кондир А. І., Плешаков Е. І. Матеріалознавство: навч. посіб. Львів, 2023. 480 с.
11. Продуктивність та вибір вакуумного насосу URL: <https://ua.gdaimtech.com/info/vacuum-pump-performance-and-selection-17534734198203392.html> (дата звернення: 25.05.2026 р.)
12. Гречанюк К. І., Богомол Ю. І. Теплозахисні покриття для лопаток газотурбінних двигунів. *Наука та освіта* : зб. пр. XX Міжнар. наук. конф., м. Хайдусобосло, Угорщина. Хмельницький: ХНУ, 2025. С. 109-113.

13. Прилад для вимірювання мікротвердості конструкційних матеріалів ПМТ-3. URL: <https://metrologprom.com.ua/uk/p/1597860605-mikrotverdomer-pmt-3/?srsltid=AfmBOorp5lTZopOanWHsD9VAx628LkFeUVf2cTnoMBCdNXWahHESkyfu> (дата звернення: 24.05.2026 р.).

					ВР 240.00.00.000 ПЗ	Лист
						50
Зм	Лист	№ докум.	підпис	дата		