НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Навчально-науковий інститут матеріалознавства та зварювання
імені Є.О. Патона
Кафедра зварювального виробництва

«На правах рукопису»
УДК 621.791

ДО ЗАХИСТУ ДОПУЩЕНО

Завідувач кафедри
_____ Віктор КВАСНИЦЬКИЙ
(підпис) «___»_____20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра
за освітньо-професійною програмою
«Інжиніринг зварювання, лазерних та споріднених технологій»
зі спеціальності 131 «Прикладна механіка»
на тему:
«Розробка установки для нанесення покриття з альтернативним джерелом енергії»

Виконав:
студент ІІ курсу, групи НЗ-31мп
Дячук Юрій Миколайович _____

Керівник:
Доцент, к .т. н., доц.
Попіль Юрій Станіславович _____

Консультант з охорони праці
та безпеки в надзвичайних ситуаціях:
Зав.каф., д.т.н., проф.,
Левченко Олег Григорович _____

Консультант з розроблення стартап-проєкту:
Доцент, к. е. н., _____
Глущенко Ярослава Іванівна

Рецензент:
Доцент, к .т. н., доц., _____
Блошицин М. С.

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних посилань.
Студент _____
(підпис)

Київ – 2024 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Навчально-науковий інститут матеріалознавства та зварювання
імені Є.О. Патона
Кафедра зварювального виробництва

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 131 «Прикладна механіка»

Освітньо-професійна програма – «Інжиніринг зварювання, лазерних та споріднених технологій»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри
_____ Віктор КВАСНИЦЬКИЙ

«___»_____20__ р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Дячуку Юрію Миколайовичу

1. Тема дисертації «Розробка установки для нанесення покриття з альтернативним джерелом енергії»

науковий керівник Попіль Юрій Станіславович, к.т.н., доц.,

затверджені наказом по університету від «08 » 11 2024 р. № 5021-с.

2. Термін подання студентом дисертації 15 грудня 2024 р.

3. Об'єкт дослідження - технологічний процес нанесення покриття на виріб з застосуванням плазмового способу, з використанням в якості плазмоутворювального газу воднево-кисневої суміші, як альтернативного.

4. Вихідні дані: креслення загального виду валу; матеріал виробу – Сталь 45; умови виготовлення – цехові; тип виробництва – багатосерійне; кількість виготовлення – 400 одиниць на місяць.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

1.Виконати конструктивно-технологічний аналіз виробу; охарактеризувати призначення, технічні вимоги, структуру виробу та умови експлуатації; надати характеристику властивості основного матеріалу; на базі якого вибрати матеріал для створення функціонального шару покриття; призначити спосіб напилення; розрахувати параметри режиму напилення; обґрунтувати вибір матеріалів; вибрати обладнання.

2. Розробити технологічний процес напилення з застосуванням альтернативних плазмоутворюючих газових сумішей. Розрахувати та розробити плазмотрон, для роботи на плазмоутворючих газових сумішах, які є більш вискоентальпійними та екологічно чистими. Визначитись в виборі плазмових концентрованих джерел живлення. 3. Розробити схему технологічного процесу, визначитися з технологічним устаткуванням при масовому виготовленні виробу; виконати компонування установки.

4. Розробити і спланувати виробничу дільницю з застосуванням альтернативних плазмоутворюючих газових сумішей.

5. Виконати розробку стартап-проєкту для впровадження розробленої технології нанесення покриття з альтернативним джерелом енергії.

6. Проаналізувати небезпечні фактори і розробити заходи з охорони праці на виробництві.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу:

1. Креслення валу (А1х1); 2.Плакат хіміко-фізичних властивостей матеріалу деталі, та матеріалу для напилення (А1х1); 3. Загальний вигляд плазмотрону (А1х1); 4. Деталювання вузлів плазмотрону(А1х1); 5. Загальний вигляд установки для напилення з альтернативними газовими сумішами (А1х1); 6. Плакат технологічного процесу виготовлення, ремонту деталі методом газотермічного напилення (А2х1); 7. Плакат схема виробничої ділянки (А1х1).

7. Орієнтовний перелік публікацій: не передбачено індивідуальним планом навчання.

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розроблення стартап-проєкту	Глущенко Я.І., к.е.н., доц.		
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Левченко О.Г., зав. каф.		

9. Дата видачі завдання *08.11.2024 р*

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Систематизація і обробка матеріалів	*05 листопада 2024 р.*	
2	Розробка проєктної частини	*20 листопада 2024 р.*	
3	Збір додаткових матеріалів	*26 листопада 2024 р.*	
4	Оформлення графічного матеріалу	*01 грудня 2024 р.*	
5	Літературна обробка і остаточне оформлення пояснювальної записки	*15 грудня 2024 р.*	

Студент _____ Юрій ДЯЧУК

Науковий керівник _____ Юрій ПОПІЛЬ

РЕФЕРАТ

Тема магістерської дисертації – «Розробка установки для нанесення покриття з альтернативним джерелом енергії».

Магістерська дисертація була написана на 102 сторінок, 4 креслень, 3 плакатах та містить 9 рисунків, 84 формул і 39 таблиць.

КОЛІНЧАСТИЙ ВАЛ, МАТЕРІАЛ ПОРОШОК ПГ-10Н-01, ПЛАЗМОВИЙ МЕТОД НАПИЛЕННЯ, ВОДНЕВО-КИСНЕВА СУМІШ, УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ НАПИЛЕННЯ, ОБРОБКА ВИРОБУ.

У магістерській дисертації була представлена технологія отримання функціонального покриття на колінчастий вал автомобіля, з застосуванням плазмового способу, де в якості плазмоутворюючого середовища, виступає воднево-киснева суміш, отримана безпосередньо на робочому місці з електролізно-водяного генератора.

Були розроблені схема технологічного процесу, вибрані матеріал для напилення, основне і допоміжне обладнання, виконанні розрахунки робочих параметрів та геометричних розмірів проточної частини плазмотрону. Розглянуті необхідні технологічні процеси обробки виробу.

Виконано аналіз та оцінка стартап проекту, та розглянуті питання по охороні праці за для безпеки праці.

ABSTRACT

The topic of the master's thesis is ‘Development of a coating plant with an alternative energy source’.

The master's thesis consists of 102 pages, 4 drawings, 3 posters and contains 9 figures, 84 formulas and 39 tables.

CRANKSHAFT, MATERIAL POWDER PG-10N-01, PLASMA SPRAYING METHOD, HYDROGEN-OXYGEN MIXTURE, SPRAYING EQUIPMENT, PRODUCT PROCESSING.

The master's thesis presented the technology of obtaining a functional coating for a car crankshaft using the plasma method, where the hydrogen-oxygen mixture obtained directly at the workplace from an electrolysis-water generator acts as a plasma-forming medium.

A process flow diagram was developed, sputtering material, main and auxiliary equipment were selected, and the operating parameters and geometric dimensions of the plasma torch flow part were calculated. The necessary technological processes for processing the product are considered.

The project start-up was analysed and evaluated, and occupational health and safety issues were considered.

ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ 8
ВСТУП..... 10
1.Аналіз вхідних даних 11
1.1Аналіз виробу «колінчастий вал автомобіля» 11
1.2Характеристика матеріалу виробу 12
1.3Аналіз умов роботи виробу..... 13
1.4 Визначення виду спрацьовування..... 13
1.5 Аналіз технологічності поверхні щодо нанесення покриття 14
1.6 Вимоги до властивостей функціонального покриття 15
2. Обґрунтування та вибір матеріалу для напилення..... 16
3. Вибір способу нанесення покриття..... 19
4. Розробка типового процесу підготовки поверхні деталі до нанесення покриття..... 22
5. Обґрунтування та вибір обладнання..... 27
6. Розробка технологічного процесу нанесення покриття 30
7. Методика та обладнання досліджень 36
7.1 Розрахунок плазмотрону..... 37
7.2 Розрахунок робочих параметрів та геометричних розмірів проточної частини плазмотрону..... 38
7.3 Розрахунок охолодження катоду 43
7.4 Розрахунок охолодження міжелектродної вставки..... 47
7.5 Розрахунок охолодження аноду 51
7.6 Розрахунок ресурсу роботи електродів 56
8. Визначення необхідних технологічних процесів фінішної обробки виробу (поверхні) 58
Висновок до технологічного розділу 60
9. Розроблення стартап-проекту..... 61
9.1 Опис ідеї проекту..... 62

9.2 Технологічний аудит ідеї проекту ... 64
9.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту ... 64
9.4 Розроблення ринкової стратегії проекту ... 74
9.5 розроблення маркетингової програми стартап-проекту ... 77
10. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях ... 82
10.1 Аналіз шкідливих та небезпечних виробничих факторів ... 83
10.2 Вимоги безпеки праці ... 85
10.2.1 Вимоги до технологічних процесів ... 85
10.2.2 Вимоги до виробничих приміщень ... 86
10.2.3 Вимоги до організації робочих місць ... 88
10.2.4 Вимоги до вентиляції ... 89
10.3 Інженерні рішення для забезпечення безпеки праці ... 90
10.3.1 Електробезпека ... 90
10.3.2 Вимоги до експлуатації зварювального обладнання ... 91
10.3.3 Вимоги до застосування засобів індивідуального захисту ... 92
10.4 Вимоги безпеки в надзвичайних ситуаціях ... 93
10.4.1 Пожежна безпека ... 94
10.4.2 Безпека в аварійних ситуаціях ... 94
Висновоки до розділу охорони праці ... 95
Висновки ... 96
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ ... 97
ДОДАТКИ ... 101

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

ГТНП - газотермічне нанесення покритів

КВМ - Коефіцієнт використання матеріалу

НВК - Науково-виробничий комплекс

ШНВФ - Шкідливі та небезпечні виробничі фактори

L – дистанція напилення

L_1 – відстань від зрізу сопла плазмотрона до поверхні напилювальної деталі

$d_{пл}$- діаметр плями

d_c- діаметр сопла металізатора

α – кут розкриття струменя

V_- подача порошку;

K_– коефіцієнт перекриття;

K_– коеіцієнт використання матеріалу ;

$m_{пл}$ – маса плями.

$\rho_{пл}$ – густина плями

h– висота

d - діаметр

Тп - температура робочого газу

G - витрати воднево-кисневої суміші

U – робоча напруга дуги

I – робочий струм

η – тепловий ККД плазмотрона

P – потужність плазмотрону

Рп – питома щільність навантаження

l – довжина циліндричної частини сопла

іп , ік – початкова та кінцева ентальпія суміші

υ - швидкість газу на вході в газорозрядну камеру

n – кількість отворів, приймаємо

ρ – густина робочої суміші при нормальних умовах

c – питома теплоємність води

$t_{вх}$ – температура на вході в катодний вузол

λ - теплопровідність води

$К_{ох}$ – коефіцієнт надійності охолодження

$t_{пл}$ та $t_{ох}$ – температури плавлення матеріалу електрода та води

Δt – перепад температур на вході та виході в анод

D – зовнішній діаметр трубчастого електрода

Δle – глибина виробки аноду

SWOT - strengths, weaknesses, opportunities, threats(сильні сторони, слабкі сторони, можливості, загрози).

ВСТУП

Серед пріоритетних напрямків розвитку науки і техніки визначено новий технологічний напрямок – методи керування властивостями поверхні – інженерія поверхні. Метою цього технологічного напряму є виробництво виробів з подовженим терміном експлуатації шляхом створення спеціальних властивостей на поверхні матеріалу. Керування властивостями можливо здійснювати шляхом нанесення покриття.

Метою цієї роботи є закріплення теоретичних знань і набуття практичних навичок по розробці технологічних процесів нанесення покриття. В ході роботи необхідно, для заданої деталі, підібрати раціональне покриття, яке б задовольняло поставленим задачам, обрати спосіб нанесення цього покриття, обладнання для нанесення покриття, зробити типовий технологічний процес нанесення покриття.

Одним з найважливіших напрямків на сучасному етапі розвитку нашої країни є розвиток енергозберігаючих технологій, використання нових джерел енергії та досягнення енергетичної незалежності. Особливо це стосується обробної промисловості, такої як машинобудування. Енергонезалежність у цій галузі матиме позитивний вплив на нашу економіку, оскільки дозволить вітчизняним компаніям отримати нові конкурентні переваги на внутрішньому та зовнішньому ринках.

Одним з таких прикладів є водень. Плазмові струмені, ініційовані плазмо утворюючими газами, що містять водень, мають такі теплофізичні властивості: вони підвищують температуру і ентальпію плазмового струменя; плазмовий струмінь має відновлювальні властивості; вони мають вузьку, витягнуту форму струменя. Водень також є екологічно чистим і поновлюваним джерелом теплової енергії.

1.Аналіз вхідних даних

1.1 Аналіз виробу «колінчастий вал автомобіля»

Вибір який розглядається являється колінчатим валом. Ескіз представлений на рисунку 1.1

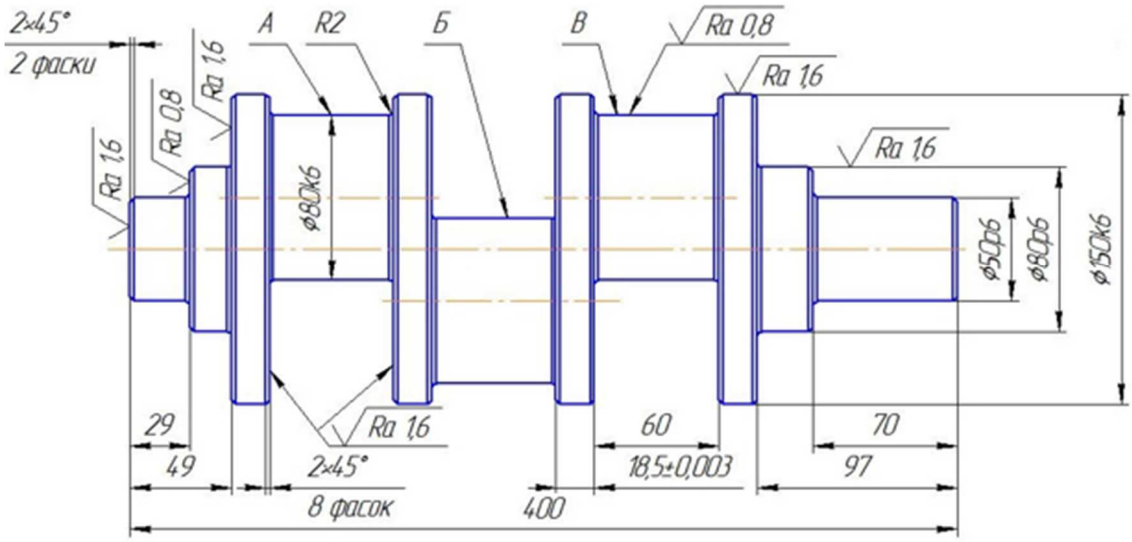


Рисунок 1.1 – Ескіз деталі

Колінчастий вал - один з найбільш відповідальних і дорогих конструктивних елементів двигуна внутрішнього згоряння. Він перетворює зворотно-поступальний рух поршнів в крутний момент. Колінчастий вал сприймає періодичні змінні навантаження від сил тиску газів, а також сил інерції рухомих і обертових мас.

Колінчастий вал двигуна, як правило, цілісний конструктивний елемент, тому правильно його називати деталлю. Вал виготовляється зі сталі з допомогою ковки або чавуну шляхом лиття. На дизельних і турбірований двигунах встановлюються більш міцні сталеві колінчаті вали.

1.2 Характеристика матеріалу виробу

З вихідних даних, наданих в таблицях Таблиця 1.1-1.4, відомо що колінчатий вал виготовлений зі Сталі 45 його довжина складає (L= 400 мм). Маса вала 17,28 кг. Масове виробництво.

Таблиця 1.1 – Загальна характеристика сталі 45[1]

Марка :	45
Заміники:	40Х, 50, 50Г2
Класифікація :	Сталь конструкційна вуглецева якісна
Застосування:	вал-шестерні, колінчаті і розподільні вали, шестерні, шпинделі, бандажі, циліндри, кулачки і інші нормалізовані, покращувані і піддаються поверхневій термообробці деталі, від яких потрібна підвищена міцність.

Таблиця 1.2 – Хімічний матеріал ДСТУ 7809:2015 [1]

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	As
0.42 - 0.5	0.17 - 0.37	0.5 - 0.8	до 0.25	до 0.04	до 0.035	до 0.25	до 0.25	до 0.08

Таблиця 1.3 – Фізичні властивості матеріалу Сталь45[1]

T	$E \cdot 10^{-5}$	$\alpha \cdot 10^{6}$	λ	ρ	C	$R \cdot 10^{9}$
Град	МПа	1Град	Вт(м· град)	кг/м^3	Дж/(кг· град)	Ом·м
20	2			7826		
100	2,01	11,9	48	7799	473	
200	1,93	12,7	47	7769	494	
300	1,9	13,4	44	7735	515	
400	1,72	14,1	41	7698	536	
500		14,6	39	7662	583	
600		14,9	36	7625	578	
700		152	31	7587	611	
800			27	7595	720	
900			26		708	

Таблиця 1.4 – Технологічні властивості матеріалу.[1]

Зварюваність:	важкозварювальних.
Флокеночутливість:	Малочутлива.
Схильність до відпускної крихкості:	не схильна.
Твердість матеріала:	НВ 10^{-1}=170МПа

1.3 Аналіз умов роботи виробу

Колінчатий вал відчуває великі навантаження і піддається скручуванню, вигину і механічному зношуванню. Крутний момент, створюваний на колінчатому валу, передається на трансмісію автомобіля, а також використовується для приводу в дію різних механізмів двигуна. Сили, що діють на колінчатий вал, складаються з сил тиску газів та інерційних сил рухомих мас. Особливо великі сили виникають в момент вимикання з чепленням. Основними дефектами валів є знос опорних шийок через пошкодження вкладишів або деформація - викривлення валу через перегрів. В результаті цього збільшуються зазори в підшипниках, в той час як умови змащення погіршуються, природний знос шийок спостерігається при великих навантаженнях на двигун автомобіля.

1.4 Визначення виду спрацьовування

Проаналізувавши, ми встановили, що деталь піддається таким видам спрацьовування [2]:

Спрацьовування від утоми є основним видом спрацьовування. Виникає внаслідок багаторазової пластичної і пружної деформації матеріалу. Цей процес має прихований (латентний) період, на протязі якого відбувається накопичення пошкоджень.

Тріщини від утоми виникають на недосконалостях структури і, внаслідок повторної дії на поверхню тертя, вони збільшуються кількісно і по глибині на

окремих ділянках поверхні. Достатньо 108 - 109 циклів для руйнування матеріалу навіть при дуже малих напругах. Первинні осередки можуть розташовуватись на деякій відстані від поверхні контакту у зоні максимальних дотичних напружень. Поверхня тертя при спрацьовуванні від утоми має вигляд глибоких борозен (ямок) з крутими стінками.

Багато деталей тертя, які працюють при достатньому змащуванні і помірних температурах, мають гладку поверхню без подряпин, відсутні помітні сліди переносу металу із сполученої поверхні. В цих умовах руйнування поверхні відбувається внаслідок диспергування (подрібнення) окремих ділянок контакту. Інтенсивність цього механізму спрацьовування невелика, а шорсткість поверхні деталі мала. У мікроскопі помітні риски у напрямку руху, як результат взаємного вдавлення на ділянках контакту сполучених поверхонь. Процес спрацьовування відбувається таким чином: на ділянках фактичного контакту матеріал зазнає багаторазову пружну і пластичну деформацію, що веде до розпушування в окремих місцях структури матеріалу з наступним відокремленням невеликих блоків.

Абразивним називається механічне спрацьовування деталей внаслідок дряпання поверхні твердими частками при наявності їх відносної швидкості.

1.5 Аналіз технологічності поверхні щодо нанесення покриття

Поверхня, на яку необхідно нанести покриття являє собою циліндр Поверхня, на яку потрібно нанести покриття – зовнішня і доступ до будь-якої точки поверхні для нанесення покриття забезпечується конфігурацією виробу. Габаритні розміри деталі – 400х150х150, маса виробу – 17.28 кг.

Невеликі габаритні розміри даної деталі дозволяють наносити більшість видів покриттів. Але обмеження конфігурації поверхні через бічні бортики обмежує ширину напилення, що необхідно при вираховуванні оптимальної дистанції напилення.

1.6 Вимоги до властивостей функціонального покриття

Матеріал покриття має забезпечувати:

– утворення зносостійкого покриття, що забезпечує захист деталі від втомного спрацьовування.

– лінійний коефіцієнт термічного розширення напиленого шару має бути близьким до лінійного коефіцієнту основного металу;

– необхідне забезпечення шорсткості Ra=1,6 для зменшення впливу тертя на деталі;

– повинна забезпечуватися достатня міцність зчеплення покриття з основою, для запобігання відшарування першого.

– покриття повинне забезпечувати певний рівень стійкості проти абразивного спрацьовування.

2.Обґрунтування та вибір матеріалу для напилення

При виборі складу покриття, поряд із експлуатаційними вимогами потрібно враховувати сумісність його з матеріалом основи та економічні показники застосування матеріалу: його собівартість, коефіцієнт використання тощо.

Під сумісністю розуміємо принципову можливість адезійної взаємодії матеріалів покриття і матеріалу виробу. Покриття повинні мати високу міцність зчеплення з основою і міцність матеріалу покриття (до 100–250 МПа). Вимоги до пористості неоднозначні - покриття на інструменті, наприклад, повинні мати мінімальну пористість, а покриття, які працюють в умовах змащування (поршневі кільця, гільзи циліндрів та ін.), можуть мати значну пористість, що сягає 10–15 %.

У групі чистих металів часто використовується молібден та хром; серед сплавів - прості системи Fe-C і складні системи Ni-Cr-B-Si-C та ін.

Отже, проаналізувавши літературу [3],використаєм вид покриття, який забезпечить захист від спрацьовування від утоми та абразивного спрацьовування.

Таблиця 2.1 – Матеріли покриття, що забезпечують його функціональне призначення [3]

№	Умови роботи (призначення покриття)	Матеріал
1	Стійкі в умовах втомного спрацьовування поверхні при циклічних навантаженнях	Самофлюсівні нікелеві сплави, термореагуючі Ti-Al або Ni-Al, сплави для аморфних покриттів, нікеліди алюмінію, рутил, електрокорунд, глинозем, оксиди алюмінію та хрому, механічні суміші самофлюсівних нікелевих сплавів із термореагуючими Ti-Al
2	Стійкі в умовах абразивного зношування абразивними частинками при (T < 540 oC)	Самофлюсівні нікелеві сплави, термореагуючі Ti-Al або Ni-Al, сплави для аморфних покриттів, механічні суміші самофлюсівних нікелевих сплавів із термореа-гуючими Ti-Al або Ni-Al, композиційні із добавками карбідів хрому та вольфраму, електрокорунд, глинозем, рутил, оксиди алюмінію та хрому

Як ми бачимо з таблиці 2.1, повністю відповідають заданим умовам експлуатації самофлюсівні нікелеві сплави, термореагуючі Ti-Al або Ni-Al, оксиди алюмінію та хрому, електрокорунд, глинозем. Порівняємо коефіцієнти термічного розширення нікелевих сплавів та основного металу. Оскільки коефіцієнт термічного розширення нікелевих сплавів:

αNi-сплави=$13 \cdot 10^{-6}К^{-1}$,

а коефіцієнт термічного розширення сталі 45:

αСталь 45=$12{,}7 \cdot 10^{-6}К^{-1}$,

то можна вважати, що модуль різниці коефіцієнтів термічного розширення матеріалу покриття і основного металу дуже близький до 0. Оскільки різниця температурних коефіцієнтів лінійного розширення незначна, то необхідність використання прошарку відпадає. Отже, обираємо в якості матеріалу для нанесення самофлюсуючі сплави на нікелевій основі, оскільки вони мають коефіцієнт термічного розширення майже такий самий, як і матеріал основи.

Обираємо матеріал для напилення - порошок. Позитивні властивості порошків [4]:

– найбільша різноманітність за складом матеріалів, що напилюються (метали, сплави, оксиди, карбіди, бориди, силіциди, нітриди, полімери, композиційні порошки);

– найбільш універсальні з огляду на застосовність для різних методів ГТНП, можливість широкої зміни розмірів частинок (5…150 мкм).

– забезпечення рівномірності, а також безперевності покриття на поверхні.

Також, необхідно визначитись с маркою порошку. Для цього необхідно проаналізувати табл.2.2 [4]

Таблиця 2.2 – Поширені типи порошків для газотермічного напилення [4]

Тип сплаву	Марка порошку	Завод виготовлення	Твердість покриття HRC	Галузь використання
Самофлюсуючі сплави на нікелевій основі, леговані бором і кремнієм типу Cr-Ni-B-Si	ПР-Н77Х15С3Р2	Тулачермет	33-45	Зміцнення деталей, що піддаються абразивному та корозійно-абразивному спрацьовуванню; при терті твердими повехнями в корозійному середовищі, при сухому терті, при терті нитками, стрічками, в умовах фретінг-корозії тощо
	ПН-70Х17С4Р4		55-60	
	ПГ-АН4	ІЕЗ	35-45	
	ПР-Н67Х18С5Р5		60-62	
	ПГ-АН5	Тулачермет	45-55	
	ПГ-АН6		54-65	
	ПГ-12Н-01	ІЕЗ	35-45	
	ПГ-12Н-02		45-54	
	ПГ-10Н-01	ТЗНТС	55-62	
	ПГ-19Н-01		28-42	

Серед цих порошків обиремо порошок ПГ-10Н-01. Його хімічний склад наведений в таблиці 2.3:

Таблиця 2.3 – Хімічний склад порошку ПГ-10Н-01 [5]

Марка порошку	Хімічний склад						
	C%	B%	Si%	Ni%	Cr%	Fe%	Твердість, HRC
ПГ-10Н-01	0.6	2.8-3.4	4-4.5	Основа	14-20	34	55-62

3.Вибір способу нанесення покриття

Доцільність використання того чи іншого способу нанесення покриттів повинно визначатися в залежності від експлуатаційних вимог до виробу, номенклатури деталей, їх складності, вимог до надійності та ресурсу, роботи виробу, які наведені в розділі1, економічної ефективності способу нанесення покриттів з урахуванням необхідного обладнання, газів і матеріалів, які розпилюються. Нанесення захисних покриттів напиленням, проводиться наступними основними способами:

1) газополуменеве напилення;

2) детонаційне напилення;

3) плазмове напилення;

4)електродугова напилення.

Отже, аналізувати доцільність використання того чи іншого способу нанесення покриття будемо, порівнюючи його параметри (табл.3.1) з необхідними нам за наступним планом:

1.міцність зчеплення матеріалу порошку з основою;

2.форма використовуваного матеріалу;

3.товщина покриття;

4.пористість покриття;

5.температура плавлення вибраного нами порошку(чи зможе матеріал бути активований даним способом напилення)

6.продуктивність напилення;

7.КВМ.

Таблиця 3.1 – Порівняльна характеристика способів напиленням [4]

Параметри	Спосіб написання				
	Електродугове	Газополуменеве	Плазмове	Детонаційне	Газодинамічне
1	2	3	4	5	6

Продовження таблиці 3.1

Продуктивність, кг/год	2…50	1…10	3…11; 11…25	0,1…1,5	3…1,5
Коефіцієнт використання матеріалу (КВМ)	0,8…0,95	0,8…0,95	0,7…0,9	0,3…0,6	0,7…0,9
Міцність зчеплення, МПа	до 48 (>15)	до 50 (>10)	до 50 (>15)	до 100 (>30)	40…80
Пористість, %	5...15	10...15	5...10	до 0,5...1,5	3…7
Межі раціональної товщини покриття, мм	0,5...2.5 max 6,0	0,5...5,0 max 10,0	0,05...5 max 10,0	0,1...0,3 max 0,5	від 0,25*
Форма напилювального матеріалу	дріт	Дріт , Порошок Гнучкий Шнур, стрижень	Порошок дріт	порошок	порошок
Максимальна температура нагрівання диспергованих часток матеріалу, К	Температура Плавлення матеріалу	До 3000	До 4000	До 3000	До 600
Швидкість напилюваних часток матеріалу, м/с	50..150	20…180	50…400	600…1500	200…1200

Проаналізувавши дану таблицю, а також довідкову літературу [6], можна прийти до наступних висновків:

1.Найвищу міцність зчеплення для кольорових металів має детонаційний та газодинамічний способи нанесення покриття (до 100 і до 80 МПа відповідно).

2.Нанести вибраний нами порошок можна усіма способами, окрім електродугового.

3.Отримати необхідну товщину покриття(0,5мм) можна за допомогою усіх способів, окрім детонаційного.

4.Найменшу пористість забезпечує детонаційний спосіб.

5.Отримати необхідну температуру плавлення (1050 ºС) можна усіма способами, окрім газодинамічного.

6.Найбільшу продуктивність мають плазмовий та газодинамічний способи (до 25 кг/год та до 15 кг/год відповідно).

7.Найменший КВМ має детонаційне напилення.

Оскільки електродуговий, детонаційний та газодинамічний способи напилення не забезпечують необхідні нам параметри, то будемо обирати серед плазмового та газополуменевого способів. Так як плазмовий спосіб має більшу продуктивність, а також враховуючи масовість виробництва, зупинимо наш вибір на плазмовому напиленні.

Особливості плазмового напилення

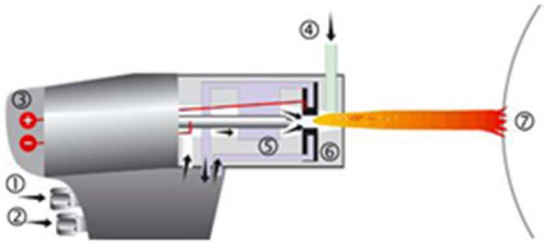


Рисунок. 3.1 – Плазмове напилення

При плазмовому напиленні порошок всередині або зовні плазмового пістолета плавиться плазмовим струменем (7) і прискорюється в напрямку покривається деталі. Плазма генерується електричної дугою, палаючій в аргоні, гелії, азоті, водні або їх суміші (4). При цьому відбувається дисоціація й іонізація газів, вони набувають високу швидкість на виході, і при рекомбінації віддають своє тепло частинкам, які напилюються.

Електрична дуга горить між центральним катодом (5) і водоохолоджуваним анодом (6). Цей спосіб використовується при нормальній атмосфері, в захисному газі (наприклад, аргоні), у вакуумі та під водою. При відповідному профілюванні сопла виникає також понадзвукова плазма.

4. Розробка типового процесу підготовки поверхні деталі до нанесення покриття

До технічного процесу підготовки виробу відносять всі операції очищення, надання конфігурації поверхні, активації напилюваної поверхні та захисту поверхонь, що не підлягають обробці. Розглянемо послідовність цього комплексу операцій підготовки для колінчастого вала.

1.Транспортна операція

Деталі транспортуються автокаром із складу до цеху, де будуть проводити вхідний контроль. Транспортування на всіх етапах відбувається за допомогою автокару в спеціальних контейнерах.

2.Контроль вхідний

Після отримання деталі необхідно перевірити її розміри для визначення подальших операцій. Якщо відхилення розмірів перевищують допустимі, деталь відбраковується. Для цього кожна партія деталей проходить вибіркові лабораторні дослідження. Відповідно, деталі, що не відповідають нормам, відбраковуються.

3.Транспортна операція

Деталі, які пройшли попередній етап контролю, направляються на наступний етап підготовки поверхні до нанесення покриття – механічну обробку.

4. Механічна обробка

Потрібно зняти верхній шар деталі для усунення дефектів поверхневого шару. Для сталі 45 твердість становить менше 60 HRC, тому ми використаємо токарну обробку для деталі. Колінчастий вал має нестандартну конфігурацію поверхні, оскільки необхідно забезпечити обробку шатунних шийок, вісь яких зміщена відносно головної осі вала. Прокручування колінчастого вала при переході з шийки на шийку і орієнтація подальшої шатунної шийки в вісь обертання здійснюється автоматично механізмом поділу. Обертання вала здійснюється патроном передньої бабки. Патрон задньої бабки обертається синхронно з

патроном передньої бабки, за допомогою кінематичного ланцюга між шпинделями цих бабок. Виходячи з цього ми підбираємо необхідний верстат у таблиці 4.1.

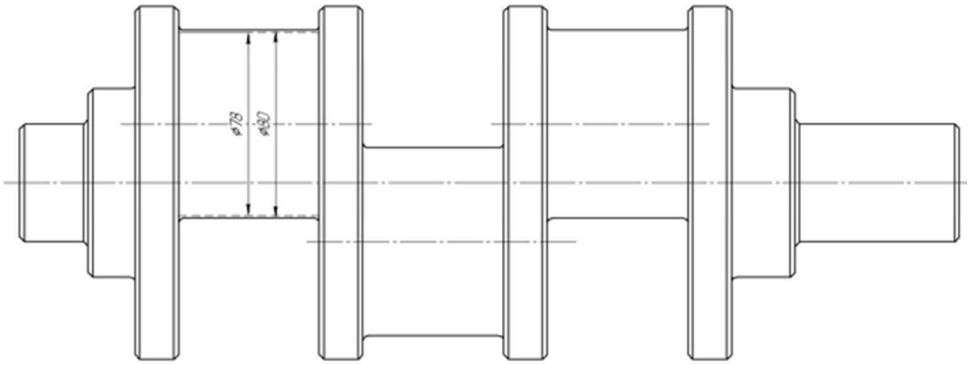


Рисунок 4.1 – Механічна обробка підготовлюваної поверхні

Таблиця 4.1 – Характеристики верстатів для обробки [8]

Характеристики	ХШ2-80Ф20	ХШ2-86Ф20
Висота центрів над столом, мм	225	
– між торцями шпинделів передньої та задньої бабок	1000	1400
Розміри шліфування, мм – найменьший діаметр	40	
– найбільша ширина	90	
– найбільший радіус кривошипа	75	
Найбільша маса виробу, кг	200	
Найбільші розміри шліфувального круга, мм	1060x90	
Швидкість різання, найбільша, м/с	50	
Габаритні розміри верстата, мм	5600x4300	
Маса верстата, кг	12200	

Обладнання та устаткування: верстат спеціалізований ХШ2-80Ф20, різець, штангенциркуль ШЦ-ІІ-250-0.05.

6. Контроль

Провести контроль якості і розмірів виробу.

Обладнання: предметний стіл, штангенциркуль ШЦ-ІІ-250-0.05.

7. Миття і обезжирення

Щоб забезпечити необхідну міцність щеплення напилюваного матеріалу з основою, необхідно очистити поверхню основи від забруднень. Щоб звільнити поверхню від забруднення, потрібно очистити вал. Для цього використовуємо машину для миття 168-036 Черкаська НПО «Комплекс». Для миття використаємо миючий засіб «Сода кальцінована» таблиця 4.2.

Таблиця 4.2 – Миючі засоби[4]

Метал деталі	Назва миючого засобу	Масова концентрація розчину, кг/м	Режим обробки	
			Температура, Cº	Тривалість, хв.
Сталь 45	Сода кальцінована	15-35	60...80	3..20

Після очищення від бруду та іржі, очистимо деталь від жирних плям органічним розчинником «Тетрахлоретилен» таблиця 4.3.

Таблиця 4.3 – Органічні розчинники [4]

Характер забруднення	Метал деталі	Розчинник	Режим обробки		
			Тем. °С	Тривалість, хв.	
				занурення	витримки в парах розчинника
Робочі та консерваційні мастила	Всі метали, окрім титану	Тетрахлоретилен (токсичний)	121	0,5...5,0	0,5...5,0

8.Сушіння

Продути стисненим повітрям для пришвидшення процесу випаровування вологи.

Обладнання та інструменти: компресорна установка, обертач.

9. Контроль миття

Необхідно перевірити деталь на дотримання якості мийки. Тобто відсутність забруднень, в тому числі і залишків миючих засобів. Забезпечується лінзами ЛЧ-3 або ЛЧ-4, при освітленні 300 лк (люкс).

10. Транспортування

Переміщення партії виробів на ділянку активації.

11.Активація поверхні

Спосіб активації поверхні і утворення шорсткості поверхні, яка готується, залежить від матеріалу та товщини стінки деталі, конструкції виробу, товщини шару покриття, конфігурації поверхні, умов експлуатації. При товщині, стінки більше ніж 0,5 мм активацію слід проводити абразивно-струменевою обробкою. В якості абразиву рекомендується використовувати шліф-зерно електрокорунду нормального марок 12А - 15А (ДСТУ 2МТ 793-80 та. ДСТУ 2МТ 715-78) зернистістю 63Н, 63П при поверхневій твердості до 40 HRC, і 80П, 80Н,100П (ДСТУ 3647-89) при твердості більше 40 HRC. Абразивно-струменеву обробку проводити за допомогою напівавтомата для абразивної обробки 487Р "ВІСП" таблиця 4.4.

Таблиця 4.4 – Параметри струменево-абразивної обробки [6]

Параметри		Матеріал основи
		Сталь, HRC > 40
Фракція абразиву, мм		0,8...1,5
Вид абразиву		електро¬корунд
Діаметр сопла, мм		8...14
Тиск стисненого повітря, МПа		не нижче 0,6
Відстань від зрізу сопла до оброблюваної поверхні, мм		40...120
Кут падіння струменю на поверхню, град	Робочий	60...90
	Мінімальний	30

12. Контроль:

Провести контроль якості активації за допомогою штангенциркуль ШЦ-ІІ-250-0.05, при освітленні 300 лк.

13. Ізоляція

Заізолювати поверхню яка не буде напилюватися. Для цього використовується пластичний компаунд на силіконовій основі виробництва «Максблок» США.

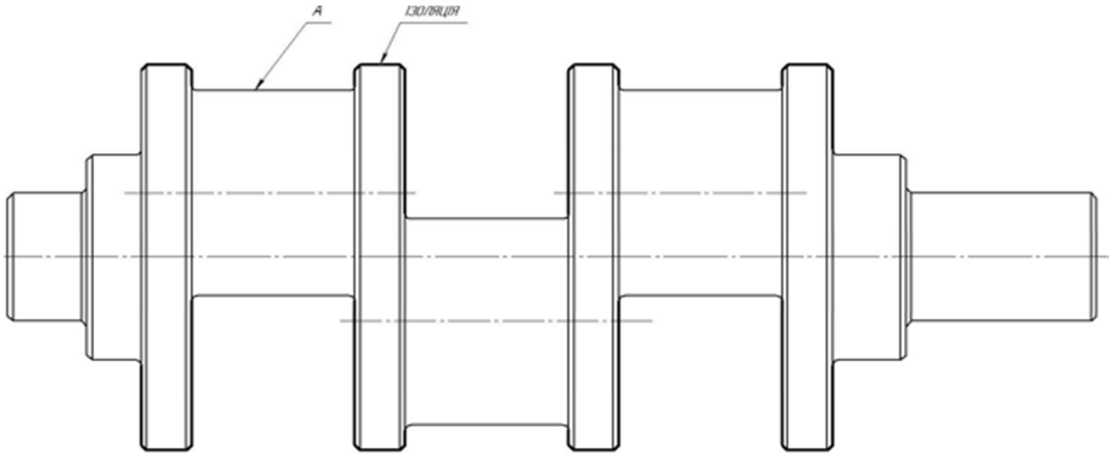


Рисунок 4.2 – Ізоляція поверхні

14. Вихідний контроль

Перевірити деталь на правильність виконання усіх процесів з очищення, механічної обробки та ізолювання для можливості подальшого її напилення за допомогою лінзи ЛЧ 14-3 та освітлення 300лк. Контроль проводиться візуально.

5. Обґрунтування та вибір обладнання

У склад таких установок входить:

1. плазмотрон;
2. джерело живлення електричного струму;
3. пульт керування з контрольно-вимірювальними та регулюючими приладами, пристрої для підпалювання дуги;
4. порошковий живильник або дозатор;
5. система газопостачання;
6. водяного охолодження;
7. системи блокування у разі аварійних ситуацій.

Технічні характеристики установок для плазмового напилення наведені у таблиці 5.1.[4]

Зважуючи на те, що нам необхідно обрати економічний спосіб, а оскільки найдешевшим плазмоутворюючим газом є повітря, то ми будемо обирати між установок «Київ-4» та «Київ-7», так як інші установки не використовують повітря в якості плазмоутворюючого газу. Оскільки установка «Київ-4» має малу продуктивність, порівняно з установкою «Київ-7», то остаточно обираємо установку «Київ-7».

Останнім часом для організації нанесення багатошарових покриттів різного призначення на зовнішній поверхні деталі в умовах дрібносерійного та ремонтного виробництва використовують напівавтомати камерного типу. Півавтомати складаються з камери напиленння з механізму кріплення і переміщення деталі, а також плазмової установки та распіраційної установки.

Розглянемо технічні характеристики напівавтоматів для напилення в таблиця 5.2.

Таблиця 5.1 – Технічні характеристики параметрів установок для плазмового напилення [4]

Характеристики установок		УМП-6	УМП-7	Київ-7	УН102	УМП-8	УМП-ЗД
Продуктивність кг/год	Порошок керамічний	0,5…4,5	5	10		5	
	Металічний	1…7	12	25			
	Композиційний	1…7	7		10…15		1…2
	дріт 0,8;1,0...1,2 мм						4…6
Робочий газ		азот	N,Ar Не бінарні суміші	Ст. повітря С3Н8	N,Ar	N,Ar	N,Ar Не бінарні суміші
Потужність, кВт	плазмотрона	28	30	80	70	40	400А*
	Установки		50	100	127	120	
Витрати, м3/год.	Газу плазмоутвор.	4	3		3…6,3	1,8…2,9	0,9…6
	Повітря			3,9…12			
	Води	0,21	0,21			1,44	0,6
	Природного газу			0,1…2			
Тиск, МПа	Газу плазмоутвор.	0,4	0,35				
	Повітря			0,5…0,6			
	Природного газу			0,2…0,3			
	Води	0,25…0,5	0,35				0,4
Маса установки в комплекті, кг.		1200	870	1150	1150	2100	

З наведених півавтоматів ми вибираємо напівавтомат 15В-Б . По-перше, тому що даний півавтомат комплектується плазмовою установкою яку ми вибрали, а саме «Київ-7», і по-друге - даний напівавтомат дозволяє наносити покриття на циліндричні деталі.

Установка призначена для напилення порошкових керамічних і металевих матеріалів з використанням, як плазмоутворюючого газу суміші стисненого повітря з пропан - бутаном або природним газом. Допускається застосування азоту

з метою отримання теплозахисних, жаростійких, електроізоляційних, зносостійких, антикорозійних покриттів.

Таблиця 5.2 – Технічні характеристики напівавтоматів для напилення[4]

Характеристики напівавтоматів	15В-Б	3201П	УН-115
Циліндричних довжина	63…1500	63…1600	1200
Циліндричних діаметр	20…320	25…500	600
плоских	63…1500х40…160		
Маса деталей, кг не більше		500	150
циліндричних	100		
плоских	250		
Уздовж осі шпинделя	0,002…0,1	0,0016…0,14	
Поперек осі шпинделя	0,004…0,18	0,001…0,5	
Кількість координат переміщення плазмотрона		3	
Частота обертів шпинделя, об/хв	22,5…500	20…400	6…300
Габарити напівавтомата, мм	385х5900х2500	4850х4850х2400	4600х3100х2470
Маса напівавтомата, кг не більше	4200	5700	4200

6. Розробка технологічного процесу нанесення покриття

Перед початком напилення, всі матеріали без виключення мають пройти контроль на відповідність їх документам, кресленням та технічним умовам, що їх супроводжують.

Вимоги до порошків при плазмовому напиленні:

– перед використанням порошок потрібно просушити. Даний порошок просушують протягом 2 годин при температурі 150 – 170°С, на азбестовому “покривалі”, періодично перемішуючи;

– порошок має відповідати хімічним властивостям і грануляції, які вказані в паспорті. Також він має зберігатися в допустимих умовах;

Вимоги до газів:

– плазмоутворюючий газ – аргон (вищий сорт за ДСТУ 10157), з додаванням водню (за ДСТУ 3022);

– робочі гази: азот газоподібний за ДСТУ 9293, кисень газоподібний за ДСТУ 5583, ацетилен технічний за ДСТУ 5457, пропан-бутан за ДСТУ 20448, вуглекислий газ за ДСТУ 8050 і стиснуте повітря по ДСТУ 9.010. 2.3.2.

– стиснене повітря має бути чистим від мастил, вологи, не має містити корозійно-активних реагентів, пилу і має бути хорошої якості (не нижче 7-9 класу по ДСТУ 17433). Обладнання для очищення повітря обирають вибирають в залежності від необхідного ступеня очищення.

Вимоги до матеріалів для струменево-абразивної обробки:

для струменево-абразивної обробки застосовують сухі, не забруднені маслом, іржею або іншими речовинами гострогранні абразивні матеріали з розмірами зерна 0,5...1,5 мм.

До умов плазмового напилення відносять, порошок зернистістю 25 мкм, адже із збільшенням розміру часток виникають труднощі їх нагрівання до температури плавлення. Твердість поверхні, яка підлягає напиленню не повинна перевищувати

60 HRC. Для кращого щеплення величина шорсткості обробленої поверхні повинна складати 50...90 мкм.

Підготовлені до напилення деталі повинні зберігатися в приміщенні при температурі не нижче +10°С та відносній вологості повітря не вище 75% в спеціальній тарі. Термін зберігання між підготовкою поверхні до напилення і власне напиленням не повинен перевищувати 3-х годин, а між напиленням покриттів і їх механічною обробкою – не менше 48 годин для релаксації напружень.

Процес напилення покриттів містить такі основні операції:

1. Підготовка порошків та їх сумішей.
2. Підготовка поверхонь, які підлягають напиленню.
3. Напилення покриттів.
4. Проміжний контроль якості покриттів.
5. Обробка покриттів.
6. Контроль якості та розмірів покриттів та деталей.

Підготовка порошків та поверхні деталей для плазмового напилення не відрізняється від підготовки деталей для інших способів напилення.

Найбільш вагомими параметрами при плазмовому напиленні є струм, напруга, витрати газу і грануляція порошку. Для плазмового напилення для обраної нами установки, в якості плазмоутворюючого газу застосовують суміш стисненого повітря з природнім газом.

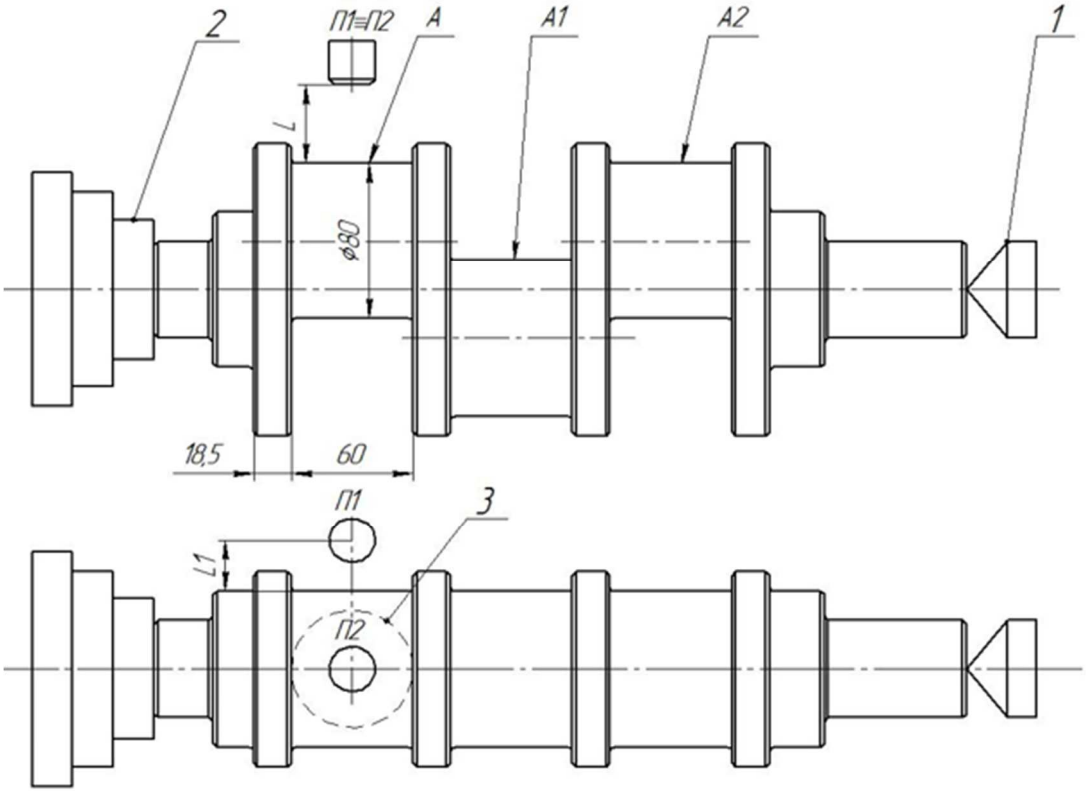
З довідника [4] встановили, що струм буде дорівнювати 300 А, напруга 245 – 250 В. Установка «Київ-7» має продуктивність до 25 кг/год, для металічного порошку. Дистанція напилення залежить від матеріалу виробу, розмірів виробу, напилювального матеріалу і т. д., в межах 50 – 300 мм таблиця 6.1.

Необхідна товщина покриття досягається шляхом переміщення плазмотрона відносно виробу, з визначеною швидкістю. Якщо товщина нанесеного шару велика, то процес повторяють декілька разів.

Таблиця 6.1 – Режими нанесення покриття[4]

Напилюваний порошок	Струм, А	Напруга, В	Витрати газів $м^3$ / год			
			Повітря	Природний газ	Пропан бутан	Дистанція напилення
ПГ-10Н-01	300	245...250	8,5...9,0	1,4...1,5	0,35...0,45	50...300

Зобразимо ескіз деталі та деяких інших елементів у процесі напилення на рисунку 6.1.



1 – передня бабка верстата; 2 – задня бабка верстата; 3- напилювальна пляма; П1,П2- позиції сопла плазмотрона; А,А1,А2 – напилювальні поверхні; L – дистанція напилення; L1 – відстань від зрізу сопла плазмотрона до поверхні напилювальної деталі.

Рисунок 6.1 – Схема технологічного процесу нанесення покриття на колінчастий вал автомобіля.

Згідно з формул, наведених у довіднику [4], розрахуємо:

1. Швидкість переміщення плазмотрону відносно виробу:

$$V_1 = \frac{V_п \times d_{пл} \times K_2}{m_{пл} \times K_1} = \frac{25 \times 59.1 \times 0.5}{16.5 \times 0.8} = \frac{738.7}{13.2} = 55.9 мм/хв \quad (6.1)$$

$d_{пл}$- діаметр плями;

$$d_{пл} = d_C + 2L_д \times tg\frac{\alpha}{2} = 17 + 2 * 150 * tg8 = 59.1 \text{ мм} \quad (6.2)$$

$d_с$- діаметр сопла плазмотрона, $d_с = 17$ мм;

α – кут розкриття струменя, (для плазмового напилення α=15…25º);

$L = 290$ мм – дистанція напилення;

$V_п = 25$ кг/год- подача порошку;

$K_2 = 0{,}5$– коефіцієнт перекриття;

$K_1 = 0{,}8$– коеіцієнт використання матеріалу ;

$m_{пл}$– маса плями.

$$m_{пл} = \frac{\rho_{пл} \times \pi \times d_{пл}^2 \times h}{4} = \frac{7060 \times 3.14 \times (55.9 \times 10^{-3})^2 \times 0.5 \times 10^{-3}}{4}$$

=8,6гр (6.3)

$\rho_{пл} = \rho_{гп}(1 - \text{пористість})$ – густина плями;

$$\rho_{пл} = 7{,}28 * (1 - 0{,}03) = 7{,}28 * 0{,}97 = 7{,}06 \text{ г/см3} = 7060 \text{ кг/м3} \quad (6.4)$$

$h = 500$ мкм $= 0.5$ мм– висота плями.

2. Розрахуємо швидкість обертання виробу:

Знайдемо довжину поверхні напилення А:

$$L = \frac{\pi}{d} = 3.14 * 78 = 244.9 \text{ мм}, \quad (6.5)$$

де d - діаметр після проточки d=78 мм.

Розрахуємо час одного оберту при швидкості переміщення пальника V1:

$$T_1 = \frac{L}{V_1} = \frac{244.9\ \text{мм}}{0.93^{\text{мм}}/_{\text{сек}}} = 263.3\ \text{сек}; \quad (6.6)$$

Швидкість обертання деталі:

$$V_2 = \frac{60}{T_1} = \frac{60}{263.3} = 0.22\ ^{\text{об}}/_{\text{хв}}; \quad (6.7)$$

1. В установці закріпити вал в передній бабці (1, Рисунок. 6.1) з ексцентриситетом е який рівний 18 мм, та піджати задньою бабкою (2, Рисунок 6.1) у відповідний центр.
2. Технологічний перехід 1:

1) Встановити сопло плазмотрона у позицію 1.

Позиція 1

– кут між віссю виробу і віссю пальника $\alpha = 90^0 \pm 5^0$;

– дистанція напилення $L = 150$ мм;

– відстань від краю деталі до краю розпилювача$L_1 = 150$ мм;

– швидкість відносного переміщення вздовж валу$V_1 = 0\ ^{\text{м}}/_{\text{сек}}$;

– швидкість обертання валу $V_2 = 0\ ^{\text{об}}/_{\text{хв.}}$

3. Допоміжний перехід 1:

– встановити швидкість обертання виробу $V_2 = 0{,}29\ ^{\text{об}}/_{\text{хв.}}$

– перемістити сопло в позицію 2 (рисунок 6.1).

4. Допоміжний перехід 2 (запуск установки):

– ввімкнути місцеву витяжну вентиляцію;

– включити подачу плазмо утворюючого газу:

$$P_{\text{повітря}} = 0.15\ \text{МПа};$$

$$G_{\text{повітря}} = 9\ ^{\text{м}^3}/_{\text{год}};$$

– запалюємо чергову дугу;

– запалюємо основну дугу,

$$I = 300\ A;$$

$$U = 250\ B;$$

– вмикаємо подачу порошку

$$P = 25\ ^{кг}/_{год}$$

5. Технологічний перехід 2:

1) Переводимо пальник у позицію 2.

Позиція 2

– кут між віссю виробу і віссю пальника $\alpha = 90^0 \pm 5^0$;

– дистанція напилення $L = 150$ мм;

– швидкість відносного переміщення вздовж валу $V_1 = 0\ ^{м}/_{сек}$;

– швидкість обертання валу $V_2 = 0.22\ ^{м}/_{сек}$;

6. Робочий хід 1:

– виконати операцію напилення при $V_1 = 55.9\ ^{м}/_{сек}$.

7. Допоміжний перехід 3:

– переходимо на частину А2, а потім на А3 і повторюємо весь процес знову.

8. Допоміжний перехід 4:

– демонтуємо напилену деталь з обертача.

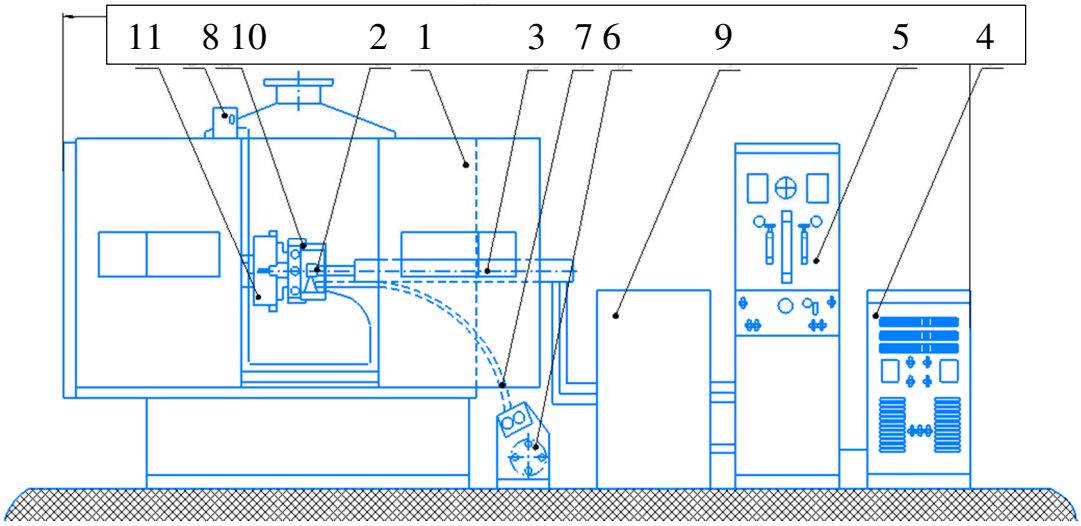
7. Установка для нанесення покриття.

Для виготовлення та ремонту, плазмовим методом, колінчатих валів , враховуючи масовість виробництва даної деталі, нам необхідно вибрати склад обладнання, який задовольняє параметри технологічного процесу.

Для здійснення процесу плазмового напилення, була вибрана камера 15-ВБ, в якій відбувається процес. В якості обладнання , була вибрана установка «Київ-7» з комплектом серійного обладнання.

Яке складається з силового джерела живлення БЕП-80 (4), дозаторів живильників порошку, газового пульта(5) та плазмотрону ПУН-1.

В якості джерела по виробленню плазмоутворюючої суміші. Був вибраний електролізно-водяний генератор А1801 (9) , з продуктивністю по виробленню суміші 1,6 м3/год рисунок 7.1.



1 – Камера 15-ВБ; 2 – плазмотрон; 3 – технологічні пристосування для підключення кабель-шлангів до плазмотрону; 4 – джерело живлення; 5 – газовий пульт; 6 – механізм переміщення; 7 – привід руху; 8 – дозатор-живильник; 9 – електролізно-водяний генератор; 10 – виріб; 11 – патрон.

Рисунок 7.1 – Установка для механічного напилення внутрішніх поверхонь.

7.1 Розрахунок плазмотрону

В даному розділі визначенню підлягають такі параметр:

– робоче значення струму;

– робоче значення напруги дуги;

– тепловий коефіцієнт корисної дії;

– діаметр та довжину розрядного каналу;

– діаметр отвору для подачі робочого газу;

– витрати води на охолодження плазмотрона;

– безперервний режим роботи плазмотрона.

Для подальших розрахунків приймемо такі вихідні дані:

робочий газ – воднево-киснева суміш;

початкова температура робочого газу – $T_п$ = 300 К;

кінцева температура робочого газу – $T_п$ = 6000 К;

витрати воднево-кисневої суміші - $G = 3 \cdot 10^{-3}$ кг/с;

тиск робочого газу на виході з плазмотрону $p = 1 \cdot 10^5$ Па;

катод – циліндричний, мідний з цирконієвою термо-вставкою.

Використаємо методику розрахунку запропоновану Жуковим М.Ф. [18]

7.2 Розрахунок робочих параметрів та геометричних розмірів проточної частини плазмотрону

Схема розрахунку плазмотрона представлена на рис. 7.2.

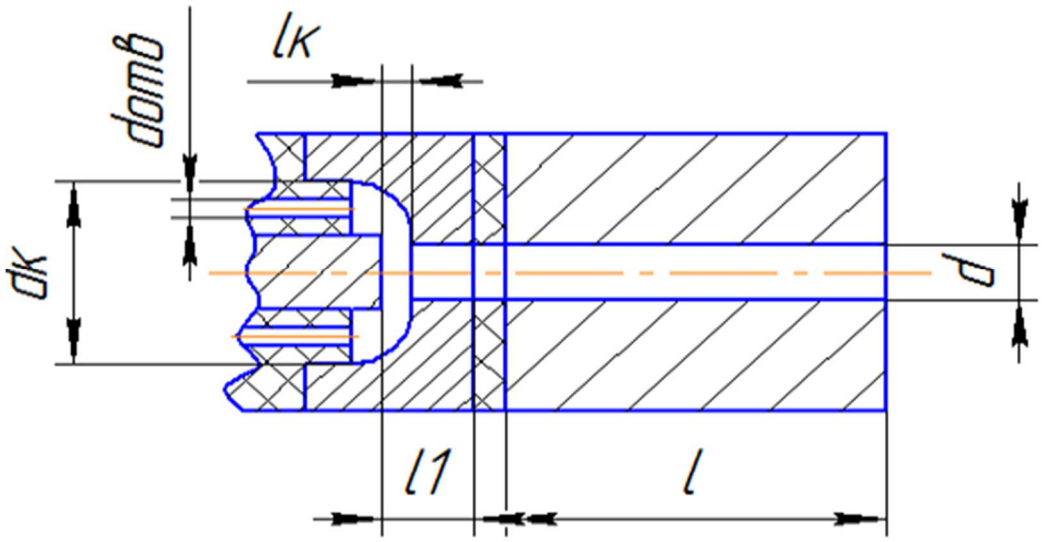


Рисунок 7.2 – Розрахункова схема плазмотрона.

Для розрахунку електричних и теплових характеристик плазмотрона будемо використовувати наступну систему рівнянь 1.1 – 1.7:

– робоча напруга на дузі:

$$U = 207 - 4.1 \cdot I + 22.8 \cdot G - 17.9 \cdot d + 14.4 \cdot L + 18.3 \cdot l \qquad (7.1)$$

– тепловий ККД плазмотрона:

$$\eta = 85 - 0.48 \cdot G + 0.79 \cdot в - 5{,}59 \cdot G \cdot d \qquad (7.2)$$

– питома щільність навантаження:

$$Pn = 4.14 + 0.92 \cdot I + 0.55 \cdot G - 2.89 \cdot d + 0.33 \cdot L + 0.43 \cdot l + \\ + 1.24 \cdot d^2 - 0.55 \cdot I \cdot d^2 + 0.31 \cdot G \quad (7.3)$$

– потужність плазмотрону:

$$P = U \cdot I \quad (7.4)$$

– рівняння ентальпії нагрітої суміші

$$i_к = i_п + \eta \cdot \frac{P}{d} \quad (7.5)$$

– енергія струменя

$$U \cdot I \cdot \eta = G(i_к - i_п) \quad (7.6)$$

де: U – робоча напруга дуги, В; I – робочий струм, А; η – тепловий ККД плазмотрона, %; G – витрати робочої суміші, кг/с; P – потужність плазмотрону, кВт; Рп – питома щільність навантаження, $\frac{кВт}{мм^2}$; d – діаметр сопла плазмотрона, мм; L – відстань від плазмотрона до виробу, мм; l – довжина циліндричної частини сопла, мм; іп , ік – початкова та кінцева ентальпія суміші відповідно, кДж/кг. Для подальших розрахунків приймемо: $G = 3 \cdot 10^3$ кг/с; L = 150 мм.

Дана система є не замкненою, тому необхідно ввести ще одну умову яка пов'язує діаметр соплового каналу з його довжиною. Для плазмотронів з між електродною вставкою вона виглядає так рівняння 7.7 [19]:

$$\frac{l}{d} = 3 \dots 4 \quad (7.7)$$

Також для рішення даної системі нам потрібно знати іп та ік робочого газу. Оскільки в якості робочого газу використовується воднево-киснева суміш H_2O_2 в якій частини водню (66,67%) та одна частина кисню (33,34%) то для подальших розрахунків обираємо іп при Тп =300 К [20]: $\mathrm{i_п(H_2)} = 8392\,\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$; $\mathrm{i_п(O_2)}$=272,2 кДж/кг. Для температури $\mathrm{T_к} = 8000$ К ентальпію $\mathrm{i_к}$ обираємо з рисунка 7.2:

$$\mathrm{i_к(H_2)} = 7 \cdot 10^5\,\frac{\text{Дж}}{\text{г}} \cdot \text{моль} = 347222\,\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}; \qquad (7.8)$$

$\mathrm{i_к(O_2)} = 8 \cdot \frac{10^5\text{Дж}}{\text{г}} \cdot \text{моль} = \frac{25001{,}5\text{кДж}}{\text{кг}}$. Але для рішення системи рівнянь нам потрібна ентальпія суміші, отже знаючи співвідношення речовин в суміші можемо знайти іп та ік за формулами 7.9 та 7.10 відповідно:

$$\mathrm{i_п}(H_2O_2) = \frac{\mathrm{i_п}(H_2) \cdot 66{,}67}{100} + \frac{\mathrm{i_п}(O_2) \cdot 33{,}34}{100} = \frac{8392 \cdot 66{,}67}{100} + \frac{272{,}2 \cdot 33{,}34}{100} =$$
$$= 5685{,}7\text{кДж/кг} \qquad (7.9)$$

$$\mathrm{i_к}(H_2O_2) = \frac{\mathrm{i_к}(H_2) \cdot 66{,}67}{100} + \frac{\mathrm{i_к}(O_2) \cdot 33{,}34}{100} = \frac{347222 \cdot 66{,}67}{100} + \frac{25001{,}5 \cdot 33{,}34}{100} =$$
$$= 239828{,}4\ \text{кДж/кг} \qquad (7.10)$$

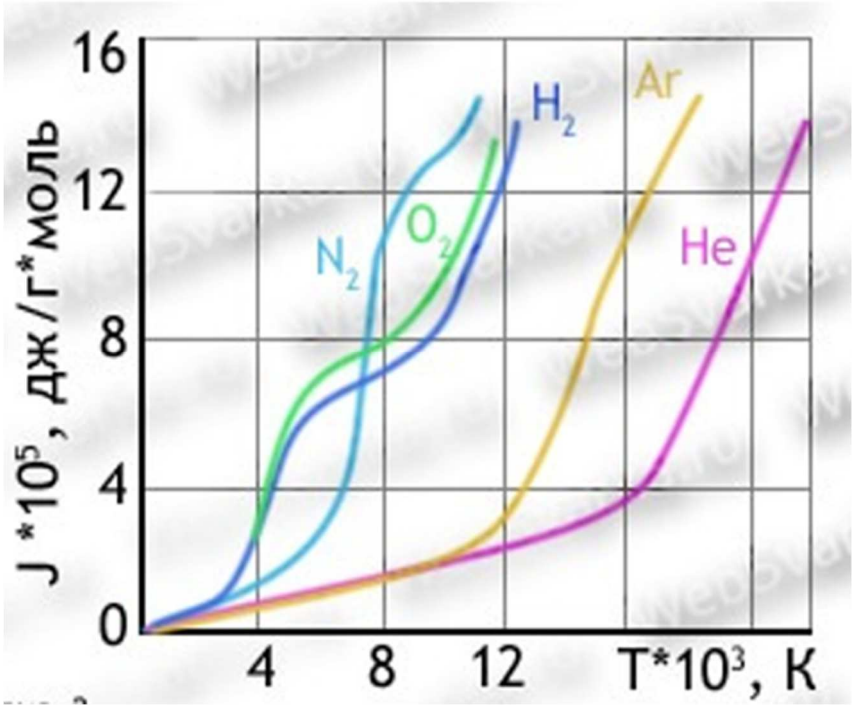


Рисунок 7.3 – Залежність середньо масової температури від ентальпії газу.

Вирішуючи дану систему рівнянь в програмі MathCAD, отримуємо:

I=1; U=1; P=1; η=1; d=1; l=1; $P_п = 1$.

$G = 0.003 \frac{кг}{с}$; L=150м; іп=5685,7 $\frac{кДж}{кг}$; ік=239828,4 $\frac{кДж}{кг}$;

$U = 207 - 4.1 \cdot 22.8 \cdot G - 17.9 \cdot d + 14.4 \cdot L + 18.3 \cdot 1$

$\eta = 85 - 0.48 \cdot G \cdot 0.79 \cdot d - 5.59 \cdot G \cdot d$

$P = I \cdot U$

$P_п = 4.14 + 0.92 \cdot I + 0.55 \cdot G - 2.89 \cdot d + 0.33 \cdot L + 0.43 \cdot l + 1.24 \cdot d^2 - 0.55 \cdot I \cdot d^2 - 0.31 \cdot G$

$U \cdot I \cdot \eta = G(ік - іп)$

ік=іп+ $\eta \cdot \frac{P}{d}$

$d = \frac{1}{4}$

$$\text{Minerr}(I,U,P,\eta,d,1,P_п)=\begin{pmatrix}51.032\\0.162\\8.264\\85\\3\cdot10^{-3}\\0.012\\51.136\end{pmatrix}$$

– сила струму на дузі I = 51 А;

– напруга на дузі U = 162 В;

– потужність дуги $P = 8.3$ кВт;

– ККД плазмотрона η = 85 %;

– діаметр сопла плазмотрона d = 3 мм;

– довжина соплової частини l = 12 мм;

– питома щільність потужності $P_п = 51\frac{кВт}{мм^2}$.

Таким чином знаючи діаметр сопла можна розрахувати діаметр (d_k) та довжина (l_k) газорозрядної камери формулами 7.11 та 7.12 відповідно:

$$d_к = (3 \dots 5)\cdot d = 5\cdot 3 = 15\ мм \qquad (7.11)$$

$$l_к = (2 \dots 3)\cdot\frac{P}{P_п} = 3\cdot\frac{8,3}{51} = 0,49 \approx 0,5\ мм \qquad (7.12)$$

Розрахуємо діаметр $(d_{отв})$ отворів, через які робоча суміш потрапляє в газорозрядну камеру за формулою 7.13:

$$d_{отв} = 2\cdot\sqrt{\frac{G}{\rho\cdot\upsilon\cdot n\cdot\pi}} \qquad (7.13)$$

де: G – витрати газу, кг/с; υ - швидкість газу на вході в газорозрядну камеру, для плазмотронів даного типу вона приймається 150 – 200 м/с; n – кількість отворів, приймаємо n=8; ρ – густина робочої суміші при нормальних умовах. Знаючи

відсоткову частку речовинH_2 та O_2 в нашій суміші можемо знайти її густину за формулою 7.14:

$$\rho = \frac{\rho(H_2)\cdot 66{,}67}{100} + \frac{\rho(O_2)\cdot 33{,}34}{100} = \frac{0{,}09\cdot 66{,}67}{100} + \frac{1{,}42\cdot 33{,}34}{100} = 0{,}53\ \text{кг/м}^3 \qquad (7{,}14)$$

де: $\rho(H_2)$ – густина водню при нормальних умовах, $\rho(H_2) = 0{,}09$ кг/м^3; $\rho(O_2)$ – густина кисню при нормальних умовах, $\rho(O_2) = 1{,}42$ кг/м3 [21].

Підставивши числові значення в формулу 7.13 отримаємо:

$$d_{\text{отв}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{3\cdot 10^{-3}}{0{,}53\cdot 200\cdot 8\cdot \pi}} = 2{,}1 \cdot 10^{-3} \approx 2\ \text{мм} \qquad (7.15)$$

7.3 Розрахунок охолодження катоду

Тепловий потік в термохімічний катод від катодної плями розраховується за розрахунком 7.16:

$$\text{Рк} = 0{,}45 \cdot \left(4{,}48 + \frac{0{,}268}{\text{a}^2}\right) \cdot \text{I} + 600 \cdot t = 0{,}45 \cdot \left(4{,}48 + \frac{0{,}268}{0{,}5^2}\right) \cdot 51 +$$
$$+600 \cdot 1 = 727{,}4\ \text{Вт} \qquad (7.16)$$

де: I – струм дуги, обираємо з попереднього підрозділу I = 51 А;

t – глибина кратера активної вставки, не рекомендується допускати глибину кратера для термохімічних катодів з цирконівою вставкою більше 1,5 діаметра вставки($d_{вст}$) [29], з цих міркувань обираємо $t = d_{вст} = 1$ мм; a – коефіцієнт витрат окислювача, оскільки використовується суміш в якій 2 частини водню та 1 частина кисню, то a = 0,5.

Величина дійсної густини теплового потоку на стінці катода , який охолоджується визначаємо за формулою 7.17:

$$q_w = \frac{P\text{к}}{2\cdot\pi\cdot r^2} = \frac{727{,}4}{2\cdot\pi\cdot 0{,}003^2} = 1{,}286\cdot 10^7 \text{Вт/м}^2 \qquad (7.17)$$

де: r – радіус обойми катода, приймаємо r = $3\cdot 10^3$ м.

Критична величину густини теплового потоку розраховуємо за формулою 7.18:

$$q_{\text{кр}} = \text{К}_{\text{ох}}\cdot q_w = 3\cdot 1{,}286\cdot 10^7 = 3{,}9\cdot 10^7 \text{Вт/м}^2 \qquad (7.18)$$

де: $\text{К}_{\text{ох}}$ – коефіцієнт надійності охолодження, приймаємо $\text{К}_{\text{ох}}$=3.

Секундну витрату води необхідну для охолодження катода визначаємо за формулою 4.17:

$$G = \frac{\text{Рк}}{c\cdot\Delta t} = \frac{727{,}4}{4{,}18\cdot 10^3\cdot 4} = 0{,}044 \text{ кг/с} \qquad (7.19)$$

де: с – питома теплоємність води, с = $4{,}18\cdot 10^3$ Дж/(кг·град); Δt – перепад температур на вході та виході в катодний вузол, рекомендовано Δt=3…4ºС.

Середня температура води розраховується за формулою 7.20:

$$t_{\text{сер}} = t_{\text{вх}} + \frac{\Delta t}{2} = 20 + \frac{4}{2} = 22°\text{C} \qquad (7.20)$$

де: $t_{\text{вх}}$ – температура на вході в катодний вузол, приймаємо $t_{\text{вх}}$ = 20ºС.

Температура насичення визначається за формулою 7.21:

$$t_{\text{н}} = 100(\text{p}\cdot 10^{-5})^{1/4} = 100\cdot(3\cdot 10^5\cdot 10^{-5})^{1/4} = 131{,}6°\text{C} \qquad (7.21)$$

де: р – тиск води, приймаємо р = $3 \cdot 10^5$ Н/м^2.

Визначаємо недогрів води до температури насичення за формулою 7.22:

$$\Delta t_{н} = t_{н} - t_{сер} = 131{,}6 - 22 = 109{,}6°C \quad (7.22)$$

Визначаємо потрібну швидкість води в зазорі за формулою 7.23:

$$V = V_{bo} \cdot [\frac{q_{кр}}{\{q_{bo}(1+B \cdot \Delta t_{н})\}}]^2 = 0{,}16 \cdot [\frac{3{,}9 \cdot 10^7}{\{1{,}1 \cdot 10^6 \cdot (1+0{,}017 \cdot 109{,}6)\}}]^2 = 24 м/с \quad (7.23)$$

де: V_{bo}, q_{bo}, B – визначаються у відповідності до тиску води з методичних вказівок [19], приймаємо V_{bo} = 0,16 м/с; q_{bo} = $1.1 \cdot 10^6$ Вт/м^2;

Для з'ясування режиму теплообміну визначемо число Рейнольдса за формулою 7.24:

$$Re = \frac{V \cdot d_з}{v} \quad (7.24)$$

де: $d_з$ – діаметр зазору який визначається за формулою 7.25; v – кінематична в'язкість для середньої температури ($t_{сер}$) приймаємо

v = $9{,}113 \cdot 10^{-8}$ м^3/кг [20].

$$d_з = \frac{G}{\pi \cdot r_{тр} \cdot \rho \cdot V} = \frac{0{,}044}{\pi \cdot 0{,}003 \cdot 998{,}7 \cdot 24} = 2 \cdot 10^{-4} м \quad (7.25)$$

де: $r_{тр}$ – радіус труби по якій підводиться вода, приймаємо $r_{тр}$= $3 \cdot 10^{-3}$м;

ρ – густна води при $t_{сер}$, ρ = 998,7 кг/м^3.

Отримані дані підставивши у формулу 7.26, отримаємо:

$$Re = \frac{24 \cdot 2 \cdot 10^{-4}}{9{,}113 \cdot 10^{-8}} = 5{,}262 \cdot 10^4 \quad (7.26)$$

Величина числа Рейнольдса визначає режим теплообміну. При $8 \cdot 10^3 < Re_р < 10^6$ йде розвинена турбулентна течія.

З формули 7.27. яка використовується для турбулентної течії знайдемо коефіцієнт тепловіддачі.

$$Nu = a_в \cdot \frac{d_з}{\lambda} = 0{,}0023 \cdot Re^{0{,}8} \cdot Pr_р{}^{0{,}4} \cdot (\frac{Pr_р}{Pr_с})^{0{,}25} \cdot \varepsilon =$$

$$= 0{,}0023 \cdot (5{,}262 \cdot 10^4)^{0{,}8} \cdot 6{,}96^{0{,}4} \cdot (\frac{6{,}96}{1{,}3})^{0{,}25} \cdot 1{,}12 = 509{,}4 \qquad (7.27)$$

де: λ - теплопровідність води, λ = 0,602 Вт/м·град; $Pr_р$ та $Pr_с$ – числа Прандтля для рідини та стінки відповідно, приймаємо [20] $Pr_р$ = 6,96;

$Pr_с$ = 1,3; ε – залежність числа Рейнольдса від характеристик труби, приймаємо ε = 1,12.

Коефіцієнт тепловіддачі визначаємо за формулою 7.28:

$$a_в = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_з} = \frac{509{,}4 \cdot 0{,}602}{2 \cdot 10^{-4}} = 1{,}533 \cdot 10^6 \qquad (7.28)$$

Величина густини теплового потоку, при якій температура стінки дорівнює температурі кипіння визначаємо формулою 7.29:

$$q_{поч.к.} = a_в \cdot (t_н - t_{сер}) = 1{,}533 \cdot 10^6 \cdot (131{,}6 - 22) =$$

$$1{,}681 \cdot 10^8 \text{ Вт/м}^2 \qquad (7.29)$$

Оскільки $q_{поч.к.} > q_w$ температуру стінки знаходимо за формулою 7.30:

$$T = t_{сер} + \left(\frac{q_w}{a_в}\right) = 22 + \left(\frac{1{,}286 \cdot 10^7}{1{,}533 \cdot 10^6}\right) = 30{,}38°\text{C} \qquad (7.30)$$

7.4 Розрахунок охолодження міжелектродної вставки

Тепловий потік дуги який вкладається у міжелектродну вставка визначається за формулою 7.31:

$$P_в = 4{,}6 \cdot 10^{-5} \cdot I^{1{,}6} \cdot p \cdot l_1 = 4{,}6 \cdot 10^{-5} \cdot 51^{1{,}6} \cdot 3 \cdot 10^5 \cdot 0{,}0135 = \quad 4{,}9 Вт \qquad (7.31)$$

де: I – сила струму, I = 51А; p – тиск води, приймаємо p = $3 \cdot 10^5$ Н/м^2;

l_1 – довжина між електродної вставки, приймаємо l_1 = 0,0135 м.

Густина теплового потоку в стінку, що охолоджується визначається за формулою 7.32:

$$q_в = \frac{4{,}6 \cdot 10^{-5} \cdot I^{1{,}6} \cdot p}{\pi \cdot d_1} = \frac{4{,}6 \cdot 10^{-5} \cdot 51^{1{,}6} \cdot 3 \cdot 10^5}{\pi \cdot 0{,}003} = 7{,}9 \cdot 10^7 \qquad (7.32)$$

де: d_1 – діаметр отвору в між електродній вставці, приймаємо

d_1 = 0,003м.

Для нормальної роботи плазмотрона потрібна така товщина стінки, щоб Δt не перевищувала різницю температури плавлення матеріалу електрода та температури води, яка охолоджує електрод. Різницю температур знаходимо за формулою 7.33:

$$\Delta t \leq t_{пл} - t_{ох} \qquad (7.33)$$

де: $t_{пл}$ та $t_{ох}$ – температури плавлення матеріалу електрода та води, що охолоджує електрод відповідно. Температуру $t_{пл}$ приймаємо за температуру плавлення міді $t_{пл}$ = 1084,1 °С. Температуру $t_{ох}$ розраховуємо за формулою 7.34:

$$t_{ох} = 100(p \cdot 10^{-5})^{1/4} = 100 \cdot (3 \cdot 10^5 \cdot 10^{-5})^{1/4} = 131{,}6°C \qquad (7.34)$$

Підставивши отримані дані у формулу 7.35, отримаємо:

$$\Delta t = 1084{,}1 - 131{,}6 = 952{,}5°\text{C} \qquad (7.35)$$

Розраховуємо товщину стінки, на якій цей температурний напір може бути реалізований знаходимо за формулою 7.36:

$$\delta = 0{,}5 \cdot d_1 \left(\exp\left(\frac{2\lambda \cdot \Delta t}{q_{\text{в}} \cdot d_1}\right) - 1\right) = 0{,}5 \cdot 0{,}003 \left(\exp\left(\frac{2 \cdot 0{,}610 \cdot 952{,}5}{7{,}9 \cdot 10^7 \cdot 0{,}003}\right) - 1\right) =$$
$$= 2{,}8 \cdot 10^{-3} \text{ м} \qquad (7.36)$$

де: λ - теплопровідність води, приймаємо λ = 0,610 Вт/м·град.

Знаходимо дійсний температурний напір для прийнятої товщини стінки за формулою 7.37:

$$\Delta t_{\text{д}} = \frac{q_{\text{в}} \cdot d_1}{2 \cdot \lambda} \cdot \ln \frac{d_1 + 2\delta}{d_1} = \frac{7{,}9 \cdot 10^7 \cdot 0{,}003}{2 \cdot 0{,}610} \cdot \ln \frac{0{,}003 + 2 \cdot 0{,}0028}{0{,}003} = 617{,}6°\text{C} \qquad (7.37)$$

Розраховуємо секундну витрату води на охолодження міжелектродної вставки за формулою 7.38:

$$G_{\text{мев}} = \frac{\text{Рк}}{c \cdot \Delta t} = \frac{100{,}5}{4{,}18 \cdot 10^3 \cdot 4} = 2{,}45 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с} \qquad (7.38)$$

де: с – питома теплоємність води, с = $4{,}18 \cdot 10^3$ Дж/(кг·град); Δt – перепад температур на вході та виході в між електродну вставку, рекомендовано Δt=3…4°С.

Середня температура води розраховується за формулою 7.39:

$$t_{\text{сер}} = t_{\text{вх}} + \frac{\Delta t}{2} = 24 + \frac{4}{2} = 26°\text{C} \quad (7.39)$$

де: $t_{\text{вх}}$ – температура на вході в катодний вузол, приймаємо $t_{\text{вх}}$ = 24ºС.

Визначаємо недогрів води до температури насичення за формулою 7.40:

$$\Delta t_{\text{н}} = t_{\text{ох}} - t_{\text{сер}} = 131{,}6 - 26 = 105{,}6°\text{C} \quad (7.40)$$

Густина теплового потоку на стінці міжелектродної вставки розраховується за формулою 7.41:

$$q_w = q_{\text{в}} \cdot \left(\frac{d_1}{D}\right) = 7{,}9 \cdot 10^7 \cdot \left(\frac{0{,}003}{0{,}021}\right) = 1{,}129 \cdot 10^7 \text{Вт/м}^2 \quad (7.41)$$

де: D – зовнішній діаметр трубчастого електрода, приймаємо

D = 0,021 м.

Критична величину густини теплового потоку розраховуємо за формулою 7.42:

$$q_{\text{кр}} = \text{К}_{\text{ох}} \cdot q_w = 3 \cdot 1{,}129 \cdot 10^7 = 4{,}5 \cdot 10^7 \text{Вт/м}^2 \quad (7.42)$$

де: $\text{К}_{\text{ох}}$ – коефіцієнт надійності охолодження, приймаємо $\text{К}_{\text{ох}}$=3.

Визначаємо потрібну швидкість води за формулою 7.43:

$$V = V_{bo} \cdot \left[\frac{q_{\text{кр}}}{\{q_{bo}(1+B\cdot\Delta t_{\text{н}})\}}\right]^2 = 0{,}16 \cdot \left[\frac{4{,}5\cdot 10^7}{\{1{,}1\cdot 10^6\cdot(1+0{,}017\cdot 105{,}6)\}}\right]^2 = 34\text{м/с} \quad (7.43)$$

де: V_{bo}, q_{bo}, B – визначаються у відповідності до тиску води з методичних вказівок [19], приймаємо V_{bo} = 0,16 м/с; q_{bo} = $1.1\cdot 10^6$ Вт/м^2; B = 0,017 ºС$^{-1}$.

Для з'ясування режиму теплообміну визначємо число Рейнольдса за формулою7.44:

$$Re = \frac{V \cdot d_з}{v} \quad (7.44)$$

де: $d_з$ – діаметр зазору який визначається за формулою 7.25;

v – кінематична в'язкість для середньої температури ($t_{сер}$) приймаємо v = 9,113·10^{-8} м^3/кг [20].

Величина зазору визначається за формулою 7.45:

$$\delta_з = \frac{G_{мев}}{2 \cdot \pi \cdot r_{тр} \cdot \rho \cdot V} = \frac{6 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi \cdot 0{,}003 \cdot 998{,}7 \cdot 34} = 3{,}7 \cdot 10^{-6} м \quad (7.45)$$

де: $r_{тр}$ – радіус труби по якій підводиться вода, приймаємо $r_{тр}$= 3·10^{-3}м;

ρ – густна води при $t_{сер}$, ρ = 998,7 кг/м^3.

Для подальших розрахунків приймаємо $\delta_з$=0,001 м.

Діаметр зазор розраховується за формулою 7.46:

$$d_з = 2 \cdot \delta_з = 0{,}002 \quad (7.46)$$

Отримані дані підставивши у формулу 7.47, отримаємо:

$$Re = \frac{34 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{9{,}113 \cdot 10^{-8}} = 7{,}5 \cdot 10^5 \quad (7.47)$$

Величина числа Рейнольдса визначає режим теплообміну. При 8·10³ <Rep < 10^6 йде розвинена турбулентна течія.

З формули 7.48, яка використовується для турбулентної течії знайдемо коефіцієнт тепловіддачі.

$$Nu = a_в \cdot \frac{d_з}{\lambda} = 0{,}0023 \cdot Re^{0{,}8} \cdot Pr_р^{\ 0{,}4} \cdot (\frac{Pr_р}{Pr_с})^{0{,}25} \cdot \varepsilon =$$

$$= 0{,}0023 \cdot (7{,}5 \cdot 10^5)^{0{,}8} \cdot 6{,}2^{0{,}4} \cdot (\frac{6{,}2}{1{,}3})^{0{,}25} \cdot 1{,}08 = 3{,}8 \cdot 10^3 \quad (7.48)$$

де: $Pr_р$ та $Pr_с$ – числа Прандтля для рідини та стінки відповідно, приймаємо [20] $Pr_р$ = 6,2; $Pr_с$ = 1,3; ε – залежність числа Рейнольдса від характеристик труби, приймаємо ε = 1,08.

Коефіцієнт тепловіддачі визначаємо за формулою 7.49:

$$a_в = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_з} = \frac{3{,}8 \cdot 10^3 \cdot 0{,}610}{2 \cdot 10^{-3}} = 1{,}159 \cdot 10^6 \quad (7.49)$$

Величина густини теплового потоку, при якій температура стінки дорівнює температурі кипіння визначаємо формулою 7.50:

$$q_{п.к.} = a_в \cdot (t_н - t_{сер}) = 1{,}159 \cdot 10^6 \cdot (131{,}6 - 26) = 1{,}2 \cdot 10^8 \text{ Вт/м}^2 \quad (7.50)$$

Оскільки $q_{поч.к.} > q_w$ температуру стінки знаходимо за формулою 7.51:

$$T = t_{сер} + \left(\frac{q_w}{a_в}\right) = 26 + \left(\frac{1{,}29 \cdot 10^7}{1{,}159 \cdot 10^6}\right) = 35{,}6°\text{C} \quad (7.51)$$

7.5 Розрахунок охолодження аноду

Тепловий потік, який вкладається у стінку анода визначається за формулою 7.52:

$$P_а = (1 - \eta) \cdot P - P_в = (1 - 0{,}85) \cdot 8300 - 100{,}5 = 1{,}145 \cdot 10^3 \text{Вт} \quad (7.52)$$

де: η – ККД плазмотрона розраховане в першому пункті даного підрозділу, η = 0,85; P – потужність плазмотрону розрахована в першому пункті даного підрозділу, P = 8300 Вт; $P_в$ – тепловий потік який вкладається в між електродну вставку, $P_в$ = 100,5 Вт.

Густина теплового потоку у стінку анода визначається за формулою 7.53:

$$q_{\text{а}} = \frac{P_{\text{а}}}{\pi \cdot l \cdot d} = \frac{1{,}145 \cdot 10^3}{\pi \cdot 0{,}012 \cdot 0{,}003} = 1{,}012 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^2 \qquad (7.53)$$

Для подальшого спрощення розрахунку приймаємо, що теплові витрати рівномірно розподілені по всьому електроду.

Температура насичення визначається за формулою 7.54:

$$t_{\text{н}} = 100(\text{p} \cdot 10^{-5})^{1/4} = 100 \cdot (3 \cdot 10^5 \cdot 10^{-5})^{1/4} = 131{,}6°\text{C} \qquad (7.54)$$

де: p – тиск води, приймаємо p = $3 \cdot 10^5$ Н/м^2.

Визначимо максимально допустимий температурний перепад на стінці електрода за формулою 7.55:

$$\Delta t \leq t_{\text{пл}} - t_{\text{ох}} = 1084{,}1 - 131{,}6 = 952{,}5°\text{C} \qquad (7.55)$$

де: $t_{\text{пл}}$ та $t_{\text{ох}}$ – температури плавлення матеріалу електрода та води, що охолоджує електрод відповідно. Температуру $t_{\text{пл}}$ приймаємо за температуру плавлення міді $t_{\text{пл}}$ = 1084,1 °С. Температуру $t_{\text{ох}} = t_{\text{н}}$.

Розраховуємо товщину стінки, на якій цей температурний напір може бути реалізований знаходимо за формулою 7.56:

$$\delta = 0{,}5 \cdot d\left(\exp\left(\frac{2\lambda \cdot \Delta t}{q_{\text{а}} \cdot d}\right) - 1\right) = 0{,}5 \cdot 0{,}003\left(\exp\left(\frac{2 \cdot 0{,}617 \cdot 952{,}5}{1{,}012 \cdot 10^7 \cdot 0{,}003}\right) - 1\right) =$$
$$= 5{,}7 \cdot 10^{-4} \text{ м} \qquad (7.56)$$

де: λ - теплопровідність води, приймаємо λ = 0,617 Вт/м·град.

Для подальших розрахунків приймаємо δ = 0,0025м

Знаходимо дійсний температурний напір для прийнятої товщини стінки за формулою 7.57:

$$\Delta t_{\text{д}} = \frac{q_{\text{а}} \cdot d}{2 \cdot \lambda} \cdot \ln \frac{d+2\delta}{d} = \frac{1{,}012 \cdot 10^7 \cdot 0{,}003}{2 \cdot 0{,}617} \cdot \ln \frac{0{,}003+2 \cdot 0{,}0025}{0{,}003} = 2{,}4 \cdot 10^4 °\text{C} \qquad (7.57)$$

Розраховуємо секундну витрату води на охолодження аноду за формулою 7.58:

$$G_{\text{а}} = \frac{\text{Pa}}{c \cdot \Delta t} = \frac{1{,}145 \cdot 10^3}{4{,}18 \cdot 10^3 \cdot 4} = 0{,}068 \text{ кг/с} \qquad (7.58)$$

де: с – питома теплоємність води, с = 4,18· 10^3 Дж/(кг·град);

Δt – перепад температур на вході та виході в анод, рекомендовано Δt=3…4ºС.

Середня температура води розраховується за формулою 7.59:

$$t_{\text{сер}} = t_{\text{вх}} + \frac{\Delta t}{2} = 28 + \frac{4}{2} = 30°\text{C} \qquad (7.59)$$

де: $t_{\text{вх}}$ – температура на вході в анод, приймаємо $t_{\text{вх}}$ = 28ºС.

Визначаємо недогрів води до температури насичення за формулою 7.60:

$$\Delta t_{\text{н}} = t_{\text{ох}} - t_{\text{сер}} = 131{,}6 - 30 = 101{,}6°\text{C} \qquad (7.60)$$

Густина теплового потоку на стінці між електродної вставки розраховується за формулою 7.61:

$$q_w = q_{\text{а}} \cdot \left(\frac{d}{D}\right) = 1{,}012 \cdot 10^7 \cdot \left(\frac{0{,}003}{0{,}007}\right) = 4{,}3 \cdot 10^6 \text{Вт/м}^2 \qquad (7.61)$$

де: D – зовнішній діаметр трубчастого електрода, приймаємо

D = 0,007 м.

Критична величину густини теплового потоку розраховуємо за формулою 7.62:

$$q_{\text{кр}} = \text{К}_{\text{ох}} \cdot q_w = 4 \cdot 4{,}3 \cdot 10^6 = 1{,}7 \cdot 10^7 \text{Вт/м}^2 \qquad (7.62)$$

де: $\text{К}_{\text{ох}}$ – коефіцієнт надійності охолодження, приймаємо $\text{К}_{\text{ох}}$=3.

Визначаємо потрібну швидкість води за формулою 7.63:

$$V = V_{bo} \cdot [\frac{q_{\text{кр}}}{\{q_{bo}(1+B\cdot\Delta t_{\text{н}})\}}]^2 = 0{,}16 \cdot [\frac{1{,}7\cdot10^7}{\{1{,}1\cdot10^6\cdot(1+0{,}017\cdot101{,}6)\}}]^2 = 5{,}4\text{м/с} \qquad (7.63)$$

де: V_{bo}, q_{bo}, B – визначаються у відповідності до тиску води з методичних вказівок [19], приймаємо V_{bo} = 0,16 м/с; q_{bo} = $1.1\cdot10^6$ Вт/м^2; B = 0,017 ºС$^{-1}$.

Для з'ясування режиму теплообміну визначємо число Рейнольдса за формулою 7.64:

$$Re = \frac{V\cdot d_{\text{з}}}{v} \qquad (7.64)$$

де: $d_{\text{з}}$ – діаметр зазору, м; v – кінематична в'язкість для середньої температури ($t_{\text{сер}}$) приймаємо v = $9{,}113\cdot10^{-8}$ м^3/кг [20].

Величина зазору визначається за формулою 7.65:

$$\delta_{\text{з}} = \frac{G_{\text{а}}}{2\cdot\pi\cdot r_{\text{тр}}\cdot\rho\cdot V} = \frac{0{,}068}{2\cdot\pi\cdot0{,}003\cdot997{,}7\cdot5{,}4} = 6{,}8\cdot10^{-4}\text{м} \qquad (7.65)$$

де: $r_{\text{тр}}$ – радіус труби по якій підводиться вода, приймаємо $r_{\text{тр}}$= $3\cdot10^{-3}$м;

ρ – густна води при $t_{\text{сер}}$, ρ = 997,7 кг/м^3.

Для подальших розрахунків приймаємо $\delta_{\text{з}}$=0,00275 м.

Діаметр зазор розраховується за формулою 7.66:

$$d_з = 2 \cdot \delta_з = 0{,}0055 \text{ м} \quad (7.66)$$

Отримані дані підставивши у формулу 7.67, отримаємо:

$$Re = \frac{5{,}4 \cdot 5{,}5 \cdot 10^{-3}}{9{,}113 \cdot 10^{-8}} = 3{,}3 \cdot 10^5 \quad (7.67)$$

Величина числа Рейнольдса визначає режим теплообміну. При $8 \cdot 10^3 < Re_р < 10^6$ йде розвинена турбулентна течія.

З формули 7.68, яка використовується для турбулентної течії знайдемо коефіцієнт тепловіддачі.

$$Nu = a_в \cdot \frac{d_з}{\lambda} = 0{,}0023 \cdot Re^{0{,}8} \cdot Pr_р^{\,0{,}4} \cdot \left(\frac{Pr_р}{Pr_с}\right)^{0{,}25} \cdot \varepsilon =$$

$$= 0{,}0023 \cdot (3{,}3 \cdot 10^5)^{0{,}8} \cdot 5{,}4^{0{,}4} \cdot \left(\frac{5{,}4}{1{,}3}\right)^{0{,}25} \cdot 1{,}1 = 1{,}8 \cdot 10^3 \quad (7.68)$$

де: $Pr_р$ та $Pr_с$ – числа Прандтля для рідини та стінки відповідно, приймаємо [20] $Pr_р$ = 5,4; $Pr_с$ = 1,3; ε – залежність числа Рейнольдса від характеристик труби, приймаємо ε = 1,1.

Коефіцієнт тепловіддачі визначаємо за формулою 7.69:

$$a_в = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_з} = \frac{1{,}8 \cdot 10^3 \cdot 0{,}617}{5{,}5 \cdot 10^{-3}} = 2 \cdot 10^5 \quad (7.69)$$

Величина густини теплового потоку, при якій температура стінки дорівнює температурі кипіння визначаємо за формулою 7.70:

$$q_{п.к.} = a_в \cdot \left(t_н - t_{сер}\right) = 2 \cdot 10^5 \cdot (131{,}6 - 30) = 2 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^2 \quad (7.70)$$

Оскільки $q_{поч.к.} > q_w$ температуру стінки знаходимо за формулою 7.71:

$$T = t_{\text{сер}} + \left(\frac{q_w}{a_{\text{в}}}\right) = 26 + \left(\frac{4{,}3\cdot 10^6}{2\cdot 10^7}\right) = 51{,}3°\text{C} \qquad (7.71)$$

7.6 Розрахунок ресурсу роботи електродів

Час роботи катоду із цирконівою вставкою розраховується за формулою 7.72:

$$\tau_{\text{к}} = \frac{\rho_{\text{к}}\cdot\pi\cdot d_{\text{к}}^2\cdot\Delta l}{4\cdot G_{\text{к}}\cdot I} = \frac{6505\cdot\pi\cdot 0{,}001\cdot 0{,}0015}{4\cdot 1\cdot 10^{-11}\cdot 51} = 1{,}503\cdot 10^7 c = 4175\text{год} \qquad (7.72)$$

де: $\rho_{\text{к}}$ – густина матеріалу катода, в даному випадку цирконія, приймаємо $\rho_{\text{к}}$ = 6505 кг/м^3; d_k – діаметр катодної вставки, приймаємо d_k =0,001м; Δl – глибина виробки катодної вставки, приймаємо Δl = 0,0015 м; I – струм плазмотрону розрахований в пршому пункті даного підрозділу, А; $G_{\text{к}}$ – питома ерозія катода з цирконівою вставкою, приймаємо

$G_{\text{к}}$ = 1·10^{-11}кг/Кл.

Час роботи анода розраховується за формулою 7.73:

$$\tau_{\text{а}} = \frac{m}{I\cdot G_{\text{а}}} \qquad (7.73)$$

де: m – маса матеріалу який уноситься, розраховується за формулою 7.74, кг; $G_{\text{а}}$ –питома ерозія мідного електрода, приймаємо

$G_{\text{а}}$ = 5·10^{-10} кг/Кл.

$$m = \rho_{\text{а}}\cdot V = 8{,}9\cdot 10^3\cdot 5{,}65\cdot 10^{-8} = 5{,}033\cdot 10^{-4}\ \text{кг} \qquad (7.74)$$

де: $\rho_{\text{а}}$ – густина матеріалу анода, в даному випадку міді, приймаємо

$\rho_{\text{а}}$ = 8,9·10^3 кг/м^3; V – об’єм матеріалу який еродував, розраховуємо за формулою 7.75, м^3.

$$V = 0{,}5 \cdot \pi \cdot h \cdot \Delta le \cdot \left(d + \left(\frac{2}{3}\right) h\right) = 0{,}5 \cdot \pi \cdot 0{,}0015 \cdot 0{,}006 \cdot$$

$$\cdot \left(0{,}003 + \frac{2}{3} \cdot 0{,}0015\right) = 5{,}65 \cdot 10^{-8}\ \text{м}^3 \qquad (7.75)$$

де: h приймаємо на 1 мм меншою за стінку електрода, h = 0,0015м;

Δle – глибина виробки аноду, приймаємо Δle =0,006 м; d – діаметр анодного отвору, приймаємо d = 0,003м.

Підставивши розраховані дані у формулу 7.76, отримаємо:

$$\tau_{\text{а}} = \frac{5{,}033 \cdot 10^{-4}}{51 \cdot 5 \cdot 10^{-10}} = 1{,}974 \cdot 10^4 \text{с} = 5{,}48\ \text{год} \qquad (7.76)$$

8. Визначення необхідних технологічних процесів фінішної обробки виробу (поверхні)

Після проведення напилення перевірити якість напиленого шару. Визначення міцності зчеплення, пористості, твердості, зносостійкості та інших властивостей (табл. 8. 1) залежно від призначення покриття здійснюється на 3–10 зразках - свідках. З партії вибирається 3 довільних зразки і перевіряються на все вище сказане. Якщо 1 зразок не пройде перевірку, то партія відбраковується.

Для визначення дефектів за зовнішнім виглядом (з метою виявлення здуттів, відшарувань, тріщин, раковин), застосовують лінзи з 10-кратним збільшенням. На відповідність товщини покриття вимірюють за допомогою штангенциркуля (ШЦ-Н-250-0,05). Пористість визначають методом гідростатичного зважування або аналізом зображення на металографічному шліфі з розрахуванням площі занятої порами. Також необхідно після напилення з обробленої деталі зняти покриття, яке закривало неробочу поверхню.

Шліфувати поверхню напилення до отримання розмірів вказаних на ескізі. Для шліфування поверхонь будемо використовувати шліфувальний верстат SCHEPPACH BTS 700 (таблиця 8.1).

Таблиця 8.1 – Технічні характеристики шліфувального станка SCHEPPACH BTS 700 [9]

Потужність	0.25 кВт
Напруга	230 В
Частота обертів барабана	2850 об/хв
Швидкість руху стрічки	840 м/хв
Шліфувальний барабан	Діаметр 215 мм
Ширина шліфувальної стрічки	25.4 мм
Вага	7.1 кг
Габаритні розміри	380x300x370 мм

Під час шліфування потрібно застосовувати охолоджувальну рідину. Вона поглинає значну частину теплоти, що утворюється при шліфуванні, відводить стружку і абразивний пил із зони шліфування і зі столу верстата.

При шліфуванні застосовуємо наступну мастильно-охолоджуючу рідину – 3%-ний водний розчин емульсола НГЛ-205, що збільшує стійкість кіл і підвищує шорсткість оброблюваної поверхні на один клас.

Деталь закріплюється у верстаті і проходить обробку у вигляді шліфування поверхонь, на які наносили покриття, до необхідного розміру.

Консервація виробу виконується шляхом обмащуванням деталі мастилами, які вибирає замовник із каталогів.

Висновок до технологічного розділу

В даній магістерській дисертації було розроблено технологічний процес нанесення покриття на колінчастий вал.

В цій роботі було проведено аналіз конструкції та основного металу виробу, умови роботи виробу, на основі яких було обрано тип функціонального покриття, а також спосіб нанесення, обладнання та матеріали. Далі було розроблено технологічний процес нанесення функціонального покриття, яке відповідає заданим експлуатаційним вимогам.

9. Розроблення стартап-проекту

В умовах сучасного розвитку технологій нанесення покриттів на поверхні матеріалів все більше значення набуває впровадження екологічно чистих, енергоефективних та економічно вигідних рішень. Традиційні методи нанесення покриттів часто вимагають значних енергетичних ресурсів та використання дорогого обладнання, що створює додаткові екологічні та економічні виклики. У зв'язку з цим, пошук альтернативних джерел енергії для таких процесів є одним з пріоритетних напрямків інженерних досліджень.

Розробка установки для нанесення покриттів з використанням альтернативного джерела енергії спрямована на вирішення цих проблем, забезпечуючи одночасно зниження витрат, покращення екологічності процесу та збереження високої якості нанесених покриттів. Такі установки можуть використовувати енергію від відновлюваних джерел, таких як сонячна чи вітрова енергія, або ж інноваційні підходи, наприклад, зберігання енергії у вигляді водневого палива.

Розробка такої установки передбачає міждисциплінарний підхід, який включає оптимізацію технологічних процесів, дослідження нових матеріалів для покриттів, вибір джерел енергії та створення конкурентоздатного продукту, що відповідає потребам ринку.

9.1 Опис ідеї проекту

Таблиця 9.1- Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Розробка установки для нанесення покриттів з використанням альтернативного джерела енергії (наприклад, сонячна енергія, водневе паливо або термоелектричні генератори).	– Інженерія поверхні для промислових матеріалів. – Авіаційна та автомобіль-на промисловість. – Енергетичний сектор (захист від корозії). – Медичне обладнання (біосумісні покриття). – Виробництво електроніки (антикорозійні та теплоізоляційні покриття).	– Зниження енерго-споживання та витрат. – Екологічність процесу (зменшення викидів). – Стабільна якість покриттів завдяки новітнім технологіям. – Універсальність обладнання для різних сфер застосування. – Можливість використання в умовах обмеженого доступу до традиційних джерел енергії.

Розглянемо аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї (чим відрізняється від існуючих аналогів та замінників) порівняно із пропозиціями конкурентів передбачає:

Визначення переліку техніко-економічних властивостей та характеристик ідеї (орієнтований можливий перелік властивостей та характеристик);

Визначення попереднього кола конкурентів (проектів-конкурентів) або товарів-замінників чи творів-аналогів, що вже існують на ринку, та проводиться збір інформації щодо зазначень техніко-економічних показників для ідеї власного проекту та проектів-конкурентів відповідно до визначеного вище переліку;

Проводиться порівняльний аналіз показників: для власної ідеї визначаються показники, що мають а) гірші значення (W, слабкі); б) аналогічні (N, нейтральні) значення; в) кращі значення (S, сильні) (табл. 9.2).

Обираємо конкурента з компанії яка виготовляє обладнання і має відповідне обладнання для їх виготовлення ТОВ " КОДАКИ" Україна, Дніпропетровська обл., місто Дніпро, ВУЛИЦЯ КАШТАНОВА, будинок 132.

Таблиця 9.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів		W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторонна)
		Мій проект	Конкурент (ТОВ " КОДАКИ")			
1	Тип джерела енергії	Альтернативне	Традиційне			S
2	Енергоефективність	Висока	Середня			S
3	Екологічність	Мінімальні викиди	Середній рівень викидів			S
4	Робота з матеріалами	Робота з різними матеріалами	Робота з обмеженим набором матеріалів			S
5	Надійність і довговічність установки	Висока	Висока		N	
6	Простота обслуговування	Просте обслуговування	Складне обслуговування			S
7	Початкова вартість	Помірна	Помірна		N	
8	Операційні витрати	Низькі	Високі			S

9.2 Технологічний аудит ідеї проекту

В межах цього підрозділу потрібно провести аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту (технології створення товару.

Таблиця 9.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

№	Ідея проекту	Технології і реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Розробка установки з альтернативним джерелом енергії для нанесення покриттів. Інтеграція сучасних систем управління та автоматизації	Використання плазмотронів, що працюють на водні або інших альтернативних газах. Використання контролерів і датчиків для точного регулювання параметрів процесу	Так	Висока (наявні технології локально та міжнародно).

9.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Визначення ринкових можливостей, які можні використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз, які можуть перешкодити реалізації проекту, планування напрямків розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів клієнтів.

Спочатку аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку.

Таблиця 9.4 - Попередня характеристика потенційного ринку

№	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	2
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	200–300 млн грн на рік
3	Динаміка ринку	Зростання на 5–7% щорічно завдяки збільшенню потреб у високоякісних покриттях.
4	Наявність обмежень	Регуляторні обмеження щодо використання плазмових технологій, висока вартість обладнання.
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Необхідність відповідності стандартам ISO 14922, ISO 12679, EN 657 для термічного напилення.
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	10–12%.

Наступним кроком визначаємо потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та формуємо орієнтований перелік вимог до товару для кожної групи.

Таблиця 9.5 – Визначення потенційних груп клієнтів

№	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Захист поверхонь від зносу, корозії та високих температур	Підприємства авіаційної галузі	Висока увага до якості та надійності, готовність платити більше за довговічність і безпеку.	Висока зносостійкість покриттів, температурна стійкість, відповідність авіаційним стандартам (FAA, EASA).

Продовження Таблиця 9.5

2	Збільшення терміну експлуатації обладнання	Медична промисловість	Орієнтація на екологічність і біосумісність; вимога сертифікації для медичних стандартів.	Екологічно чисті матеріали, гіпоалергенність покриттів, можливість обробки невеликих медичних пристроїв або імплантатів.
3	Підвищення зносостійкості інструментів	Виробники промислового інструменту (металорізальний, формувальний)	Спрямованість на довговічність та зниження вартості експлуатації	Висока твердість покриття, стійкість до механічних пошкоджень
4	Естетичність та антикорозійна стійкість поверхонь	Виробники побутової техніки, автомобільної індустрії	Орієнтація на зовнішній вигляд та стійкість поверхонь	Гладкість поверхні, антикорозійні властивості, довговічність покриття

Далі проведемо аналіз ринкового середовища: скласти таблицю факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів що йому перешкоджають.

Таблиця 9.6 - Фактори загроз

№	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Висока конкуренція	Наявність великих компаній, які вже мають сильні позиції на ринку та добре налагоджену інфраструктуру	Створення унікального конкурентного продукту з використанням інноваційних технологій
2	Технічні ризики	Можливість технічних збоїв або невідповідності кінцевого продукту встановленим стандартам	Інвестування у додаткові випробування, сертифікацію та контроль якості

Продовження Таблиця 9.6

3	Високі початкові витрати	Великі інвестиції на розробку, виробництво та впровадження технології	Залучення інвесторів, грантів або державних програм підтримки інновацій
4	Регуляторні обмеження	Складні вимоги до сертифікації та відповідності міжнародним стандартам	Професійний юридичний супровід та інтеграція процесів відповідно до вимог регуляторів
5	Нестача кваліфікованих кадрів	Складнощі з пошуком та утриманням фахівців у галузі високих технологій	Проведення навчання, співпраця з освітніми установами, створення програм розвитку кадрів
6	Відсутність довіри до нових технологій	Скептицизм з боку потенційних клієнтів щодо надійності та ефективності нових рішень	Проведення інформаційних кампаній, демонстрація переваг продукту через практичні приклади та відгуки

Тепер розглянемо фактори можливостей.

Таблиця 9.7 – Фактори можливостей

№	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Зростання попиту на високоякісні покриття	Підвищення потреби на обладнання для нанесення покриття у промисловості	Розширення виробництва, розробка спеціальних маркетингових кампаній для цільових сегментів
2	Державна підтримка інновацій	Наявність грантів і програм для підтримки розробок у сфері новітніх технологій	Участь у конкурсах грантів, активна співпраця з державними установами
3	Вихід на міжнародні ринки	Можливість реалізації продукту в інших країнах, особливо в регіонах з високою промисловою активністю	Сертифікація продукту за міжнародними стандартами, створення експортної стратегії

Продовження Таблиця 9.7

4	Технологічний прогрес	Постійний розвиток нових матеріалів та методів нанесення покриттів	Інвестування у дослідження і розробки для використання новітніх технологій
5	Потреба в енергоефективних технологіях	Зростання уваги до економічного використання ресурсів і енергозбереження	Розробка установок, що знижують енерговитрати, і позиціонування продукту як екологічно ефективного
6	Швидкий розвиток галузі	Інтенсифікація індустрій, що потребують покриттів (авіабудування, медицина, енергетика, автомобільна сфера)	Фокусування на стратегічних ринках із високим потенціалом зростання

Надалі проведемо аналіз пропозиції: визначимо загальні риси конкуренції на ринку.

Таблиця 9.8 - Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
Тип конкуренції: олігополія	Ринкова структура, в якій ринок контролюється невеликою кількістю великих фірм або виробників, що мають великий вплив на ціни та умови ринку.	Розробка гнучких стратегій ціноутворення, таких як програми лояльності.

Продовження Таблиця 9.8

За рівнем конкурентної боротьби: Національний	Національний рівень конкурентної боротьби вказує на те, що конкуренція між підприємствами ведеться на території конкретної країни або регіону.	Розробка гнучкої стратегії ціноутворення, враховуючи ціни конкурентів, споживчі можливості та вартість виробництва. Фокус на покращенні якості продукції та наданні високого рівня обслуговування для задоволення потреб клієнтів.
За галузевою ознакою: внутрішньогалузева	Внутрішньогалузева конкуренція вказує на те, що підприємства конкурують між собою в одній і тій же галузі або сфері діяльності.	Інвестування в дослідження та розробки технологій. Забезпечення високої якості продукції та відповідності стандартам галузі.
Конкуренція за видами товарів: товарна родова	Товарна родова конкуренція виникає, коли різні підприємства пропонують схожі товари чи послуги, які можуть бути взаємозамінними для споживачів.	Інвестування в дослідження та розробки технологій.
За характером конкурентних переваг: нецінова	Запропоновано концепцію, яка акцентується не на низькій вартості обладнання, а на високій якості продукції, інноваціях і високому рівні обслуговування.	Залучення інвестицій у науково-дослідну роботу з метою підвищення рівня якості.
За інтенсивністю: Марочна	Визначається інтенсивністю конкуренції за брендами або марками товарів чи послуг.	Компанія повинна активно будувати та підтримувати сильний бренд, який визначається унікальними характеристиками і цінностями.

Далі проведемо більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі (за моделлю 5 сил М. Портера).

Таблиця 9.9 – Аналіз конкуренції галузі за М. Портером

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари замінники
Складові аналізу	(ТОВ " КОДАКИ ")	Компанії з інших галузей, які планують входження на ринок.	Постачальники матеріалів для створення покриттів, таких як кераміка, порошки металів, охолоджувальні рідини.	Промислові підприємства, які потребують спеціальних покриттів (авіабудування, енергетика, автомобілебудування, медицина)	Технології нанесення покриттів за допомогою магнетронного розпилення, лазерного наплавлення, хімічних методів.
Висновки	Висока конкуренція серед компаній, що виробляють плазмові установки (наприклад, ТОВ "КОДАКИ", "Авіаційні системи України").	Створення бар'єрів для входу через патенти та стандарти.	Диверсифікація постачальників, робота з локальними постачальниками.	Потреба клієнтів у спеціалізованих покриттях є постійною, з акцентом на авіацію, енергетику та медицину.	Інновації, які дозволяють знижувати витрати і підвищувати ефективність плазмових покриттів, можуть створити конкурентну перевагу.

На підставі аналізу таблиці робиться висновок щодо основної можливості працювати на ринку, з урахуванням конкурентної ситуації. Також робиться висновок про характеристики (сильні сторони), які необхідно враховувати у проекті для досягнення конкурентоспроможності на ринку. Другий висновок враховується при формулюванні переліку факторів конкурентоспроможності. На основі аналізу конкуренції, проведеного в таблиці 9.9, а також урахування характеристик ідеї проекту (таблиця 9.2), вимог споживачів до товару (таблиця 9.5) та факторів маркетингового середовища (таблиці № 9.6-9.7), визначається та обґрунтовується перелік факторів конкурентоспроможності. Аналіз оформлюється в таблиці 9.10.

Таблиця 9.10 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№	Фактор конкурентоспроможності	Обгрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння значущим)
1	Інноваційність технології	Розробка установки з альтернативним джерелом енергії відповідає сучасним трендам енергоефективності та екологічності, що забезпечує її унікальність порівняно з конкурентами. Унікальність технології дозволяє залучати нові сегменти ринку та сприяє довгостроковій конкурентній перевазі.
2	Гнучкість і адаптивність обладнання	Можливість налаштування параметрів для нанесення покриттів різного типу (градієнтних, багатошарових) дозволяє залучити клієнтів із різних галузей, наприклад, авіації, енергетики, медицини. Це забезпечує високу цінність обладнання для широкого спектра користувачів.
3	Відповідність стандартам і сертифікація	Розробка установки відповідно до міжнародних стандартів забезпечує можливість використання обладнання в різних країнах, що сприяє розширенню ринку. Сертифікація підвищує довіру клієнтів і забезпечує їхню впевненість у надійності продукції.

Продовження Таблиця 9.10

4	Підтримка клієнтів	Пропозиція сервісного обслуговування, навчання персоналу та технічної підтримки збільшує лояльність клієнтів і створює довгострокові відносини.

Проведемо аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту.

Таблиця 9.11 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

№	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг конкурентів у порівнянні з іншим методом
1	Інноваційність технології	19	-4
2	Гнучкість і адаптивність обладнання	18	-3
3	Відповідність стандартам і сертифікація	18	-2
4	Підтримка клієнтів	20	-1

Після порівняльного аналізу можливостей для впровадження проекту формується SWOT-аналіз, який включає у себе матрицю сильних (Strenght) та слабких (Weak) сторін, а також загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) на основі виявлених ринкових загроз та можливостей, а також сильних і слабких сторін.

Таблиця 9.12 – SWOT- аналіз стартап проекту

Сильні сторони:	Слабкі сторони:
- Інноваційність технології нанесення покриттів - Енергоефективність і екологічність - Відповідність міжнародним стандарту - Гнучкість і універсальність обладнання для різних галузей - Можливість налаштування під потреби клієнта - Низька вартість володіння для клієнтів	- Високі початкові інвестиції у розробку і виробництво установки - Відсутність власної виробничої бази - Обмежений досвід у маркетинговій діяльності - Потенційні ризики затримок у розробці або сертифікації - Залежність від постачальників спеціалізованих матеріалів

Продовження Таблиця 9.12

	Можливість високої конкуренції з боку усталених компаній
Можливості: - Розвиток ринку екологічно чистих і енергоефективних технологій - Зростання попиту на інноваційні матеріали для авіації, медицини та енергетики - Підтримка державних програм, спрямованих на впровадження новітніх технологій - Можливість залучення міжнародних партнерів і клієнтів - Використання грантів і інвестицій для розвитку технології	Загрози: - Збільшення витрат на сировину через зовнішні фактори - Ризик впровадження конкурентами схожих технологій - Висока вартість сертифікації продукції - Залежність від коливань попиту на ринках - Регуляторні зміни, які можуть вплинути на ринок - Потенційна недовіра споживачів до нових продуктів

На основі проведеного SWOT-аналізу розробляються альтернативи ринкової стратегії (перелік заходів) для введення стартап-проекту на ринок, а також визначається приблизний оптимальний час їх реалізації з урахуванням потенційних проектів конкурентів, які можуть бути представлені на ринку.

Таблиця 9.13 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Запуск рекламної кампанії, орієнтованої на специфічні потреби цільової аудиторії (медицина, авіація, енергетика); участь у галузевих виставках і форумах.	Висока	6–12 місяців

Продовження Таблиця 9.13

2	Партнерство з постачальниками сировини для забезпечення стабільного виробництва; створення пілотної партії для демонстрацій і тестувань клієнтами.	Середня	3–9 місяців
3	Подання заявки на державні гранти та участь у міжнародних програмах підтримки інновацій; залучення інвесторів через презентації та стартап-інкубатори.	Середня	6–18 місяців
4	Розробка спрощеної модифікації обладнання для дрібних і середніх підприємств із нижчою вартістю, що дозволить охопити ширшу аудиторію.	Низька	12–24 місяці
5	Співпраця з університетами та дослідницькими центрами для тестування і вдосконалення технології; отримання сертифікатів відповідності міжнародним стандартам.	Висока	9–15 місяців

9.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Перший етап розроблення ринкової стратегії включає в себе визначення стратегії охоплення ринку, а саме - опис цільових груп потенційних споживачів.

Таблиця 9.14 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтований попит в межах цільової групи	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Підприємства авіаційної галузі	100%	90%	85%	60%
2	Медична промисловість	80%	75%	75%	55%
3	Автомобілебудування	85%	80%	85%	70%
4	Енергетичні компанії	70%	65%	70%	60%

Для взаємодії в обраних сегментах ринку розробляємо основну стратегію розвитку.

Таблиця 9.15 – Визначення базової стратегії розвитку

Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до	Базова стратегія розвитку
Залучення ключових клієнтів через пілотні проекти в галузях з високими вимогами (авіація, медицина, автомобілебудування енергетика).	Цільовий маркетинг для авіаційної, медичної, автомобільної, енергетичної галузі.	Інноваційність технології, довговічність покриттів, відповідність стандартам.	Стратегія фокусу

Наш наступний етап полягає у визначенні стратегії конкурентної поведінки.

Таблиця 9.16 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
Ні, на ринку вже є конкуренти з аналогічними рішеннями.	Основний фокус на залученні нових споживачів у галузях із високими вимогами, таких як авіація, медицина автомобільна та енергетична галузі.	Ні, компанія робитиме акцент на інноваційність як унікальні переваги.	Стратегія інновації акцент на новаторстві в технологічному прогресі для випередження конкурентів

Основною стратегією конкурентної поведінки є обрана концепція зайняття конкурентної ніші, в якій компанія визначає один або кілька ринкових сегментів невеликого обсягу як основні цільові для свого бізнесу. Основною метою компанії в цьому випадку є постійна турбота щодо підтримки та розвитку своєї конкурентної переваги, формування лояльності та прихильності споживачів, а також створення вхідних бар'єрів.

Таблиця 9.17 – Визначення стратегії позиціонування

Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, якій мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
Висока якість, довгові-чність, відповідність міжнародним станда-ртам (авіація, медици-на автомобільна та енергетична галузі).	Стратегія інновації акцент на новато-рстві та технологіч-ному прогресі для випередження конкурентів	Високі технічні характери-стики, надійність, довго-строковість та якість . Виготовлення продукції що відповідає державним стандартам та інновацій-ність	Технічний лідер; Інноваційний партнер; Висока якість, надійність та довгостроковість виробів;

В наслідок виконання розділу ми розробили систему рішень, що отримала загальну підтримку і визначить стратегію ринкової поведінки для стартап-компанії, визначаючи напрями її діяльності на ринку.

9.5 розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Першим етапом є створення маркетингової концепції продукту, який буде придбаний споживачем. Для цього важливо узагальнити результати попереднього аналізу конкурентоспроможності нашої продукції.

Таблиця 9.18 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Висока зносостійкість деталей	Подовження терміну експлуатації обладнання	Використання градієнтних покриттів для рівномірного розподілу напруги та зменшення ризику корозії.

Продовження Таблиця 9.18

2	Економія енергоресурсів	Зниження енергоспоживання завдяки ефективній технології нанесення покриття	Альтернативне джерело енергії, що забезпечує менші витрати в процесі виробництва.
3	Універсальність технології	Можливість застосування для різних матеріалів і галузей	Розробка багатофункціональної установки з адаптивними параметрами роботи.
4	Стабільна якість і повторюваність процесу	Мінімізація відхилень у властивостях покриття	Точність автоматизації процесу нанесення плазмових покриттів.
5	Екологічність	Зменшення викидів шкідливих речовин	Використання екологічно чистих матеріалів і оптимізація витрат сировини.
6	Швидкість обробки	Скорочення часу виробництва готових деталей	Висока швидкість нанесення покриттів завдяки модернізованому плазмотрону.

Продовжуємо розробку трьохрівневої маркетингової моделі товару, конкретизуючи концепцію продукту чи послуги, його фізичні компоненти та особливості процесу надання.

Таблиця 9.19 - Трьохрівнева маркетингова модель товару

Рівні товару	Сутність та складові
1. Товар за задумом	Розробка установки для нанесення плазмових градієнтних покриттів із використанням альтернативного джерела енергії. Складові: –Потреба, яку задовольняє: підвищення зносостійкості деталей, енергозбереження, універсальність застосування. –Ключова вигода: ефективність і економічність нанесення захисних покриттів.

Продовження Таблиця 9.19

2. Товар у реальному виконанні	1 Конкретне виконання продукту, що включає його фізичні характеристики, дизайн та упаковку. Складові: –Фізичні компоненти: установка з плазмотроном, джерело альтернативної енергії, блок управління, система охолодження та подачі матеріалів. –Якість: забезпечення стабільності нанесення покриттів. –Особливості: портативність, налаштування параметрів для різних матеріалів, мінімізація викидів. –Дизайн: сучасний інтерфейс управління з екранами, ергономічна конструкція.
	Гарантія: 2-річна гарантія на основні вузли установки.
	Підтримка: технічна підтримка 24/7, доступ до онлайн-документації та навчальних матеріалів.
3. Товар із підкріпленням	Додаткові сервіси: модернізація обладнання під потреби замовника, виїзний сервіс для налаштування обладнання на місці.
	Навчання: курси з експлуатації обладнання для клієнтів.
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: За рахунок патентування технології.	

Далі ми визначимо цінові межі, якими ми будемо керуватися при встановленні ціни на наш потенційний товар. Цей процес включає аналіз цін на аналогічні товари або товари-субститути, а також оцінку рівня доходів цільової аудиторії споживачів.

Таблиця 9.20 – Визначення меж встановлення ціни

Рівень цін на товари аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
300000-500000 грн/шт	від 400000 грн/міс.	320000-450000 грн/шт

Далі ми визначимо оптимальну систему збуту, приймаючи рішення:

1. чи проводити збут власними силами чи залучати сторонніх посередників (власна або залучена система збуту);
2. вибір та обґрунтування оптимальної глибини каналу збуту;

3. вибір та обґрунтування виду посередників.

Таблиця 9.21 – Формування системи збуту

Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
Цільові клієнти (промислові підприємства) віддають перевагу персоналізованим контрактам, із врахуванням специфічних технічних вимог. Довготривалі відносини із постачальниками є пріоритетними.	–Забезпечення повного комплексу технічної консультації перед продажем; –Демонстрація обладнання; –Надання гарантійного обслуговування; –Навчання персоналу клієнта; –Постачання витратних матеріалів.	Канал збуту з мінімальною глибиною (без посередників).	Власна система збуту із прямим продажем. Створення спеціалізованого відділу продажів для роботи із клієнтами та консультацій.

З урахуванням особливостей закупівельної поведінки цільових клієнтів, було вирішено встановити власну систему збуту. У цьому випадку виробник реалізує свій товар безпосередньо клієнтам через власний веб-сайт. Крім того, обрана стратегія заглиблення каналу збуту нульового рівня, оскільки компанія прагне зберігати тісний зв'язок із споживачами в обмеженому цільовому каналі.

Останньою складовою маркетингової програми є розроблення концепції маркетингових комунікацій, що ґрунтується на раніше обраному основному позиціонуванні та визначає специфіку поведінки клієнтів.

Таблиця 9.22 – Концепція маркетингових комунікацій

Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій якими користується цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
Висока технічна обізнаність	Спеціалізовані ресурси	Іноваційність технології, надійність, продуктивність	Залучення уваги до нових технологій, інформація про продукт	Технологічна перевага, та забезпечення

10. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Воднево-кисневе плазмове напилення – це сучасна технологія, що дозволяє отримувати високоякісні покриття з різноманітних матеріалів. Однак, цей процес пов'язаний з низкою потенційних небезпек для здоров’я та життя працівників, а також для навколишнього середовища.

Воднево-кисневе плазмове напилення є перспективною технологією, що дозволяє отримувати покриття з унікальними властивостями. Однак, широке застосування цієї технології ускладнюється наявністю значної кількості потенційних небезпек. Висока температура плазми, горючість водню та кисню, виділення шкідливих речовин, а також складність управління процесом – все це створює ризик виникнення аварійних ситуацій. Тому забезпечення безпеки праці при проведенні робіт з воднево-кисневого плазмового напилення є актуальним завданням, яке вимагає комплексного підходу. Мета даного розділу – проаналізувати основні небезпеки, пов'язані з даним технологічним процесом, та розробити рекомендації щодо їх усунення.

Цей розділ має на меті забезпечити всебічний підхід до безпеки праці під час воднево-кисневого плазмового напилення. Ми прагнемо не лише виявити потенційні небезпеки, а й розробити практичні рішення для їх усунення. Крім того, ми надамо детальний аналіз чинного законодавства та стандартів у сфері охорони праці, а також сприятимемо підвищенню обізнаності працівників про важливість безпеки. Наша мета – створити систему, яка забезпечуватиме постійне вдосконалення заходів безпеки та мінімізує ризик виникнення нещасних випадків.

10.1 Аналіз шкідливих та небезпечних виробничих факторів

У цьому розділі ми провели детальний аналіз потенційних небезпек, пов’язаних з воднево-кисневим плазмовим напиленням. Зокрема, ми розглянули фізичні, хімічні та біологічні фактори, які можуть негативно впливати на здоров’я працівників та якість виробів. На основі отриманих даних розроблено комплексний план заходів безпеки, спрямований на мінімізацію ризиків та створення безпечних умов праці під час виконання даного технологічного процесу. В таблиці 10.1 наведено більш детальну характеристику небезпечних та шкідливих факторів.

Шкідливі та небезпечні виробничі фактори (ШНВФ) за своїм походженням та впливом на людину класифікують на кілька груп: фізичні (пов'язані з фізичними явищами, такими як шум, вібрація, електромагнітні випромінювання), хімічні (пов'язані з дією хімічних речовин), психофізіологічні (пов'язані з організацією праці, нервово-психічними навантаженнями), біологічні (пов'язані з впливом мікроорганізмів) та соціальні (пов'язані з умовами соціального середовища на робочому місці) [11].

Таблиця 10.1 – Небезпечні та шкідливі виробничі фактори при воднево-кисневому плазмовому напилені

ШНВФ для плазмового напилення			Інтенсивність фактора
Шкідливі виробничі фактори	Шкідливі речовини		XX
	Випромінювання в оптичному діапазоні	Ультрафіолетове	XX
		Видиме	X
		Інфрачервона	X

Продовження Таблиця 10.1

	Електромагнітні поля	-

	Магнітні поля	-
	Іонізуючі випромінювання	-
	Шум	XX
	Ультразвук	XX
	Статичне навантаження на руку	-
Небезпечні виробничі фактори	Електричний струм	XX
	Іскри, бризки і види розплавленого металу	XX
	Механізми і вироби, що рухаються	X
	Системи, які знаходяться під тиском, що не дорівнює атмосферному	X

Примітки: ++ - інтенсивний фактор; + - помірний фактор; (-) - незначний фактор чи його відсутність.

Під час плазмового напилення працівники піддаються впливу низки шкідливих фізичних факторів. Висока температура плазми, ультрафіолетове випромінювання та дрібні частинки матеріалу, що утворюються в процесі напилення, становлять значну загрозу для здоров'я. Зокрема, існує ризик отримання теплових опіків, пошкодження органів зору та розвитку професійних захворювань дихальних шляхів [12].

Процес плазмового напилення супроводжується утворенням широкого спектру шкідливих хімічних речовин, таких як оксиди металів, фториди та інші сполуки, які можуть потрапляти в організм працівника через дихальні шляхи, шкіру та очі. Ці речовини є причиною розвитку різноманітних професійних захворювань, включаючи захворювання дихальної системи, шкіри та очей [12].

Оскільки плазмове напилення проводиться в штучно створеному виробничому середовищі, ризик впливу біологічних факторів, характерних для природного середовища, відсутній.

Соціальні ризики при плазмовому напиленні пов'язані з монотонністю роботи, високою відповідальністю та обмеженими рухами, що спричиняють стрес і знижують мотивацію працівників. Несприятливий мікроклімат у колективі, недостатня соціальна підтримка та відсутність належних умов праці поглиблюють ці проблеми, призводячи до зниження продуктивності та збільшення ризику професійних захворювань [12].

Цей технологічний процес супроводжується значними ризиками для здоров'я та безпеки працівників.

10.2 Вимоги безпеки праці

10.2.1 Вимоги до технологічних процесів

Плазмове зварювання, різання та напилення металів повинно виконуватись у відповідності до вимог НПАОП 28.5-1.02-07 [13]. У нашому випадку мова йтиме про плазмове напилення, а саме тому вимоги НПАОП 28.5-1.02-07 нас абсолютно влаштовують.

З метою безпеки плазмові роботи проводять в ізольованих приміщеннях або секторах. Всі допоміжні процеси винесені за межі робочої зони.

Для забезпечення високої якості покриття і безпеки персоналу, процес плазмового напилення повинен здійснюватися в умовах ефективної витяжної вентиляції. Ручні операції рекомендується проводити в звукоізольованих камерах.

Відповідно до ДБН В.2.5-67:2013 [14], робота без обов'язкового дотримання всіх норм категорично заборонена.

Високочастотна низькотемпературна плазма вимагає спеціального екранування, відповідно до норм ДСН 3.3.6.096-2002 [15].

Для забезпечення безпеки під час плазмового напилення, обладнання має відповідати вимогам державних нормативних актів з охорони праці, а саме ДНАОП 0.00-1.21-98 [16], та ДНАОП 0.00-1.32-01 [17].

Для плазмового напилення необхідно використовувати герметичні камери або кабіни, внутрішні поверхні яких оброблені шумопоглинаючим матеріалом високої ефективності, з звукомпоглинання не менше 0,7.

Коли напилювальні роботи проводяться в замкнутих або напівзамкнутих просторах, існуюча вентиляційна система може бути недостатньо ефективною. В таких випадках необхідно застосовувати локальні системи вентиляції, які забезпечуватимуть постійний приплив свіжого повітря до зони дихання працівника.

Щоб убезпечити працівників від ураження електричним струмом, необхідно дотримуватися наступних правил: регулярно перевіряти кнопки управління, забезпечити автоматичне відключення живлення в аварійних ситуаціях та блокування доступу до небезпечних зон. Роботи з плазмою повинні виконуватися двома працівниками для взаємного контролю. Для очищення деталей заборонено використовувати трихлоретилен через ризик утворення отруйного фосгену.

Газові балони слід зберігати окремо від зони плазмової обробки. Приміщення, де зберігається водень, повинні бути обладнані потужною вентиляцією з кратністю повітрообміну не менше 10 та системою контролю вмісту газу в повітрі, у відповідності за нормами ДНАОП 0.00-1.07-94 [18].

10.2.2 Вимоги до виробничих приміщень

Розміщення обладнання для плазмового напилення має відповідати вимогам безпеки та ефективності виробництва. Відстані між установкою для плазмового

напилення, деталями, що підлягають обробці, а також відстані до стін, колон та іншого обладнання повинні забезпечувати безпечний та зручний доступ для оператора, а також запобігати пошкодженню обладнання та деформації деталей.

Відповідно до вимог нормативних документів, зокрема ДБН В.2.2-28:2010 [19], робоче місце для плазмового напилення має бути обладнане захисними екранами висотою не менше 2,5 метрів для захисту персоналу від розпечених частинок та шкідливого випромінювання. Ширина проходів навколо робочої зони повинна бути не менше 1 метра для забезпечення безпечного доступу до обладнання. Підлога в робочій зоні має бути виконана з негорючих матеріалів з протиковзким покриттям.

Для забезпечення безпечних умов праці під час плазмового напилення необхідно організувати ефективну вентиляцію виробничого приміщення. Вентиляційна система повинна забезпечувати постійний приплив свіжого повітря та видалення забрудненого повітря, що містить аерозолі металів та інші шкідливі речовини, які утворюються в процесі плазмового розпилення. Розрахунок вентиляції проводиться з урахуванням технологічних особливостей процесу напилення та вимог санітарних норм.

Повітря, що відводиться від обладнання для плазмового напилення, підлягає обов'язковій фільтрації [14]. Очищене повітря повертається у виробниче приміщення з температурою не нижче +18 °С ДСН 3.3.6.042-99 [20]. Для захисту від теплового випромінювання застосовуються екрани, системи охолодження або ЗІЗ. Температура, вологість та швидкість руху повітря повинна відповідати нормам ДСН 3.3.6.042-99.

Під час виконання робіт з плазмового напилення необхідно забезпечити відповідність рівнів шуму, ультразвуку, інфразвуку та вібрації на робочому місці оператора вимогам ДСН 3.3.6.037-99[21]. Ці вимоги встановлюють гранично допустимі значення фізичних факторів, перевищення яких може призвести до негативних наслідків для здоров'я працівників. Для забезпечення дотримання

санітарних норм рекомендується проводити регулярні вимірювання рівнів шуму та вібрації на робочих місцях.

Для забезпечення якісного виконання робіт з плазмового напилення необхідно організувати достатню освітленість робочої зони, відповідно до вимог ДБН В.2.5-28-2006 [22]. Рекомендується використовувати світлодіодні лампи, встановлені на гнучких шлангах, для освітлення внутрішніх поверхонь деталей. Напруга живлення таких ламп не повинна перевищувати 12 вольт. Для захисту очей від яскравого світла необхідно використовувати спеціальні захисні окуляри

Під час виконання робіт з плазмового напилення, особливо в складних умовах, необхідно забезпечити безпеку працівників шляхом використання кліматизованих кабін, теплоізоляційних матеріалів та спеціального одягу. Дотримання вимог ДСН 3.3.6.042-99 [21], є обов'язковим.

10.2.3 Вимоги до організації робочих місць

Для забезпечення безпечних та ефективних умов праці оператора установок плазмового напилення, його робоче місце має відповідати вимогам НПАОП 28.5-1.02-07 [23] Зокрема, воно має бути обладнане ергономічним робочим кріслом, яке регулюється під індивідуальні потреби працівника. Крім того, робоча зона повинна бути захищена від впливу високотемпературних частинок, розплавлених металів та шкідливих речовин, які можуть утворюватися під час процесу плазмового напилення.

Для забезпечення безпеки працівників, роботи з плазмового напилення рекомендується проводити в окремих кабінах згідно з вимогами Кабіни мають бути обладнані захисними екранами та ефективною вентиляцією.

Сучасні технології плазмового напилення вимагають створення спеціальних робочих місць, які б забезпечували безпеку та ефективність виконання робіт. Використання кліматизованих кабін для дистанційного керування процесом, а також застосування теплоізоляційних матеріалів та засобів індивідуального

захисту, дозволяє створити оптимальні умови для роботи оператора та підвищити якість виконання робіт відповідно з вимогами ДСН 3.3.6.042-99 [21].

10.2.4 Вимоги до вентиляції

Згідно з вимогами ДСТУ 2456-94 [24], під час проведення робіт з плазмового напилення, як і при зварюванні алюмінію, обов'язковою є організація місцевої вентиляції. Це пов'язано з виділенням шкідливих аерозолів металів та інших речовин під час процесу напилення. Місцева вентиляція дозволяє ефективно витягувати забруднене повітря безпосередньо з зони проведення робіт, запобігаючи забрудненню всього виробничого приміщення та забезпечуючи безпечні умови праці для персоналу.

Розрахунок необхідного об’єму повітря для місцевої вентиляції (Lм) залежить від швидкості всмоктування біля джерела шкідливих речовин, конструкції всмоктувального отвору та особливостей навколишнього простору [24], та розраховується за формулою (10.1):

$$L_м = 3600\ F_0\ V_0\ , \qquad (10.1)$$

де F_0 – площа відкритого перерізу витяжного отвору відсмоктувача, $м^2$;

V_0 – швидкість всмоктування повітря у цьому прорізі, м/с.

Швидкість руху повітря, що створюється місцевими відсмоктувачами біля джерел виділення шкідливих речовин, повинна бути, при плазвому напиленні не менше 1,8 м/с.

10.3 Інженерні рішення для забезпечення безпеки праці

10.3.1 Електробезпека

Плазмове напилення є потужним технологічним процесом, який широко застосовується в різних галузях промисловості. Однак, як і будь-який процес, що передбачає використання електричної енергії, він пов'язаний з певними ризиками, зокрема з ураженням електричним струмом. Тому дотримання правил електробезпеки є обов'язковою умовою для безпечного проведення робіт з плазмового напилення. Електротехнічні вироби з точки зору безпеки повинні відповідати вимогам ДНАОП0.00-1.21-98 [25] та ДНАОП 0.00-1.32-01 [26].

Джерела підвищеної небезпеки при плазмовому напиленні

1. Висока напруга: Установки для плазмового напилення працюють під високою напругою, що створює значний ризик ураження електричним струмом при недотриманні правил безпеки.

2. Відкриті струмоведучі частини: Під час роботи обладнання можуть оголюватися струмоведучі частини, що збільшує ризик ураження.

3. Волога та підвищена температура: Умови роботи, особливо в цехах з підвищеною вологістю або температурою, можуть сприяти ураженню електричним струмом.

4. Металеві конструкції та заземлення: Неправильне заземлення обладнання та металевих конструкцій може призвести до виникнення потенціалів дотику, що становлять небезпеку для обслуговуючого персоналу.

Заходи безпеки при плазмовому напиленні:

1. Дотримання правил експлуатації обладнання: Перед початком роботи необхідно ретельно ознайомитися з інструкцією з експлуатації обладнання та суворо дотримуватися її вимог.

2. Використання засобів індивідуального захисту: Обов'язково використання діелектричних рукавичок, килимків та взуття, захисних окулярів і щитків.

3. Регулярний огляд обладнання: Періодичний огляд обладнання на предмет пошкоджень ізоляції, контактів та інших елементів.

4. Заземлення обладнання: Надійне заземлення всіх металевих частин обладнання та конструкцій.

5. Вентиляція робочого місця: Забезпечення достатньої вентиляції для відведення шкідливих виділень.

6. Освітлення робочого місця: Яскраве освітлення робочого місця для забезпечення хорошої видимості.

7. Проведення інструктажів: Регулярне проведення інструктажів з питань електробезпеки з персоналом.

Дотримання правил електробезпеки при плазмовому напиленні є запорукою безпечної роботи та запобігання нещасним випадкам. Регулярний контроль за станом обладнання, використання засобів індивідуального захисту та проведення інструктажів з персоналом дозволять забезпечити безпеку на виробництві.

Дотримання правил електробезпеки при плазмовому напиленні є запорукою безпечної роботи та запобігання нещасним випадкам. Регулярний контроль за станом обладнання, використання засобів індивідуального захисту та проведення інструктажів з персоналом дозволять забезпечити безпеку на виробництві.

10.3.2 Вимоги до експлуатації зварювального обладнання

Плазмове напилення – це технологічний процес, який потребує особливої уваги до безпеки. Обладнання для плазмового напилення повинно бути не лише ефективним, але й безпечним у використанні, а також відповідати вимогам стандарту ДСТУ 2456-94 [24]. Важливо, щоб воно було сумісне з матеріалами, стійким до високих температур і дозволяло точно регулювати всі параметри процесу. Оператор обладнання повинен мати відповідну кваліфікацію та допуск, а також використовувати всі необхідні засоби індивідуального захисту. Регулярний

технічний огляд обладнання та дотримання правил безпеки допоможуть уникнути нещасних випадків і забезпечити високу якість виконаних робіт.

Усі джерела живлення які потрібні для плазмового напилення повинні бути обов’язково з’єднаними спеціальними ізольованими кабелями та відповідати вимогам ПУЕ-2017 [27].

10.3.3 Вимоги до застосування засобів індивідуального захисту

Плазмове напилення – це технологічний процес, що супроводжується виділенням високих температур, шкідливих речовин та яскравого світла. Тому використання засобів індивідуального захисту (ЗІЗ) є обов'язковою умовою для забезпечення безпеки працівників ДСТУ 7239:2011 [28].

При плазмовому напиленні виникає дуже багато небезпечних факторів таких як:

- Висока температура: Плазма має дуже високу температуру, яка може спричинити опіки шкіри та очей.

- Шкідливі речовини: Під час процесу напилення виділяються шкідливі аерозолі металів та інших речовин, які можуть призвести до захворювань дихальних шляхів та шкіри.

- Яскраве світло: Інтенсивне світло плазми може спричинити пошкодження зору.

- Шум: Процес напилення супроводжується високим рівнем шуму, що може негативно вплинути на слух.

Саме тому потрібно використовувати наступні засоби індивідуально захисту:

1. Захист органів дихання:

- Респіратори: Вибираються залежно від концентрації шкідливих речовин у повітрі, та згідно з ДСТУ EN 133:2005[29]. Рекомендуються респіратори з фільтрами високої ефективності (класу FFP3).

2. Захист шкіри:

- Захисний костюм: Виготовлений з негорючих матеріалів, що захищає шкіру від високих температур, бризок розплавленого металу та шкідливих речовин.

- Захисні рукавички: Виготовлені з жаростійких матеріалів, захищають руки від опіків та механічних пошкоджень.

- Захисне взуття: Забезпечує захист ніг від механічних пошкоджень та опіків.

Дані засоби повинні відповідати вимогам ДСТУ EN 420-2017 [30].

3. Захист очей та обличчя:

- Захисні окуляри: Повинні мати достатню площу огляду та забезпечувати захист від яскравого світла, бризок розплавленого металу та шкідливих частинок.

- Захисний щиток: Додатково захищає обличчя від великих частинок та бризок. Відповідно до вимог ДСТУ EN 175-2001[31].

4. Інші засоби захисту:

- Заглушки або навушники: Для захисту від шуму.

- Захисна каска відповідно до ДСТУ EN 397:2001 [32]: Для захисту голови від падаючих предметів.

10.4 Вимоги безпеки в надзвичайних ситуаціях

Під час плазмового напилення можуть виникнути різноманітні небезпечні ситуації, такі як пожежа, вибух, ураження електричним струмом, витік газів або опіки. У разі виникнення пожежі необхідно негайно відключити обладнання, викликати пожежну команду і вжити заходів для локалізації вогню. При ураженні електричним струмом слід відключити живлення, звільнити постраждалого від джерела струму та викликати медичну допомогу. Якщо стався витік газу, необхідно провітрити приміщення, відключити джерело витоку та викликати аварійну газову службу. При отриманні опіків необхідно охолодити уражену ділянку шкіри під проточною холодною водою та накласти стерильну пов’язку Під час повітряної тривоги дії персоналу повинні бути чіткими та скоординованими. Кожен працівник повинен знати свій маршрут евакуації та місце розташування укриття. Після

сигналу тривоги необхідно відключити обладнання, закрити вікна та двері і організовано рухатися до укриття [33].

10.4.1 Пожежна безпека

Згідно з НАПБ Б.03.002-2007 [34] процес напилення відбувається в приміщення що відноситься до категорії Г (негорючі речовини й матеріали у гарячому, розжареному, розплавленому станах, процеси обробки яких супроводжуються виділенням променистої теплоти, іскор та полум´я; горючі гази, рідини, тверді речовини, які спалюються чи утилізуються у вигляді палива). Високі температури, іскроутворення та використання горючих газів роблять плазмове напилення потенційно пожежонебезпечним процесом. Для мінімізації ризику виникнення пожежі згідно з ДНАОП 0.00-1.21-98 [35] необхідно забезпечити правильне заземлення обладнання, ефективну вентиляцію робочого місця, а також використовувати вогнезахисні матеріали та обладнання класів В та Е типу ОХ-7 та УО вибрати кількість відповідно НАПБ Б.03.002-2007 [36], Регулярний технічний огляд обладнання та дотримання правил експлуатації також є важливими аспектами пожежної безпеки.

10.4.2 Безпека в аварійних ситуаціях

Плазмове напилення пов'язане з високими температурами, використанням горючих газів та електричним струмом, що створює потенційну загрозу для здоров'я та життя працівників. Тому під час роботи з таким обладнанням необхідно бути особливо уважним та готовим до різних непередбачених ситуацій. У разі виникнення аварії, наприклад, пожежі чи витоку газу, першочергове завдання – забезпечити безпеку людей. Необхідно негайно відключити всі джерела живлення, евакуювати персонал у безпечне місце та викликати відповідні служби. Якщо є постраждалі, слід надати їм першу медичну допомогу до приїзду швидкої.

Висновоки до розділу охорони праці

Воднево-кисневе плазмове напилення – це сучасна технологія, яка дозволяє створювати високоякісні покриття з різноманітних матеріалів. Однак, незважаючи на свої переваги, цей процес пов'язаний з низкою значних ризиків для здоров'я працівників та навколишнього середовища.

Основні ризики:

А) плазма, що утворюється під час процесу, має надзвичайно високу температуру, що може призвести до опіків.

Б) виділення шкідливих речовин, таких як оксиди металів та інші сполуки, може призвести до захворювань дихальних шляхів та шкіри.

В) висока напруга, необхідна для підтримання плазми, створює ризик ураження електричним струмом.

Г) використання водню та кисню, які є горючими газами, збільшує ризик виникнення пожежі або вибуху.

Висновки

Під час виконання роботи було обгрунтовано вибір матеріалу з урахуванням формування покриття. Визначено параметри режиму робочих параметрів та геометричних розмірів проточної частини плазмотрону для напилення та допоміжного обладнання.

Установки для напилення на основі вже існуючих приладів. Також були виконанні розрахунки ресурсу роботи електродів, розрахунки охолодження аноду, розрахунки охолодження катоду, розрахунки охолодження міжелектродної вставки.

Проаналізувавши потреби ринку були визначенні потреби на напилення колінчастого валу. Використання нових технологій у виробництві та високу якість продукту після фінішньої обробки.

Також у роботі було розглянуто питання охорони праці та безпеки у надзвичайних ситуаціях. Нововведення засобів індивідуального захисту та методів експлуатації обладнання.

Виходячи з вище сказаного запропонована технологія забезпечує надійне покриття, стабільне виробництво, перспективу та безпеку при виконанні технологічного циклу, що забезпечує її широке впровадження.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. STEEL GROUP LIMITED LIABILITY COMPANY. [Електронний ресурс] - 2014 - Режим доступуhttps://steelgroup.com.ua/chornyj-metal/45/?srsltid=AfmBOor-cqQmM0RzzOc1E9oau70q3OHw_A32DpvJxgJQWv9cNU8r2xmg

(дата звернення 09.12.2024)

2. Триботехніка та основи надійності машин. Методичні вказівки до виконання курсової роботи для студентів напрямку підготовки 6.050504 «Зварювання» /Укл. В.В. Квасницький, А.В.Чорний – К.: ЗФ НТУУ «КПІ»2011.- 41с.

3. Текст лекцій з дисципліни «Інженерія поверхні» для студентів напрямку підготовки 6.050504 «Зварювання»/ Укл. Пащенко В.М. - К.: ЗФ НТУУ «КПІ»2012.- 74с.

4. Наплавлення та напилення. Методичні вказівки до виконання курсової роботи для студентів напрямку підготовки 6.050504 «Зварювання» /Укл. В.М. Корж, В.В. Квасницький, Ю.С. Попіль, Д.В. Степанов, О.С. Василенко – К.: ЗФ НТУУ «КПІ»2013.- 59с.

5. Відновлення деталей машин напиленням і наплавкою [Електронний ресурс] //– Режим доступу: http://delta-grup.ru/bibliot/23/oglav.htm.

(дата звернення: 09.12.2024).

6. Корж В.М. Технологія та обладнання для напилення: навч. Посібник. К.: НМЦ ВО,2000.-152с.

7. Напівавтомати для обробки шийок коленвалів [Електронний ресурс] // Харківський станковобудівний завод. – Режим доступу: http://harverst.com.ua/products/special/Semiautomatic%20grinders%20for%20cams%20of%20crankshafts.php

(дата звернення: 09.12.2024).

8. Група станків с ЧПУ [Електронний ресурс] // Харьківский станковобудівний завод. – Режим доступу: http://harverst.com.ua/products/special/products_5.php

(дата звернення: 09.12.2024).

9. Точильно-шліфувальний верстат Scheppach BTS 700 [Електронний ресурс] // Instrumentarium (фірмовий магазин Bosch, термотехніки, Cooper&Hunter та STIHL). – Режим доступу: https://instrumentarium.ua/tochylno-shlifuvalnyi-verstat-scheppach-bts-700-4903304901

(дата звернення: 09.12.2024).

10. ДСТУ EN ISO 2553:2022 Зварювання та суміжні процеси. Символічне зображення на кресленнях. Зварні з'єднання (EN ISO 2553:2019, IDT; ISO 2553:2019, IDT).

11. Охорона праці та цивільний захист: підручник / О. Г. Левченко, О. І. Полукаров, В. В. Зацарний та ін. // За ред. О. Г. Левченка. – К.: Основа, 2019. – 472 с. (дата звернення: 19.12.2024).

12. Левченко О. Г. Охорона праці у зварювальному виробництві: Навчальний посібник.– К.: Основа, 2010. – 240 с. (дата звернення: 19.12.2024).

13. НПАОП 28.5-1.02-07. Правила охорони праці при термічній обробці металів (дата звернення: 19.12.2024).

14. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування.(дата звернення: 19.12.2024).

15. ДСН 3.3.6.096-2002. Державні санітарні норми та правила при роботі з джерелами електромагнітних полів (дата звернення: 19.12.2024).

16. ДНАОП 0.00-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів (дата звернення: 19.12.2024).

17. ДНАОП 0.00-1.32-01. Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок (дата звернення: 19.12.2024).

18. ДНАОП 0.00-1.07-94. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давленим (дата звернення: 19.12.2024).

19. ДБН В.2.2-28:2010. Будинки адміністративного та побутового призначення (дата звернення: 19.12.2024).

20. ДСН 3.3.6.042-99. Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень (дата звернення: 19.12.2024).

21. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації (дата звернення: 19.12.2024).

22. ДБН В.2.5-28-2006. Природне і штучне освітлення (дата звернення: 19.12.2024).

23. ДБН В.2.2-28:2010. Будинки адміністративного та побутового призначення (дата звернення: 19.12.2024).

24. 13. ДСТУ 2456-94. Зварювання дугове і електрошлакове. Вимоги безпеки (дата звернення: 19.12.2024).

25. ДНАОП 0.00-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів (дата звернення: 19.12.2024).

26. ДНАОП 0.00-1.32-01. Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок (дата звернення: 19.12.2024).

27. ПУЕ-2017. Правила улаштування електроустановок. – К.: Міненерговугілля України, 2017. – 617 с. (дата звернення: 19.12.2024).

28. ДСТУ 7239:2011. Національний стандарт України. Система стандартів безпеки праці. Засоби індивідуального захисту. Загальні вимоги та класифікація (дата звернення: 19.12.2024).

29. ДСТУ EN 133:2005. Засоби індивідуального захисту органів дихання. Класифікація (дата звернення: 19.12.2024).

30. ДСТУ EN 420-2017. Загальні вимоги до рукавиць (дата звернення: 19.12.2024).

31. ДСТУ EN 175-2001. Засоби індивідуального захисту очей та обличчя під час зварювальних та споріднених процесів (дата звернення: 19.12.2024).

32. ДСТУ EN 397:2001. Каски захисні промислові (дата звернення: 19.12.2024).

33. Положення щодо розробки планів локалізації та ліквідації аварійних ситуацій і аварій, № 424/3717 від 30.06.1999 р. (дата звернення: 19.12.2024).

34. НАПБ Б.03.002-2007. Визначення категорії приміщень, будинків там зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою (дата звернення: 19.12.2024).

35. НПАОП 40.1-1.21-98 (ДНАОП 0.00-1.21-98) Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів (дата зверненпня: 19.12.2024).

36. НАПБ Б.03.002-2007 Норми визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою (дата звернення: 19.12.2024).