

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

Зварювальний факультет  
Кафедра інженерії поверхні

«На правах рукопису»  
УДК 621.793

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

 І.В. Смирнов

« 7 » 12 2018р.

**Магістерська дисертація**

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 132 Матеріалознавство

на тему: «Розробка плазмотронів на вуглеводневих сумішах для  
розпилення дроту та дослідження їх енергетичних характеристик»

Виконав (-ла):

студент (-ка) II курсу, групи ЗП-71мп

Булєєв Олег Анатолійович

Керівник:

Професор, д.т.н.

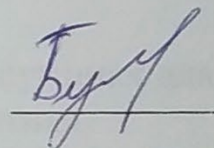
Пащенко В.М.

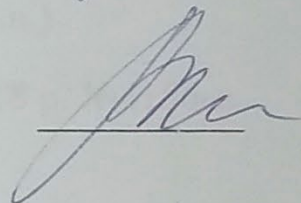
Консультант з охорони праці:

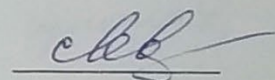
Зав. каф., д.т.н., проф.

Левченко О.Г.

Рецензент:

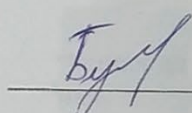






\_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цій магістерській  
дисертації немає запозичень з праць  
інших авторів без відповідних  
посилань.

Студент (-ка) 

### Анотація

В магістерській дисертації розглядається питання розробки плазмотронів на вуглеводневих сумішах для розпилення дроту та дослідження їх енергетичних характеристик.

Представлено технологію та комплексне обладнання для проведення технологічного процесу.

Проведений літературний огляд, розглянуті різні методики досліджень, були проведені дослідження енергетичних характеристик розроблено стартап проект та питання охорони праці. Магістерська дисертація складається з пояснювальної записки і графічної частини.

Пояснювальна записка вміщує в себе розділи (аналітичний, конструкційний, технологічний, стартап проект, охорона праці), до яких входять ілюстрації, таблиці та рисунки.

Обсяг пояснювальної записки 96 сторінок.

Ключові слова: плазмове напилення, енергетична ефективність, плазмотрон.

### Annotation

The master's thesis deals with the development of plasma torches on hydrocarbon mixtures for spraying wire and studying their energy characteristics.

Presented technology and integrated equipment for the process.

A literature review was conducted, various research methodologies were reviewed, and a start-up project and occupational safety issues were studied for the energy characteristics. The master thesis consists of an explanatory note and a graphic part.

The explanatory note includes sections (analytical, structural, technological start-up project, labor protection), which include illustrations, tables and figures.

The amount of the explanatory note is 96 pages.

Keywords: plasma spraying, energy efficiency, plasma torch.

## ЗМІСТ

Перелік скорочень, умовних позначень та визначень понять .....	8
ВСТУП.....	9
1 НАНЕСЕННЯ ГАЗОТЕРМІЧНИХ ПОКРИТТІВ ІЗ ДРОТУ ТА ПРУТКІВ. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД .....	10
2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПЛАЗМОВОГО НАПИЛЕННЯ ДРОТЯНИХ МАТЕРІАЛІВ .....	40
2.1 Експериментальний плазмовий розпилювач.....	41
2.2 Система електричного живлення плазмового генератора .....	44
2.3 Система живлення робочими газами .....	46
2.4 Система подавання дротяним матеріалом .....	47
3 МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	50
3.1 Методика дослідження енергетичних характеристик плазмових генераторів .....	50
3.1.1 Методика визначення статичних ВАХ плазмотрона.....	50
3.1.2 Методика вимірювання втрат тепла в елементи конструкції та визначення ККД розпилювача .....	51
4 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ .....	57
4.1 Загальні положення. Вимоги до плазмотрона для розпилення дроту та струменя плазми, який він генерує.....	57
4.2 Вплив геометричних розмірів дугового каналу на структуру та параметри потoku плазми .....	61
4.3 Енергетичні характеристики розпилювача.....	65
4.4 Дослідження процесу розпилення дроту .....	66
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ .....	70
5.1 Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів (ШНВФ) .....	70
5.2. Вимоги безпеки праці .....	71
5.2.1. Вимоги до технологічних процесів .....	71
5.2.2. Вимоги до виробничих приміщень .....	72
5.2.3. Вимоги до організації робочих місць.....	74
5.2.4. Вимоги до вентиляції.....	76
5.2.5 Загальні вимоги електробезпеки.....	77
5.2.6 Вимоги до експлуатації електричного обладнання .....	79
5.2.7 Електробезпека виконання робіт .....	80
5.2.8 Захист від теплового випромінювання .....	82
5.2.9 Вимоги до застосування засобів індивідуального захисту .....	83



	7
5.2.10 Вимоги безпеки в надзвичайних ситуаціях .....	83
5.2.11. Пожежна безпека.....	84
5.2.12 Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях.....	86
6 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ .....	87
6.1 Опис ідеї проекту .....	87
6.2 Технологічний аудит ідеї проекту.....	88
6.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	89
6.4. Розроблення ринкової стратегії проекту .....	94
6.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту .....	96
ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА .....	98

**Перелік скорочень, умовних позначень та визначень понять**

ЭМ – електродуговий металізатор

ВАХ – вольт-амперна характеристика

МЕВ – між електродна вставка

ПДН – плазмозово – дугове напилення

ККД – коефіцієнт корисної дії

НАН України – Національна академія наук України

ДБН – Державні будівельні норми

## ВСТУП

На сьогодні процеси газотермічного нанесення покриттів широко використовуються у різних галузях промисловості, у будівництві, медицині тощо. Найбільш розповсюдженими є технології, в яких для створення покриттів використовуються попередньо приготовлені дисперсних матеріали.

Відомі переваги застосування порошків – стабільність процесу формування покриття, широка номенклатура матеріалів, які можуть бути застосовані.

Але поряд із безперечними перевагами існують певні недоліки застосування порошків. Основними із них є:

- ускладнення комплексу обладнання для реалізації технології за рахунок появи обладнання для підготовки порошків;
- високі вимоги до форми і фракційного складу вихідного матеріалу, що безпосередньо впливає на стабільність процесу формування і якість отриманих покриттів;
- висока вартість порошку порівняно із дротяними матеріалами.

Поява в останні роки нових видів суцільних матеріалів: порошкових дротів у металевій і неметалевій оболонках, прутків та ін., суттєво розширює діапазон функціональних можливостей покриттів із суцільних матеріалів і нівелює один із основних їх недоліків.

Процеси розпилення дроту, незважаючи на довгу історію їх застосування досі недостатньо вивчені. Останнім часом інтерес до таких технологій значно зростає, і застосування дешевих плазмоутворювальних газів для розпилення дроту є актуальним.

# 1 НАНЕСЕННЯ ГАЗОТЕРМІЧНИХ ПОКРИТТІВ ІЗ ДРОТУ ТА ПРУТКІВ. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

Одним із напрямків створення газотермічних покриттів є використання в якості вихідних матеріалів дротів та прутків.

Напилення покриттів із дротяних матеріалів здійснюють плазмовим, газополуменевим способами і електродуговим напиленням.

В якості вихідних матеріалів використовують як суцільні дроти із металів і сплавів (мідь, алюміній, залізо, титан, нікель, хром, молібден, вольфрам, різні сплави та ін.), так і порошкові різного складу [1].

Процес плазмового напилення дротяних матеріалів характеризується наступними особливостями:

- всі частинки, які утворюються при розпиленні дроту, являють собою краплі розплаву;
- точність і стабільність витрати матеріалу, який розпилюється;
- в схемі «дріт–анод» забезпечується висока продуктивність процесу напилення.

Завдяки перерахованим вище особливостям, покриття, що отримані плазмовим напиленням із дротів, мають щільну ламелярну структуру, низьку пористість, високу міцність і твердість, малий розкид показників мікротвердості, низький вміст оксидів в покритті [2, 3].

**Електродугові розпилювачі (металізатори).** Конструктивно електродуговий розпилювач складається з двох основних частин: розпилювальної головки і механізму подавання матеріалу [4].

У свою чергу, основними складовими частинами розпилювальної головки є сопловий апарат і система для напрямлення дроту з шинами для підведення струму і контактними притискувачами. Може використовуватися також захисний кожух.

Електродугові розпилювачі застосовуються для нанесення металевих покриттів шляхом розпилення дроту. Дуга плавить електроди, а розплавлений

метал вилучається і розпилюється із зони плавлення потоком газу. Електродидрооти подаються назустріч друг другу спеціальними механізмами подавання і у такий спосіб компенсується збільшення відстані між ними через плавлення. Швидкість подавання дроту визначається режимом горіння дуги.

Плавлення електродів здійснюється переважно завдяки енергії, яка виділяється у зоні активних плям дуги. Середньомасова температура рідкого металу знаходиться у межах:  $T_{\text{пл}} \leq T_c \leq T_{\text{кип}}$ , де  $T_{\text{пл}}$ ,  $T_{\text{кип}}$  – відповідно температура плавлення і температура кипіння металу електродів [5].

Якщо між середньою швидкістю переміщення фронту плавлення і швидкістю подавання електродів існує динамічна рівновага, то спостерігається стабільне горіння дуги без коротких замикань і зривів.

При такому режимі газовий потік забезпечує евакуацію і розпилення порції рідкого металу з електродів до їх зіткнення і короткого замикання. Далі розплавлений метал знову накопичується на торцях електродів, стовп дуги скорочується і цикл повторюється. Поряд з періодичним викиданням порцій металу з міжелектродного проміжку спостерігається також безперервне струменеве стікання перегрітого металу з поверхні електродів. Це результат зменшення сил поверхневого натягу при сильному перегріванні розплавленого металу і, як наслідок, нездатність утримання їм оплавленого шару на поверхні електродів.

Під дією струмини газу цей оплавлений шар змивається з поверхні електродів і розпилюється. Маса і розміри крапель значно менші, ніж маса порції металу, який вилучається з електродів за один цикл горіння дуги. Це є наслідком подрібнення металу під впливом газодинамічних сил газової струмини [6].

Ступінь диспергування багато в чому залежить від властивостей розплавленого металу частинки, а саме від ступеня його перегріву.

**Розпилювальні системи.** Класична схема електродугового розпилювача, яка розглядалася вище отримала в сучасній техніці подальший розвиток і зараз соплові системи серійних розпилювачів умовно поділяють на закриті (охоплюючі) і відкриті (рис. 1.1 а, б).

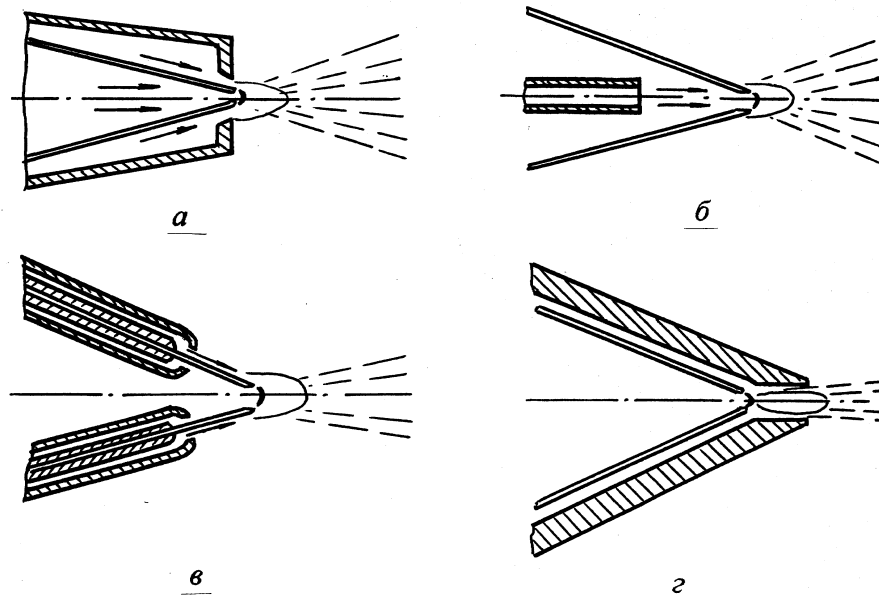


Рисунок 1.1 – Типи соплових систем електродугових розпилювачів: *а* – закрита система (діафрагма); *б* – відкрита (центральне сопло); *в* – диференціальні сопла; *г* – закрита система із формуючим соплом [7].

У закритих соплових системах електроди розміщені всередині сопла, а розпилювальний газ подається до сопла із замкненої порожнини, в якій також розміщені елементи підводу струму. Характерний розмір порожнини, як правило, значно перевищує діаметр газової магістралі, по якій надходить газ. В результаті газ, який надходить до замкненої порожнини, при обтіканні конструктивних елементів, що знаходяться всередині конструкції, знижує свої параметри гальмування.

Закриті системи серійних розпилювачів використовують діафрагму з гострою кромкою замість профільованого сопла. Використання діафрагми супроводжується виникненням на гострій кромці хвиль розрядження, взаємодія яких із фронтом течії призводить до початкового незначного звуження струмینی (на відстані порядку калібру отвору діафрагми) з наступним розширенням фронту струмینی. Це пояснює той факт, що у разі використання закритих соплових систем розмір плями напilenня більше, ніж при використанні відкритих систем.

Суттєвою особливістю закритих систем є необхідність використання діафрагм порівняно великих розмірів ((3...4) діаметра дроту) для розміщення

дроту всередині сопла. Це спричиняє необхідність підвищеної витрати газу (більше  $60 \text{ м}^3/\text{год.}$ ).

Водночас, при такому розміщенні дротів, спостерігається їх більш повне обтікання, а отже і мінімізація розміру застійних зон. У результаті, використання закритих соплових систем, як правило, зумовлює більш дрібний і однорідний гранулометричний склад частинок, які напилуються, ніж у разі відкритих систем.

Зменшення розміру частинок і пористості покриттів, які отримуються, роблять цю соплову систему конкурентноздатною за необхідності нанесення щільних покриттів на порівняно великі вироби.

Відкриті соплові системи складаються з одного або декількох газових сопел, розміщених між дротами. Канал сопла може бути профільованим або мати постійний переріз, а режим виходу газу - розрахунковим або нерозрахунковим. Надлишковий тиск розпилювального газу звичайно складає (400...500) кПа, тобто реалізується надзвуковий перепад тисків.

При оптимальному співвідношенні діаметрів електродів і сопел, відстаней між соплами від зрізу до точки схрещення, електроди обдуваються до- або близькозвуковими зонами струменів, а надзвукові зони беруть участь лише у прискоренні частинок, які напилуються. Такі соплові системи використовуються в апаратурі фірм Mogul (Австрія, США), Metco (США) і також забезпечують досить крупний розпил, тобто розмір частинок вищий, ніж у випадку закритих соплових систем. Концентрація металоповітряного потоку і міцність покриттів при цьому того ж порядку, що і при використанні ЭМ-17.

Перспективним напрямком зменшення розміру застійних зон є також застосування супутних газових потоків. Відомо, що збільшений розмір частинок, які напилуються, при використанні відкритих соплових систем пов'язаний із застійними зонами, які виникають при обтіканні електродів газовим потоком. У цих застійних зонах осьова складова швидкості потоку незначна і параметри потоку близькі до параметрів гальмування. У результаті евакуація розплавленого металу із застійних зон ускладнена, а це і призводить до збільшення гранулометричного складу частинок. Змінюючи кут між супутними потоками і



електродами, у деяких межах можна змінювати і розмір частинок, а при «конічному» обдуванні (супутний потік спрямований у точку схрещення електродів під кутом  $5^\circ$ ), досягати гранулометричного складу, близького до складу, який отримується в закритих соплових системах [7].

**Серійні конструкції електродугових розпилювачів. ЭМ-14М.** Призначений переважно для ручного нанесення антикорозійних покриттів як у монтажних, так і цехових умовах, але дає змогу також проводити роботи з метою відновлення спрацьованих поверхонь, декоративного оздоблення, нанесення жаростійких покриттів тощо [7].

Матеріал покриттів: алюміній, цинк, молібден, сталь, мідь й інші метали з температурою плавлення не більше ніж  $3000^\circ\text{C}$ . Матеріал має бути у вигляді дроту. Технічна характеристика апарата наведена у табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Технічні характеристики ЭМ-14М

№	Найменування показників	Норма
1.	Діаметр дроту, мм	1,5...20
2.	Швидкість подавання дроту, мм / хв, (м / год.)	(2...12), (120...720)
	Робочий тиск стиснутого повітря, МПа	0,5...0,6
3.	Найбільша витрата повітря, $\text{м}^3 / \text{хв.}$ , ( $\text{м}^3 / \text{год.}$ )	1,5, 90
4.	Робочий струм дуги, А (ПР=100%)	400
	Робоча напруга дуги, В	17...44
5.	Потужність дуги, кВт, до	16
6.	Продуктивність розпилення, кг/год:	
7.	Алюмінію	12,5
8.	Цинку	32
	Сталі	10
	Молібдену	8
	Габаритні розміри, мм, не більше	$230 \times 220 \times 133$
	Маса, кг, не більше	2,3
9.	Рівень шуму в зоні роботи оператора, дБ, не більше:	
	на відкритому повітрі	112
10.	у камері з шумопоглинанням	85

Складається ЭМ-14М з турбінного приводу з індукційним регулятором швидкості подавання (рис. 1.2), триступеневого редуктора, механізму подавання дроту, розпилювальної головки і повітряного крана.

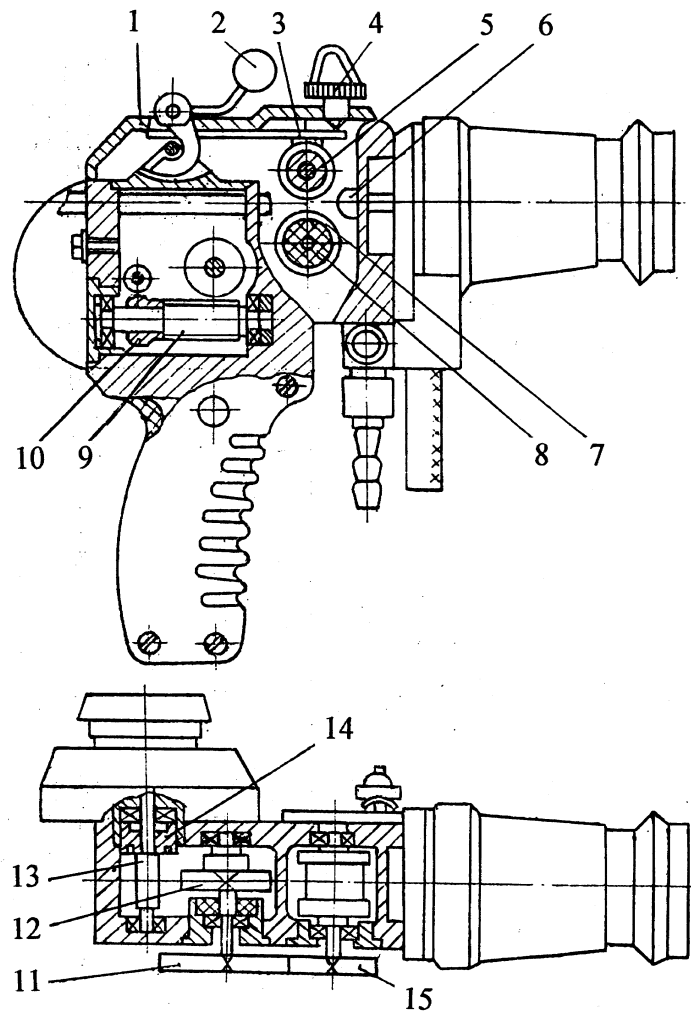


Рисунок 1.2 – Серійний електродуговий розпилювач типу ЭМ-14М: 1 – кришка; 2 – рукоятка; 3 – пружина; 4 – гвинт притискний; 5 – ролики притискні; 6 – болт спеціальний; 7 – ролики подавальні; 8 – втулки ізоляційні; 9, 13 – черв'яки; 10, 12 – колеса черв'ячні; 11, 15 – шестірні змінні; 14 – ущільнення

Турбінний привід забезпечує безперервне обертання подавальних роликів механізму подавання дроту і плавне регулювання їх числа обертів.

Рух від приводу до механізму подавання передається через триступеневий редуктор. Два ступеня редуктора - черв'ячні. Вони розміщені у герметичному корпусі. За допомогою третього ступеня здійснюється ступінчасте регулювання швидкості подавання дроту. Штатне положення шестерень відповідає подаванню дроту із швидкістю (5,5...12) м / хв. Для того щоб отримати швидкість подавання дроту (2...6,5) м/хв, шестірні слід поміняти місцями. Сам механізм подавання дроту складається з подавальних роликів 7, закріплених на ізоляційних втулках 8. На відкидній верхній кришці 1 закріплені притискні ролики 5. Під час роботи апарата кришка закривається і її положення фіксується за допомогою рукоятки 2.

Необхідне зусилля натискання роликів на дріт встановлюється за допомогою притискного гвинта 4, розміщеного на кришці.

ЭМ-14М типовий представник електродугових розпилювачів із сопловою системою закритого типу.

**ЭМ-15.** Апарат призначено для нанесення захисних, жаростійких, стійких проти спрацювання покриттів із алюмінію, цинку, сталі, міді, молібдену та ін. [7].

Апарат ЭМ-15 складається із захищеного від пилу розпилювача (рис. 1.3) і пульта керування. Розпилювач 2, у свою чергу, складається із розпилювальної головки 1, механізму подавання дроту 3 і приводу 4.

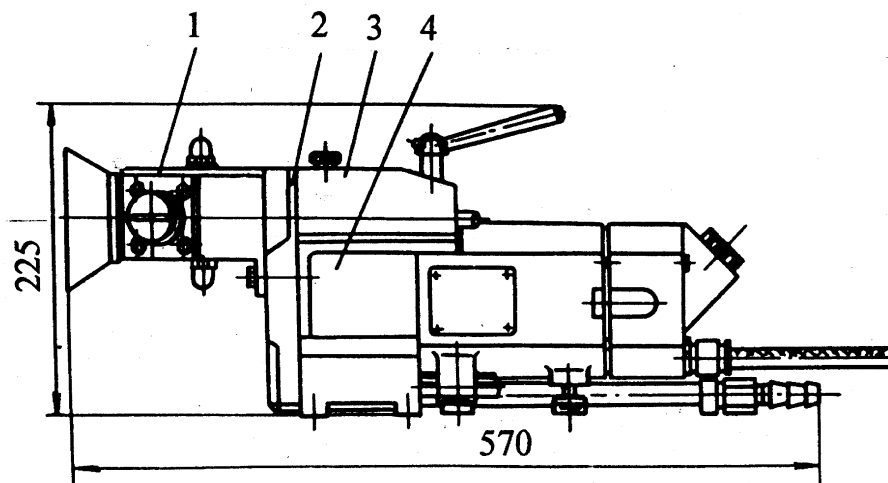


Рисунок 1.3 – Електродуговий розпилювач ЭМ-15: 1 – розпилювальна головка; 2 – розпилювач; 3 – механізм подавання дроту; 4 – привод

Для експлуатації ЭМ-15 необхідна його додаткова комплектація джерелом живлення, касетами для дроту і системами живлення повітрям і вентиляції.

Технічні характеристики ЭМ-15 наведені у табл. 1.2.

Електродуговий розпилювач ЭМ-15 - це апарат стаціонарного типу із закритою сопловою системою. Він може здійснювати роботи у будь-якому просторовому положенні і закріплюватися нерухомо або у спеціальному пристосуванні, яке буде його переміщувати відносно виробу.

Регулювання продуктивності - плавне, від пульта керування.

Таблиця 1.2 – Технічні характеристики ЭМ-15

№	Найменування показників	Норма
1.	Продуктивність, кг/год, за	
	Цинком	68
	Алюмінієм	25
	Сталлю	25
	Молібденом	11
2.	Діаметр дроту, мм	2...3
3.	Робочий тиск повітря, МПа	0,5...0,6
4.	Напруга постійного струму, В	17...40
5.	Найбільша потужність, кВт	32
6.	Габаритні розміри, мм:	
	Металізатора	570 × 170 × 225
	пульта керування	350 × 540 × 310
7.	Вага, кг	
	<i>Металізатора</i>	15
	пульта керування	31,5

Конструкції устаткування для підведення струму серійних електродугових розпилювачів не враховують можливу зміну фізико-механічних властивостей і діаметра дроту. Це призводить до нестабільного передавання струму дротам і, як наслідок, підвищеному розбризкуванню електродів при плавленні, зниження коефіцієнта використання матеріалу. Особливо це стосується порошкового дроту.

**ЭМ-12М.** Стационарний електродуговий розпилювач (рис. 1.4), призначений для нанесення антикорозійних покриттів із цинку і алюмінію [8].

Складається з механізму подавання дроту, розпилювальної головки закритого типу, електродвигуна, черв'ячного редуктора із змінними циліндричними шестернями для регулювання швидкості подавання дроту.

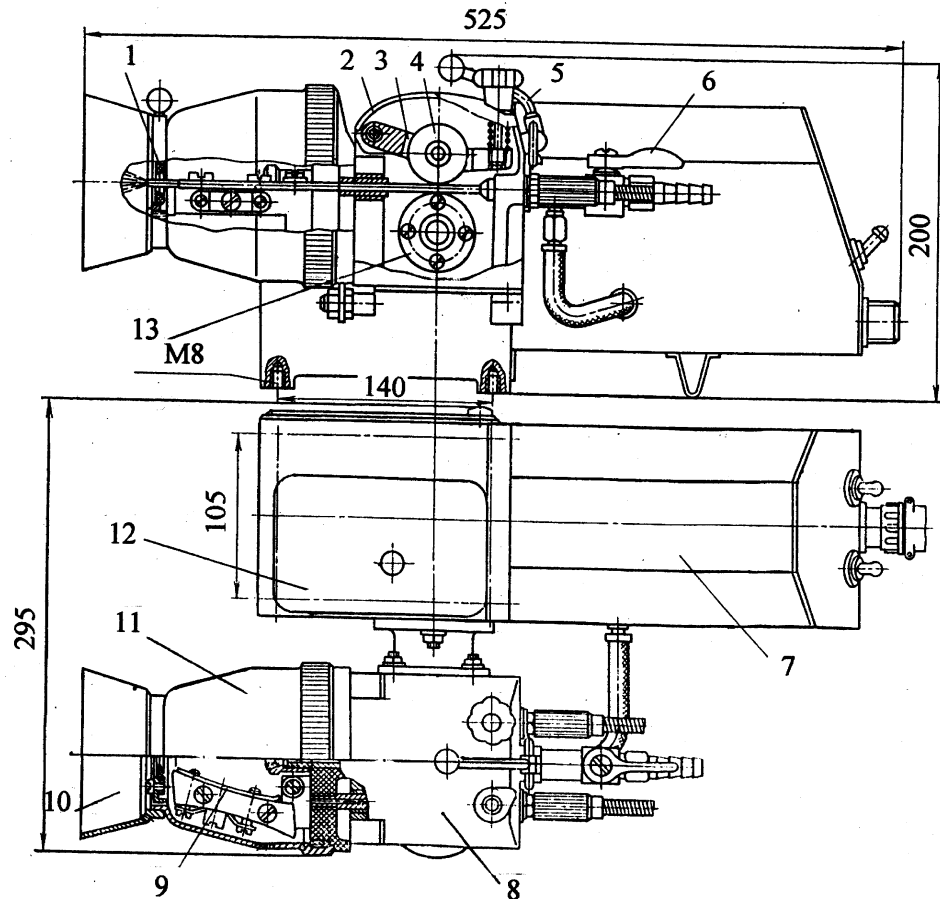


Рисунок 1.4 – Електродуговий розпилювач ЕМ-12М: 1 – повітряне сопло; 2 – кришка; 3 – сережка; 4 – притискний ролик; 5 – фіксатор кришки; 6 – кран для повітря; 7 – електродвигун; 8 – механізм подавання дроту; 9 – стумопідвід; 10 – бленда; 11 – розпилювальна головка; 12 – черв’ячний редуктор; 13 – подавальний ролик

Таблиця 1.3 – Технічні характеристики ЕМ-12М

№	Найменування параметра	Норма
1.	Номінальна продуктивність, кг/год: Алюміній (СВАМц, $\varnothing$ 2 мм, робоча напруга 23 В): на струмі дуги 500 А	14
	цинк (Ц1, $\varnothing$ 2,5 мм, робоча напруга 17 В): на струмі дуги 500 А	50
2.	Коефіцієнт використання матеріалу, не менше: за алюмінієм (робоча напруга 23 В)	0,75
	за цинком (робоча напруга 17 В)	0,75
3.	Діаметр дроту, мм	1,5...2,5
4.	Швидкість подавання дроту м / хв.	3,4...14,2
5.	Витрата газу (повітря), м <sup>3</sup> /год.	60...150
6.	Робочий тиск повітря, МПа	0,5...0,6
7.	Робочий струм дуги, А	50...400
8.	Робоча напруга дуги, В	17...35
9.	Споживна потужність, кВт	16
10.	Габаритні розміри, мм, не більше	525 × 295 × 200
11.	Маса, кг, не більше	23,4

Комплектація поставки ЭМ-12М не відрізняється від комплектації ЭМ-14М, тому для організації процесу нанесення покриття необхідний додатковий набір обладнання, згаданий вище.

Технічні дані розпилювача наведені в табл. 1.3.

**ЭМ-17.** Стационарний апарат ЭМ-17 призначений для нанесення покриттів із сталі з метою відновлення і зміцнення деталей і механізмів, а також для напилення антикорозійних покриттів із цинку і алюмінію в умовах автоматизованого виробництва [9].

Апарат складається із пульта керування і електродугового розпилювача з розпилювальною головкою і механізмом подавання дроту. Соплова система відкритого типу із захисною блендою (рис. 1.5).

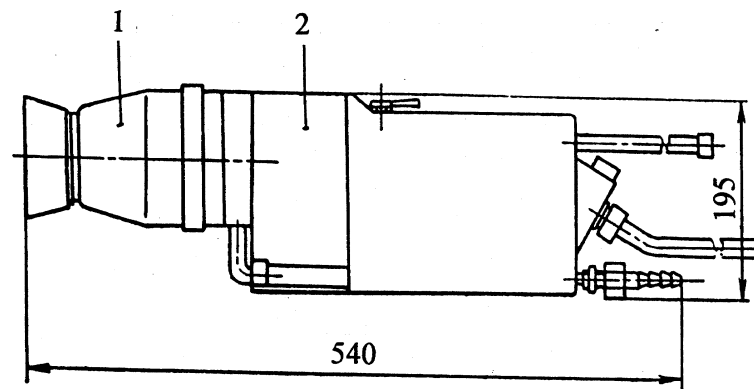


Рисунок 1. 5 – Електродуговий розпилювач ЭМ-17: 1 – розпилювальна головка; 2 – механізм подавання дроту

Комплектація апарата не відрізняється від апаратів ЭМ-14М, ЭМ-12М, ЭМ-15. Основні технічні характеристики наведені в табл. 1.4.

**Дослідні і дослідно-промислові електродугові розпилювачі.** Створення нових зразків електродугових розпилювачів відбувається шляхом модернізації серійних апаратів або розробки принципово нових схем, які задовольняють потреби конкретних технологій і враховують появу нових дротяних матеріалів для напилення.

Модернізації піддаються переважно соплові системи і метою модернізації є, як правило, зменшення кута розпилу матеріалу, підвищення швидкості частинок, які утворюють покриття, зміна розміру і концентрації частинок у струміні.

Наприклад, заміна стандартної розпилювальної головки металізатора ЭМ-12М на сопло з роздвоєним повітряним соплом (рис. 1.6) дає змогу підвищити концентрацію частинок у потоці, зменшити їх розмір і на (15...20) % збільшити швидкість [7].

Таблиця 1.4 – Технічні характеристики ЭМ-17

№	Найменування параметру	Норма
1.	Номінальна продуктивність, кг/год. сталь (Св-0,8, Ø 2 мм, робоча напруга 28 В) алюміній (СвАМц, Ø 2...2,5 мм, робоча напруга 24 В): цинк (Ц1, Ø 2,5 мм, робоча напруга 18 В):	18,8 12 40
2.	Коефіцієнт використання матеріалу, не менше при напиленні на плоскі вироби (тіла обертання Ø25 мм) за сталлю за алюмінієм за цинком	0,65 (0,5) 0,7 (0,35) 0,6 (0,35)
3.	Діаметр дроту, мм Сталь Цинк, алюміній	1,5...2 1,5...2,5
4.	Швидкість подавання дроту м / хв.	1,4...14
5.	Витрата повітря, м³/год	90...150
6.	Робочий тиск повітря, МПа	0,3...0,6
7.	Номінальний струм дуги, А	400
8.	Робоча напруга дуги, В	17...40
9.	Споживна потужність, кВт	16
10.	Габаритні розміри, мм, не більше Розпилювача блока керування	540 × 170 × 195 350 × 460 × 310
11.	Маса, кг, не більше:	39,5 (14,5)

Це досягається заміною, соплової системи закритого типу на відкриту соплову систему. Повітряний потік роздвоюється і обтискує дугу. Осі повітряних потоків розміщуються відносно осі дуги на відстані 3 мм, а відстань від зрізу повітряних сопел до дуги становить (40...45) мм.

Іншим прикладом доробки серійного електродугового розпилювача є заміна соплової системи відкритого типу в металізаторі ЭМ-17, на закриту соплову систему (рис. 7).

Основні геометричні розміри соплової камери оптимізувалися за кутом розпилу металу. Характерною особливістю соплової системи є заміна діафрагми на сопловий отвір циліндричної форми. Оптимальними вважаються кут звуження



сопла  $\alpha = 30^\circ$ , діаметр вихідного отвору  $d = 8$  мм і кут сходження дротів  $\gamma = (24...28)^\circ$ .

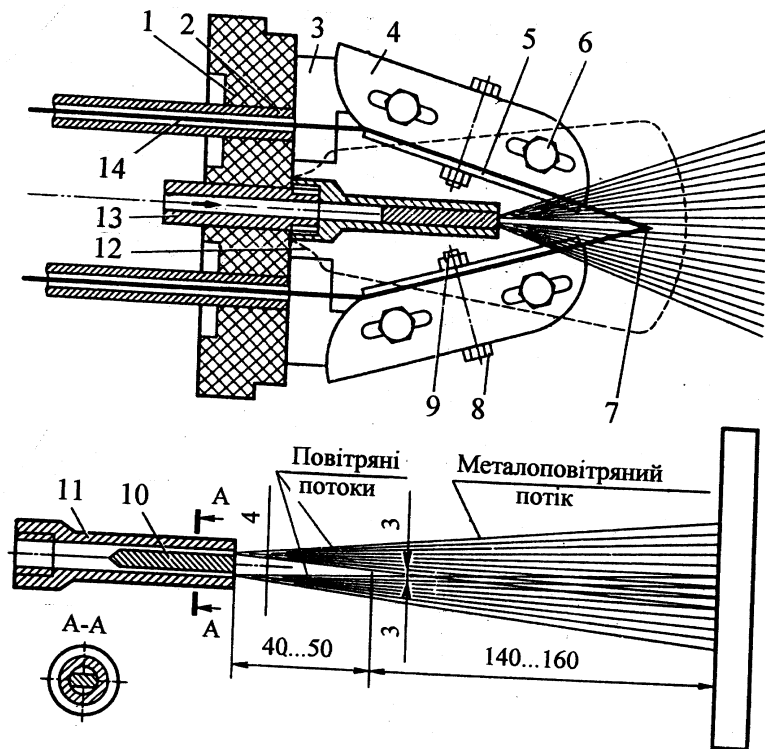


Рисунок 1.6 – Розпилювальна головка із двоканальним повітряним соплом: а – конструктивна схема; б – схема нанесення покриття; 1 – панель; 2 – напрямна трубка; 3 – шина; 4 – планка напрямна; 5 – пружина; 6, 8 – болт; 7 – дуга; 9 – гайка; 10 – перегородка повітряного сопла; 11 – повітряне сопло; 12 – екран захисний; 13 – повітряпровід; 14 – дріт для напилення

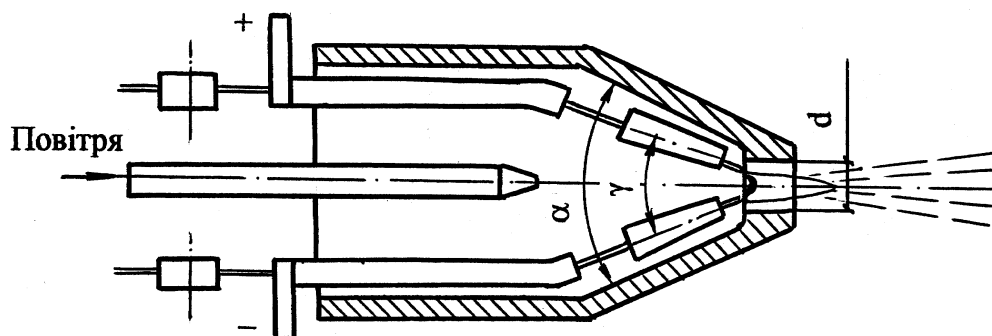


Рисунок 1.7 – Модернізована соплова система металізатора ЕМ-17

Всі серійні конструкції електродугових розпилювачів використовують поперечне обдування дуги потоком розпилювального газу. Але відомо, що у випадку орієнтації дуги вздовж газового потоку, між двома дротами-електродами, значно підвищується стабільність горіння дуги, а відповідно і стабільність процесу розпилення матеріалу. На рис. 1.8 показано принципову схему дослідно-

промислового зразка електродугового розпилювача із поздовжнім розміщенням дуги і використанням в якості розпилювального газу продуктів згоряння вуглеводневих газів у повітрі [10, 11].

Поздовжнє обтікання забезпечується подаванням одного з дротів вздовж осі потоку, а другого – під кутом до неї у тій же площині. Експериментально визначений оптимальний кут нахилу бокового дроту відносно до осевого, дорівнює  $(44...48)^\circ$ . Швидкості подавання дротів відрізняються для кожного з дротів і залежать від режимів напilenня. Центральний і боковий електроди працюють у різних умовах. Центральний електрод плавиться під дією тепла прикатодної (прианодної) ділянки дуги з підігріванням дроту на довжині вильоту за спрямувальним пристроєм гарячими продуктами згоряння.

Боковий електрод плавиться під дією тепла від дугової плазми і прианодного (прикатодного) падіння потенціалу. Боковий дріт сприймає більше тепла і швидкість його плавлення буде більше ніж центрального дроту.

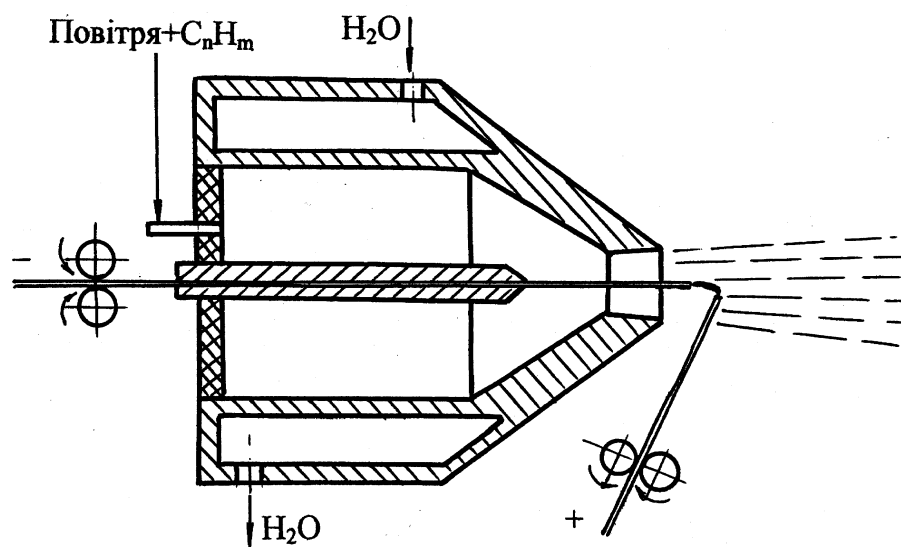


Рисунок 1.8 – Схема електродугового розпилювача із поздовжнім розміщенням дуги

Рівень струму задається швидкістю подавання центрального дроту. Швидкість подавання бокового дроту вибирається у такий спосіб, щоб його кінець розплавлявся на лінії продовження верхньої поверхні центрального дроту. У цьому разі забезпечується мінімальний рівень пульсації струму і напруги дуги,

рівномірне і стабільне плавлення дроту, мінімальний кут розкриття потоку частинок.

Відомо, що при використанні повітря, як розпилювального газу, проходить процес інтенсивного окислення розплавлених частинок. Основною причиною окислення матеріалу є його взаємодія з киснем у зоні електричної дуги.

З метою зниження вмісту кисню в зоні плавлення матеріалу можна використовувати як розпилювальний газ азот, аргон. Але широкого розповсюдження такий метод не знайшов через високу вартість газів, що при значних витратах газу призводить до подорожчання процесу нанесення покриття в цілому. У конструкції, яка розглядається, зниження впливу кисню на розплавлений метал досягається «зв'язуванням» кисню компонентами вуглеводневих газів. Суміш попередньо спалюється в пальнику і розпилення здійснюється гарячими продуктами згоряння.

Розпилення може здійснюватися як дозвуковими, так і надзвуковими газовими потоками. На рис. 1.9 показано один з варіантів конструктивного виконання розглянутої схеми електродугового нанесення покриттів.

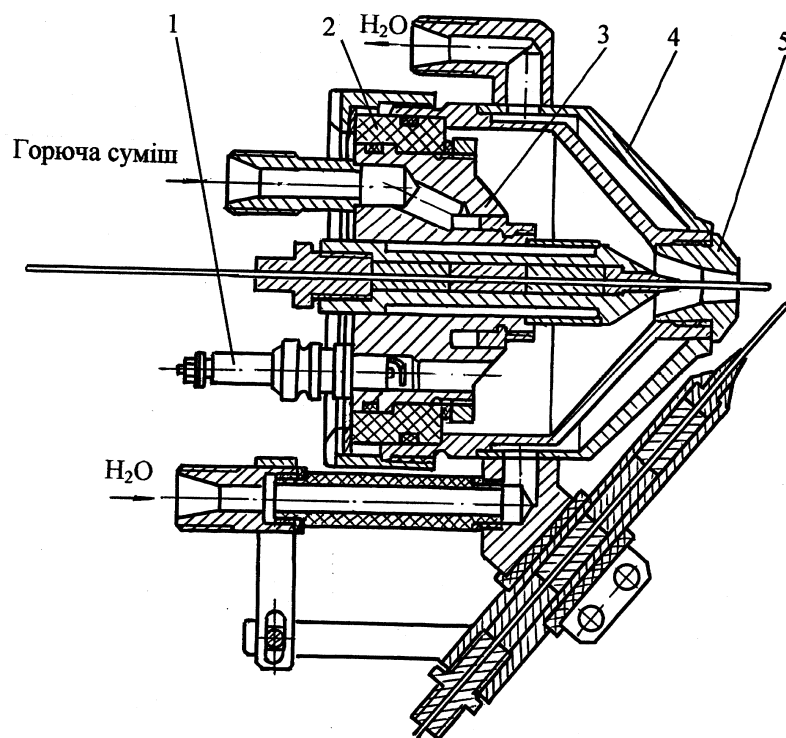


Рисунок 1.9 – Електродугового розпилювач із поздовжнім розміщенням дуги (розробка ІГ НАН України) [11]

**Газополуменеві розпилювачі.** Газополуменеві розпилювачі є апаратами, в яких горючий газ і окислювач при визначеному співвідношенні витрат змішуються. Горюча суміш, яка утворюється, через отвори соплового пристрою надходить до навколишнього середовища, де підпалюється і утворює факел. У факел вводиться матеріал, який напильюється, у вигляді порошку, дроту та ін. Матеріал нагрівається і прискорюється у факелі, утворюючи покриття при зустрічі з поверхнею основи [12, 13, 14].

Таким чином, до основних функцій розпилювача можна віднести:

- ефективне змішування горючого газу та окислювача для утворення однорідної горючої суміші;
- формування робочого тіла – факела розпилювача;
- забезпечення необхідної швидкості частинок при введенні їх у розпилювач і оптимальний розподіл частинок матеріалу у факелі пальника;

Традиційно більшість конструкцій газополуменевих розпилювачів має вигляд пістолетів, хоча є пальники, призначені для використання в автоматизованих виробництвах і оснащені не рукоятками, а пристосуваннями для закріплення на маніпуляторах. На корпусі і рукоятці можуть встановлюватися елементи регулювання і керування параметрами розпилювача.

Розвиток техніки для газополуменевого нанесення покриттів іде по шляху конструктивного оформлення елементів установок у вигляді окремих блоків, пов'язаних між собою комунікаціями. Блочна структура вдосконалюється в напрямку відокремлення елементів, які забезпечують виконання визначеної функції, тобто створення блочно-модульної структури газополуменевих установок для нанесення покриттів. Відокремлюються і оформлюються у вигляді окремих блоків системи подавання робочих газів і матеріалу, який напильюється. Пальникові пристрої вдосконалюються шляхом виключення елементів, які функціонально відносяться до систем забезпечення.

В інжекторних розпилювачах за рахунок використання енергії струмини одного з робочих газів здійснюється переміщення і стискування другого компонента горючої суміші. Такі конструкції частково позбавлені недоліків

розпилювачів рівного тиску, але з'являються інші, характерні для саме цієї принципової схеми: необхідність достатньо високого тиску інжектуючого газу, залежність коефіцієнта інжекції від температури суміші при виході з мундштука та його невеликий діапазон зміни.

**Серійні та дослідно-промислові конструкції газополумених розпилювачів.** Промисловістю випускається широка гама обладнання для газополуменового нанесення металевих, керамічних і пластмасових покриттів. Відповідно до призначення, установки комплектуються розпилювачами, конструкція яких визначається необхідною температурою газового полум'я (температурою плавлення матеріалу), потрібною продуктивністю процесу, формою представлення матеріалу, що напильється (порошок, дріт, прутки та ін.) [7].

Розпилювачі, які призначені для нанесення дрітчастих матеріалів, крім розпилюючої головки, мають у своєму складі механізм подавання дроту, регулятор подавання дроту, редуктор і турбінний привід.

Типовим прикладом конструктивного виконання газополумених розпилювачів для напилення дрітчастих матеріалів є серійний розпилювач типу УГМ-1. Його призначення – отримання протикорозійних покриттів з цинку і алюмінію. Використовується як у ручному варіанті процесу нанесення покриття, так і механізованому. На корпусі розпилювача для цього передбачені відповідні пристосування для закріплення його на маніпуляторі.

Конструктивно розпилювач (крім конструкції розпилювальної головки) ідентичний електродуговому розпилювачу типу ЭМ-14 М. Складається УГМ-1 із турбінного привода з індукційним регулятором подавання дроту, двоступінчастого черв'ячного редуктора із механізмом подавання дроту і розпилювальної головки (рис. 1.10).

Турбінний привід призначений для безперервного обертання подавального ролика механізму подавання дроту і плавного регулювання числа його обертів. Обертання валу турбіни забезпечується подаванням стиснутого повітря на

лопатки робочого колеса. Найбільша швидкість обертання колеса турбіни 35000 об/хв.

У роторі турбіни, яка обертається поряд з постійним багатополюсним магнітом, утворюються індукційні струми, що гальмують його обертання.

Величина індукційних струмів, а відповідно, і гальмуючого моменту буде залежати від взаємного положення магніту і ротора. Положення магніту відносно ротора регулюється маховиком.

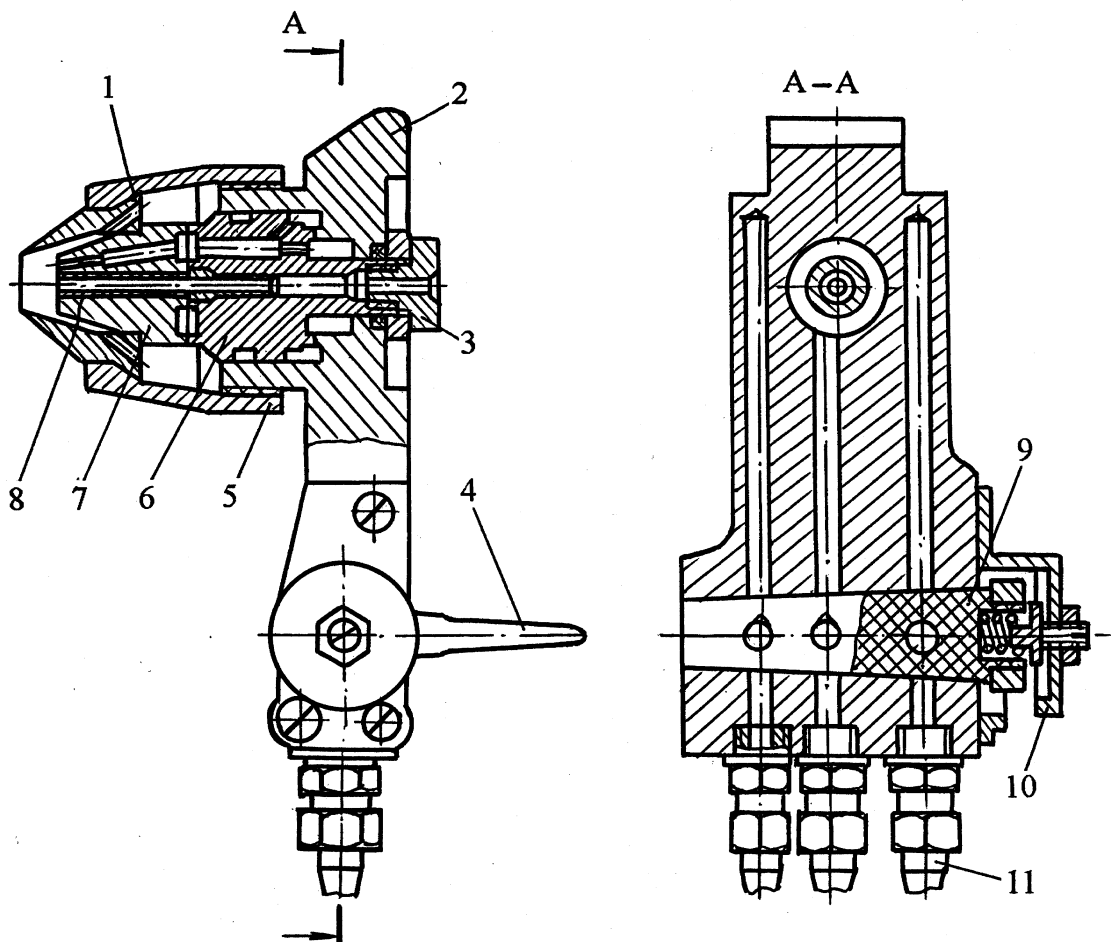


Рисунок 1.10 – Розпилювальна головка УГМ-1: 1 – сопло повітряне; 2 – стінка передня; 3 – болт спеціальний; 4 – ручка крана; 5 – ковпак повітряний; 6 – корпус газовий; 7 – сопло газове; 8 – сопло дротяне; 9 – корок крана; 10 – кришка; 11 – ніпель

Механізм подавання дроту складається із подавального ролика, який отримує обертання через змінну шестірню. Притискний ролик вільно обертається на осі, яка закріплена на відкидній кришці. Зусилля, яке створюється притискним роликом, здійснюється за допомогою пружинного пристрою, що розміщений на

кришці. Під час роботи кришка повинна бути закрита за допомогою рукоятки з фіксатором.

Розпилювальна головка встановлюється на передній стінці 2. Горючий газ і кисень по кільцевих каналах з передньої стінки 2 надходять до газового корпусу 6, в якому система отворів утворює інжекторний пристрій. Горюча суміш з інжекторного пристрою направляється у газове сопло 7, а потім – у камеру згоряння. Стиснуте повітря через отвір у передній стінці надходить під повітряний ковпак 5, а потім через отвори повітряного сопла 1 і конічний кільцевий зазор – у камеру згоряння. При зміні діаметра дроту, який розпилюється, замінюється дротяне сопло 8, спеціальний болт 3, повітряне сопло 1, газове сопло 7 і подавальний ролик.

Корковий кран призначений для подавання робочої дози газів у розпилювальну головку, а також для припинення процесу нанесення покриття.

Розглянутий газополуменевий розпилювач дроту (а також їх аналоги фірм “Метко”, “СНМІ”, “МТС”, “Кастолін” та ін.), незважаючи на конструктивну відмінність, відносяться до розпилювачів, які забезпечують отримання покриттів приблизно однакових якісних показників [15].

**Плазмовий спосіб напилення.** Плазмовий спосіб може реалізовуватися за схемами «дріт–анод» і «нейтральний дріт» [16].

При використанні в якості присадкового матеріалу дроту можливе застосування двох схем підключення плазмотрона: при струмоведучому соплі (рис. 1.11, а) або при струмоведучому дроті (рис. 1.11, б). Схема дротяного розпилення із струмоведучим дротом - анодом була розроблена в кінці 50-х років минулого століття. Тоді вдалося отримати небачену продуктивність – 15 кг / год. вольфраму при потужності 12 кВт. При плазмовому напиленні поряд із дротом використовують і прутки. Таким чином, щоб теплота ефективно відводилася мідної оболонкою і видалялася охолоджувальною водою. Випускаються в даний час промисловістю Установки для плазмового напилення, які зараз експлуатуються, комплектують плазмотронами із споживаною потужністю (25...30) кВт при силі струму (350...400) А. З іншого боку, для нанесення



покривтів на малі деталі (поверхні), наприклад, коронки в стоматології, бандажні полки лопаток ГТД в авіабудуванні були розроблені мікроплазмові пальники, що працюють на токах (15...20) А при потужності до 2 кВт.

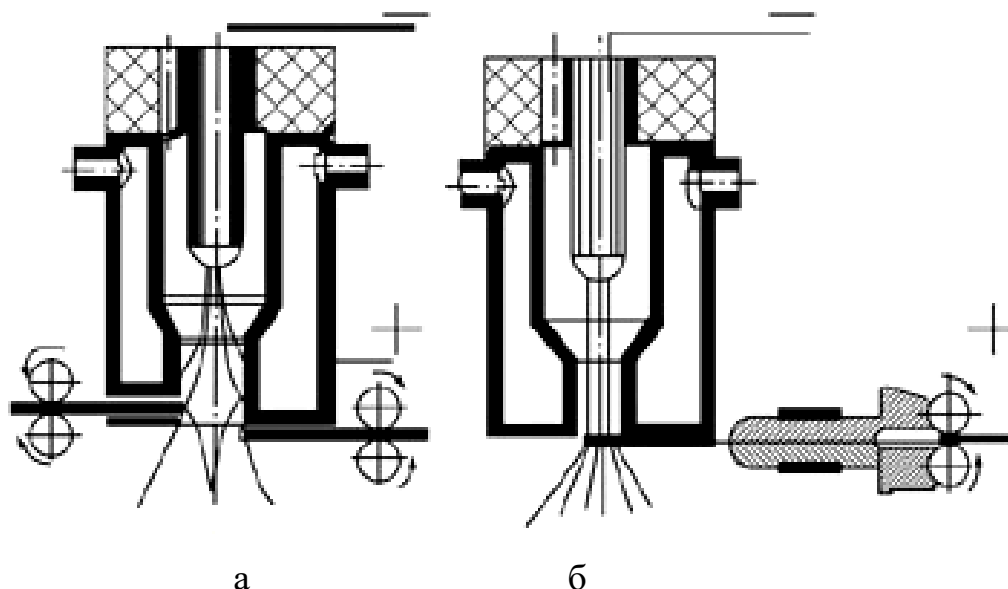


Рисунок 1.11 – Схеми плазмових розпилювачів: *а* – пруткового і «нейтральний дріт»; *б* – дрітяного («дріт-анод»).

На території України на сьогодні експлуатується три типи серійних установок плазмового нанесення покриттів загальнопромислового призначення: УПУ, УМП і «Київ-7» різних модифікацій [7].

Зі згаданих серійних установок тільки установки УПУ мають модифікацію, яка придатна для напilenня покриттів із дрітяних матеріалів [17].

Установки типу УПУ-3Д комплектуються двома типами плазмотронів: ПП-25 для нанесення порошкових матеріалів (рис. 1.12) і ПМ-25 для нанесення дрітяних матеріалів.

ПП-25 (ПМ-25) являє собою конструкцію, яка складається з двох ізольованих один від одного вузлів – катодного 2 і анодного 5, вмонтованих у рукоятку з ізоляційного матеріалу 6.

У корпусі анодного вузла встановлено змінне сопло 1, яке охолоджується водою, а також закріплено струмопідвід 9, до якого підключений позитивна клема джерела живлення і по якому подається вода для охолодження.

Сопло-анод герметизується двома прокладками: гумовою і свинцевою (свинцеву встановлено на вихідному кінці). Утримується сопло в корпусі фланцем з чотирма гвинтами. Сопло має спеціальний отвір *10* для закріплення в ньому штуцера для подавання порошку.

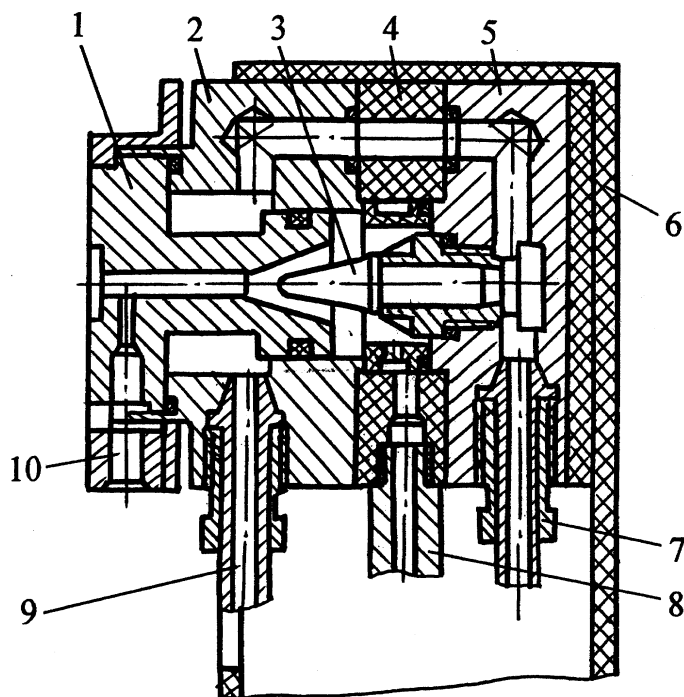


Рисунок 1.12 – Плазмовий розпилювач ПП-25: 1 – анод-сопло; 2 – корпус анодного вузла; 3 – катод; 4 – ізолятор; 5 – корпус катодного вузла; 6 – рукоятка; 7 – штуцер для подавання води охолодження; 8 – штуцер для подавання газу; 9 – штуцер для відведення води; 10 – отвір для штуцера, по якому подається порошок або дріт

У комплект плазмотрона входять три конструкції сопел для розширення технологічних можливостей апарата.

Катод 3 (рис. 1.12) виконано з лантанованого вольфраму. Він змінний і закріплюється в катодному корпусі за допомогою різьби. На корпусі катода також розміщений струмопідвід 7 для відведення охолоджуючої води, і до якого під'єднана негативна клема джерела живлення. Ізоляція між двома електродними корпусами досягається за допомогою капролонової пластини 4, в якій зроблені канали для проходження води охолодження і плазмоутворювального газу. Для захисту капролонової пластини від випромінювання дуги в дуговій камері встановлена втулка з асбестоцементу або алюмонітриду АБН-1.

Ізолятор і електродні корпуси скріплюються між собою чотирма стяжними гвинтами.

Заміна сопла і катода здійснюється без повного розбирання плазмотрона за допомогою спеціального інструмента після зняття фланця сопла.

Для захисту рук оператора від теплового впливу плазмове струменя передбачений щиток з нержавіючої сталі, закріплений на рукоятці.

Плазмотрон ПП-25 може використовуватися з установками УПУ всіх модифікацій, починаючи від УПУ-1 із джерелом живлення ІПН-160/600 або з любым іншим, який має крутоспадну зовнішню характеристику, напругу холостого ходу не нижче ніж 120 В і допустиме струмове навантаження не нижче ніж 500 А [18].

Вольт-амперні характеристики ПП-25  $U$  - подібний характер ВАХ пояснюється стабілізуючою дією стінки сопла на струмах вище ніж 500 А.

Узагальнена ВАХ має вигляд:

$$U = G^{0,25} (0,5 \cdot 10^{-4} I^2 - 0,0455 I + 45).$$

Плазмений розпилювач дроту ПП-25 конструктивно відрізняється від ПМ-25 лише розмірами дугового каналу і наявністю вузла подавання порошку.

В цілому розпилювальна головка для дроту складається із плазмотрона ПМ-25 і механізму подавання дроту, які з'єднані між собою гнучким боуденом (довжина 1400 мм), що забезпечує необхідні маніпуляції плазмотроном при ручному і механізованому способах напилення [7].

Механізм подавання дроту складається із реверсивного електродвигуна постійного струму Д-25Л, комбінованого редуктора із подавальними роликками, котушки внутрішнього укладання дроту і кронштейна кріплення котушки. Всі елементи механізму змонтовані на гетинаксовій основі.

При вмиканні електродвигуна подавальні роликки переміщують дріт по боудену із швидкістю, яка регулюється в інтервалі (75...450) м / год. швидкістю обертання електродвигуна і в межах 1 : 2,5 за допомогою перемикача швидкості

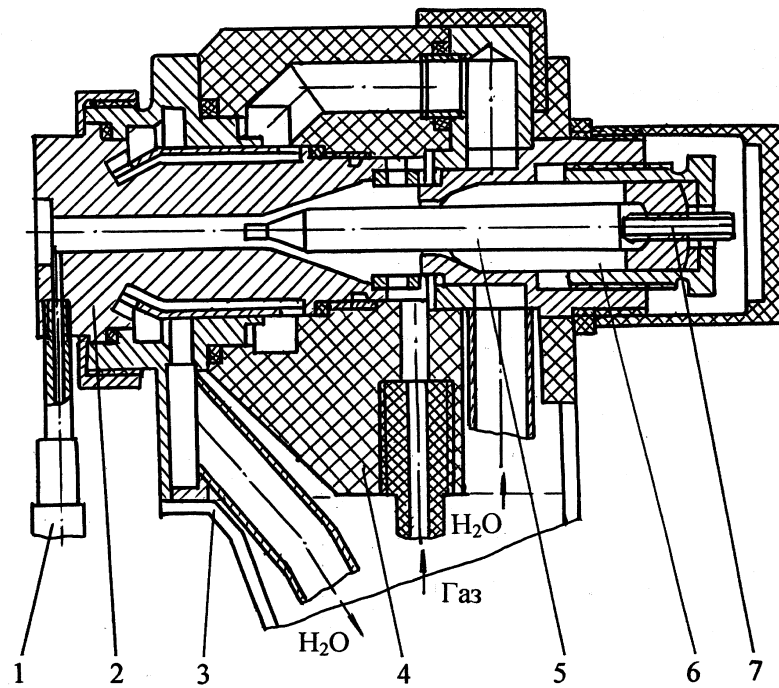
на редукторі. У зв'язку із залежністю швидкості подавання дроту від опору його проходження по боудену, маніпуляції переміщення плазмотрона ПМ-25 при нанесенні покриття вибираються із мінімальним перегинанням боудена.

Як плазмоутворювальний газ застосовується чистий аргон, бо тепловміст аргонної плазми достатній для розплавлення любых металів. Використання інших газів і сумішей небажане через погіршення стійкості сопел, які мають відносно малий діаметр (3 мм) і значні струмові навантаження (до 500 А). Технічні характеристики ПП-25 і ПМ-25 наведені у табл. 1.5.

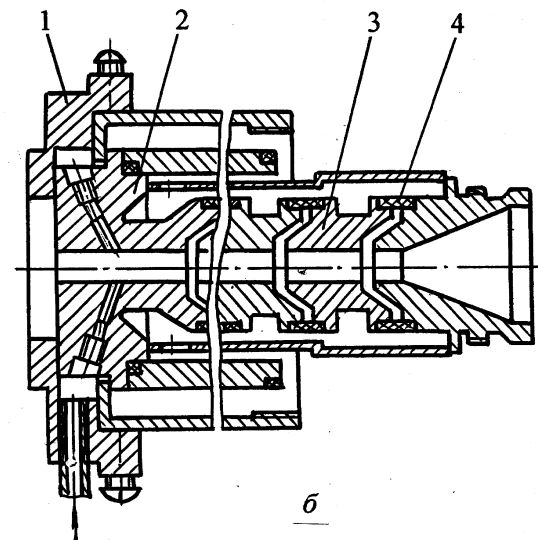
Таблиця 1.5 – Технічні характеристики плазмотронів ПП-25 та ПМ-25 [7]

№	Параметри	ПП-25	ПМ-25 «дріт нейтральний»
1.	Максимальний струм, А	400	500
2.	Плазмоутворювальний газ	(при роботі на азоті) аргон, гелій, азот і суміші аргону або азоту з воднем	аргон
3.	Витрата газу, л/хв	15...100	10...80
4.	Діаметр дроту, мм	-	0,8; 1; 1,2
5.	Дисперсність порошку, мкм	10...200	-
6.	Швидкість подавання, м/год	-	75...180
7.	Продуктивність за вольфрамом	-	4...6
8.	Продуктивність за $Al_2O_3$ , кг/год	1...2	-
9.	Витрата води на охолодження, л/хв	8...10	8...10
10.	Температура води на виході, °С	< 50	< 50
11.	Габаритні розміри, мм		
	довжина	240	240
	ширина	46	46
	висота	73	73
12.	Маса (без шлангів), кг	0,5	0,5
13.	Довжина боудена, мм	-	1400
14.	ПВ %	60	60

Установки УПУ-8М комплектуються більш сучасними конструкціями плазмових розпилювачів (рис. 1.13).



*a*



*б*

Газ+порошок

Рисунок 1.13 – Плазмовий розпилювач до установки УПУ-8М: *a* – базовий варіант розпилювача: 1 – штуцер для подавання матеріалу, що напилюється; 2 – анод; 3 – рукоятка; 4 – ізолятор; 5 – катод; 6 – цанга; 7 – гвинт регулювання; *б* – варіант з МЕВ; 1 – колектор; 2 – анод; 3 – МЕВ; 4 – ізолятор-ущільнювач [7]

Базовим варіантом є плазмотрон з гладким каналом і термоємисійним електродом (катодом) цангового типу (рис. 1.13, *a*).

У міру ерозійного спрацьовування катода 5 за допомогою спеціального гвинта 7, при розтискненій цанзі 6, можна переміщувати вольфрамовий стрижень

і підтримувати, тим самим, постійне значення проміжку між електродами. Охолодження катодного і анодного вузлів послідовне, через канали в корпусі плазмотрона. Через водопідвідні елементи конструкції розпилювача здійснюється і підведення струму до електродів плазмотрона.

Анод-сопло 2 ущільнюється за допомогою гумових кільцевих прокладок і може мати систему каналів на вихідному кінці (рис. 1.13, б), через які подається порошок або дріт.

Крім розглянутих варіантів компонування плазмотрона, передбачений варіант з міжелектродними вставками (рис. 1.13, б). При цьому зберігається форма входу в дуговий канал і система подавання матеріалу. Дуговий канал має вигляд набору мідних шайб 3, які з'єднані між собою через ізоляційні прокладки 4. Схема охолодження при цьому не змінюється: вода після охолодження катодного вузла послідовно омиває весь набір МЕВ і вихідне сопло-анод 2. Така схема забезпечує ресурс електродів лише при використанні дистильованої води, бо водопровідна вода сприяє електрохімічній корозії зовнішньої поверхні міжелектродних вставок.

Технічні характеристики розпилювача УПУ-8М наведені у табл. 1.6.

Таблиця 1.6 – Технічні характеристики розпилювача до установки УПУ-8М

№	Параметри	Порошок	Дріт
1.	Робочий струм, А	100...700	100 ... 700
2.	Потужність плазмотрона, кВт	< 40	< 40
3.	Робоча напруга, В	25...100	25...100
4.	Плазмоутворюючий газ	аргон, азот їх суміші з воднем	аргон
5.	Витрата плазмоутворювального газу, м <sup>3</sup> /год	1,8...2,9	1,8... 2,9
6.	Витрата транспортуючого газу, м <sup>3</sup> /год	0,1... 0,9	-
7.	Діаметр дроту, мм	-	0,8...1,2
8.	Швидкість подавання дроту, м/год	-	18...1300
9.	Продуктивність за Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , кг/год	5	-
10.	Продуктивність за металевим матеріалом, кг/год	20	-
11.	Витрата охолодж. води, м <sup>3</sup> /год	< 1,44	< 1,44

Основні енергетичні характеристики базового плазмотрона до установок УПУ-8М не відрізняються від характеристик плазмотрона ПМ-25 [19].

Розглянуті вище установки плазмового нанесення покриттів із дротів орієнтовані на використання суцільних дротів. Розширення області застосування газотермічних покриттів можливе через застосування в якості вихідного матеріалу порошкових дротів і прутків, що містять тугоплавкі сполуки [20, 21, 22, 23, 24]. З точки зору нанесення покриттів використання порошкових дротів дозволяє досягти, порівняно з порошками, цілого ряду переваг: більш високої енергоефективності процесу (питомі витрати енергії при нанесенні покриттів із дротів нижче у (8...15) разів); формування покриттів із розплавлених частинок (плавлення дроту відбувається в точці його подавання у високотемпературну зону плазмового струменя, тоді як прискорення, з метою отримання частинками необхідної кінетичної енергії під дією високотемпературного газового струменя, піддаються вже краплі розплаву); більш високою стабільністю процесу та ін. Подальше підвищення ефективності цієї технології може бути досягнуте шляхом реалізації процесу ПДН дроту-анода, де плавлення дроту відбувається не тільки через його нагрівання плазмовим струменем, але й за рахунок тепла, що виділяється на аноді при проходженні електричного струму [25-30].

Прикладом сучасних установок такого типу для нанесення покриттів із дротів є установка плазмово-дугового напилення покриттів PLAZER 30-PL-W із струмоведучим дротом. Ця установка призначена для нанесення зносостійких, корозієстійких та спеціальних покриттів, відновлення спрацьованих деталей машин шляхом напилення електропровідних матеріалів, виготовлених у вигляді порошкових і компактних дротів діаметром (1,6...2,0) мм [31].

У даній установці процес ПДН реалізується в аргонівій дузі з інтенсивним супутнім повітряним обдуванням. Дуга горить між вольфрамовим катодом, що обдувається невеликою кількістю аргону, і плавким струмоведучим дротом, що подається за зрізом подвійного сопла плазмотрона [26]. Особливості процесу створення ПДН-покриттів полягають в наступному:

- плавлення матеріалу дротів відбувається в захисній атмосфері аргону при швидкості витікання плазмового струменя, що наближається до швидкості звуку;



- дроблення розплавленого матеріалу і прискорення дисперсних частинок здійснюються аргонною плазмою;

- у плазмотроні реалізується турбулентний режим течії плазми, а протікання газу відбувається переважно в осьовому напрямку;

- за допомогою надзвукового потоку повітря, що витікає з кільцевого зазору між соплами плазмотрона, забезпечується стиснення і прискорення плазмового струменя, причому зростають температура і швидкість частинок.

Ці особливості забезпечують: мінімізацію втрат при випаровуванні матеріалу дротів; його мінімальне насичення киснем; отримання оптимального фракційного складу розплавлених частинок порошкового дроту; досягнення частинками матеріалу максимально високій швидкості при зіткненні з основою; отримання найбільш високої об'ємної концентрації частинок та мінімальний (кілька градусів) кут розкриття потоку двофазного потоку (рис. 1.14).

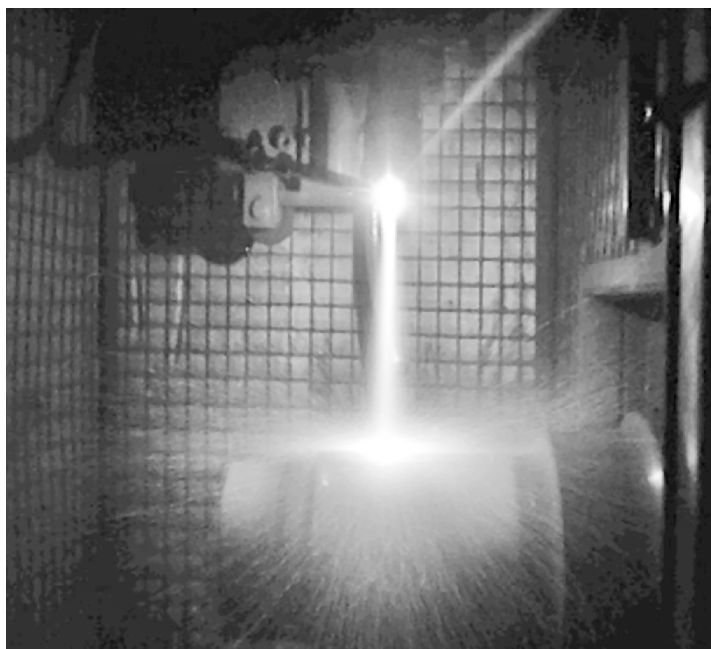


Рисунок 1.14 – Процес створення зносостійких ПДН-покрив за допомогою установки «PLAZER 30PL-W»

До теперішнього часу напилення із застосуванням дротяних матеріалів проводили за допомогою плазмотронів досить великої потужності. При нанесенні покривів на деталі з товщиною стінок менше 1 мм виникає небезпека місцевого перегріву і викривлення виробу, а у разі необхідності напилення на вузькі ребра або доріжки спостерігається велика втрата напилюваного матеріалу.

За останні роки в ІЕЗ ім. Е. О. Патона створено новий варіант плазмового напилення – мікроплазменне напилення [32-37]. Установка МПН-004 містить джерело живлення з панеллю керування, плазмотрон і спеціальний пристрій для подавання порошку. Конструкція плазмотрона захищена патентом України [35]. Параметри його роботи забезпечують формування ламінарної плазмового струменя, що обумовлює ряд особливостей процесу мікроплазмового напилення: зменшення розміру плями напилення до (1... 5) мм (кут розкриття ламінарної плазмового струменя становить всього (2...6) замість (10...18)° для турбулентних плазмових струменів, а діаметр сопла (0,8...2) мм; можливість нанесення покриттів на вироби малих розмірів і з тонкими стінками без локального перегріву і викривлення (низька теплова потужність мікроплазменного струменя дозволяє знизити нагрів основи); низький рівень звуку ламінарної плазмового струменя (30 ... 50 дБ).

Характеристика установки МПН-004 для мікроплазмового напилення покриттів

Робочий газ .....	аргон
Захисний газ . ....	аргон
Потужність, кВт .....	≤ 3,0
Сила струму, А .....	(10...50)
Напруга, В .....	≤ 60
Витрата плазмоутворювального газу, л / год. ....	(10...250)
Витрата захисного газу, л / год.....	(60...400)
Габарити, мм .....	390×225×205
Маса, кг .....	14

В ІЕЗ ім. Е. О. Патона розроблений мікроплазмовий спосіб нанесення покриттів із використанням дротяних матеріалів [36, 37]. Він дозволяє реалізувати переваги дротяного способу газотермічного напилення в умовах мікроплазмового струменя.

З цією метою створена спеціалізована приставка до плазмотрону, що входить до складу установки МПН-004 для мікроплазмового напилення (рис. 1.15).

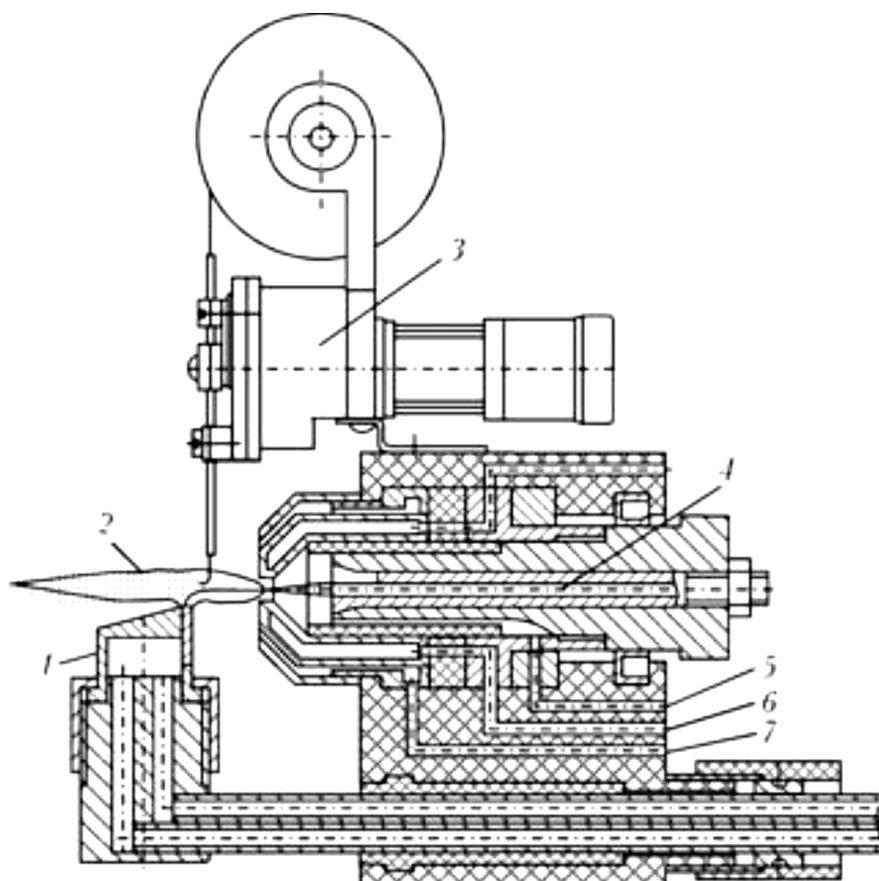


Рисунок 1.15 – Схема плазмотрона для мікроплазмового напilenня дротяними матеріалами: 1- анод; 2 – плазмовий струмінь; 3 – механізм подавання дроту; 4 – катод; 5 - 7 – канал подавання, відповідно, плазмоутворювального газу, води та захисного газу

Приставка представляє собою компактний механізм подавання дроту у міжелектродну ділянку плазмового струменя. Подавальний механізм має можливість регулювання швидкості подачі дроту шляхом зміни кількості оборотів на валу електродвигуна.

Приставка має малу масу і кріпиться на місце порошкового дозатора. Конструктивною особливістю плазмотрона є виносний анод.

Для стабілізації плазмового струменя і захисту анода здійснюється подавання захисного газу – аргону. Наявність захисної атмосфери у зоні плавлення дроту дозволяє знизити ступінь окислення напильованого матеріалу, що особливо важливо при напilenні активних металів таких, як вольфрам, молібден, титан, цинк, латунь (табл. 1.7).

Таблиця 1.7 – Параметри мікроплазмового дротяного напилення залежно від матеріалу дроту (експериментальні дані)

Параметр	Матеріал дроту						
	сталь	Cu	Ni–Cr	латунь	Ti	Mo	W
Діаметр дроту, мм	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2
Швидкість подавання дроту, м / хв.	5,0	6,0	4,5	5,5	5,5	8,0	9,0
Напруга, В	30	32	32	25	25	32	32
Струм, А	45	48	48	20	30	48	50
Питома потужність, Вт / л.	13,5	17,1	15,4	3,3	5	14	13,3
Витрата плазмоутворювального газу, л / год.	100	90	100	150	150	110	120
Витрата захисного газу, л / год	180	200	200	400	350	300	300
Витрата напилюваного матеріалу, г / хв.	2,75	3,7	3,3	2,7	1,6	2,6	2,2

## ВИСНОВКИ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

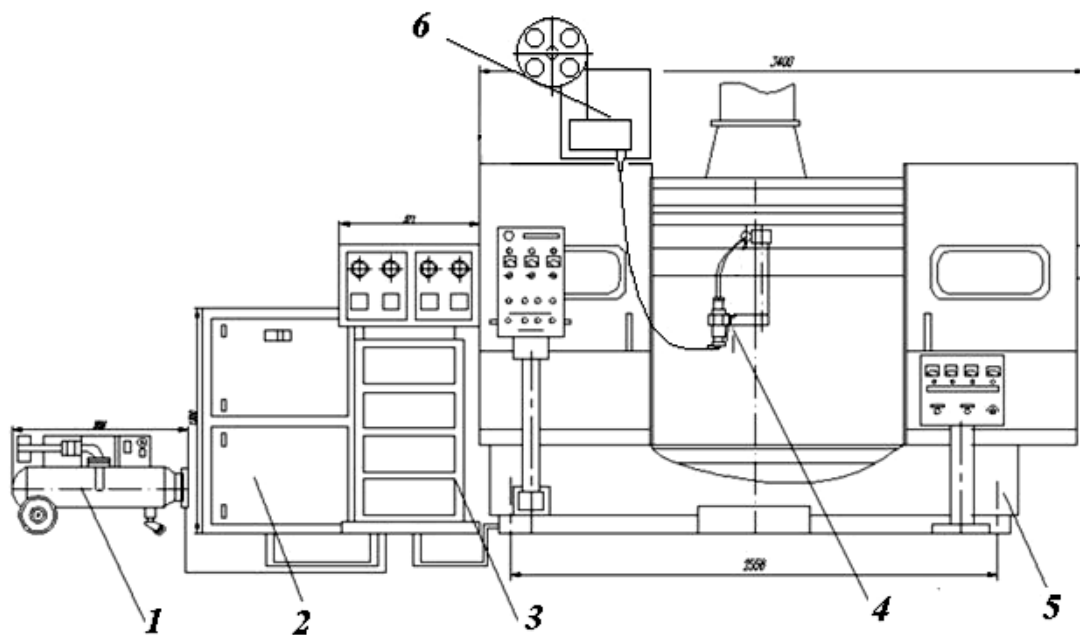
1. У більшості випадків економічність процесів створення покриттів із використанням дротів вища порівняно із використанням дисперсного матеріалу через меншу вартість вихідного матеріалу.
2. Основним недоліком процесів розпилення дроту є порівняно тривалий час перебування вихідного матеріалу в зоні теплового та динамічного впливу робочих газів, що потребує застосування захисних інертних або нейтральних середовищ.
3. Плазмові методи розпилення дроту вигідно відрізняються від альтернативних методів (електродугового та газополуменевого) більш широкими технологічними можливостями.
4. Сучасні установки плазмового розпилення дроту в основному орієнтовані на використання електропровідного матеріалу і побудовані за схемою «дріт-анод».

5. Перспективним напрямком розвитку методів розпилення дроту для формування покриттів є застосування замість інертних газів складних газових систем і, зокрема, систем N-O-C-H.
6. Задачами дослідження є:
  - встановлення принципової можливості застосування відомих схем генераторів плазми на сумішах повітря із вуглеводневими газами для розпилення дротів;
  - дослідження енергетичних характеристик таких плазмотронів;
  - встановлення оптимальних значень характерних розмірів дугового каналу, які забезпечують екстремальні характеристики струменя плазми;
  - дослідження структури плазмового струменя із оптимальними швидкісними та температурними характеристиками.

## 2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПЛАЗМОВОГО НАПИЛЕННЯ ДРОТЯНИХ МАТЕРІАЛІВ

Експериментальна установка (рис. 2.1), на якій проводились дослідження складається із:

- джерела живлення типу АПР – 402 (модернізованого);
- станції газоприготування;
- генератора плазми, який працює на сумішах повітря із вуглеводневим газом (пропан-бутаном);
- системи комунікацій;
- системи живлення розпилювача дротяними матеріалами;
- звукозахисного боксу;
- аспіраційної системи.



1 – компресор; 2 – джерело електроживлення; 3 – блок керування; 4 – розпилювач; 5 – напівавтомат; 6 – порошкові дозатори-живильники

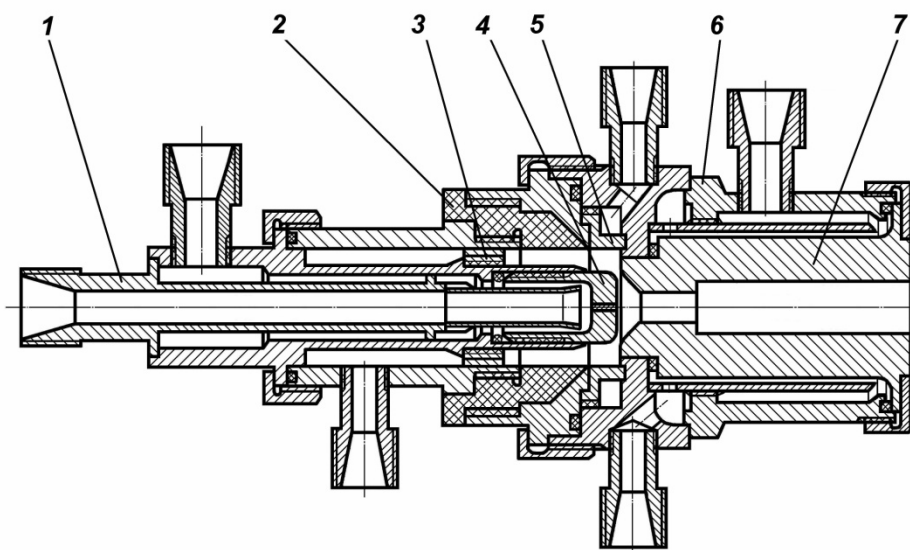
Рисунок 2.1 – Загальний вигляд установки

## 2.1 Експериментальний плазмовий розпилювач

Плазмотрон, за класифікацією, належить до плазмотронів лінійної схеми з автогазодинамічною стабілізацією довжини дуги і вихровою стабілізацією дуги на осі каналу. Це двоелектродний плазмовий розпилювач, виконаний у підвісному варіанті з незалежною схемою прямого охолодження електродних вузлів (рис. 2.2).

За дією на технологічний об'єкт плазмовий розпилювач належить до плазмотронів опосередкованої дії.

За кількістю електричних дуг у каналі досліджуваний розпилювач відноситься до однодугових плазмотронів.



1 – катодний вузол; 2 – ізолятор; 3 – стакан; 4 – накидна гайка; 5 – анодний вузол; 6 – вихідний електрод (анод); 7 – термохімічний електрод (катод); 8 – завихрювач газу

Рисунок 2.2 – Плазмотрон із автогазодинамічною стабілізацією довжини дуги

Електрод-анод має вигляд мідного стакана, який посередньо охолоджується проточною водою. Катод – термохімічний, типу ОБ 1542А. Охолодження катодного та анодного вузлів водяне, незалежне.

Плазмоутворювальний газ подається в дугову камеру через завихрювач шнекового типу, який додає потоку газу тангенціальну складову швидкості і сприяє формуванню вихрової течії речовини. Завихрювач є змінною деталлю і може мати довільну кількість і переріз каналів для проходження газу.

#### У конструкції передбачений

Газоповітряна суміш, яка застосовується як плазмоутворювальна, готується попередньо і подається до завихрювача вже з відомим співвідношенням між горючим газом і окиснювачем (повітрям).

Запуск плазмотронів здійснюється на повітрі, із поступовим переходом до газоповітряної суміші потрібного складу, що обумовлено намаганням підвищити надійність осциляторного ініціювання електричної дуги за умови постійної відстані між електродами.

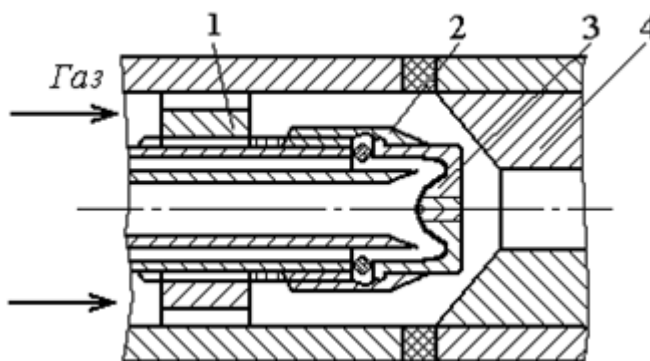
Співвідношення між горючим газом і повітрям у вихідній суміші може змінюватися в широких межах, оскільки існує принципова можливість генерації плазмотроном однієї конструкції як чисто повітряної, так і чисто вуглеводневої плазми.

Плазмотрон складається із трьох основних вузлів: катодного вузла, анодного вузла та ізолятора, який електрично розв'язує електроди розпилювача.

Катодний вузол конструктивно об'єднаний із вузлом подавання плазмоутворювального газу.

В досліджуваному плазмотроні застосовані дві різні схеми подавання плазмоутворювального газу – аксіально-тангенціальна (рис. 2.3) та тангенціальна. Функцію аксіально – тангенційного завихрювача виконує спеціальна циліндрична втулка з каналами на зовнішній поверхні. При щільній посадці такої деталі в корпусі плазмотрона газ надходить у дугову камеру по пазах, утворених багатозаходною гвинтовою канавкою й внутрішньою поверхнею корпуса плазмотрона. На виході з каналів струмини газу одразу мають і аксіальну і тангенційну складові швидкості.





1 – втулка; 2 – накидна гайка; 3 – катод; 4 – анод

Рисунок 2.3 – Аксіально – тангенційне подавання плазмоутворювального газу

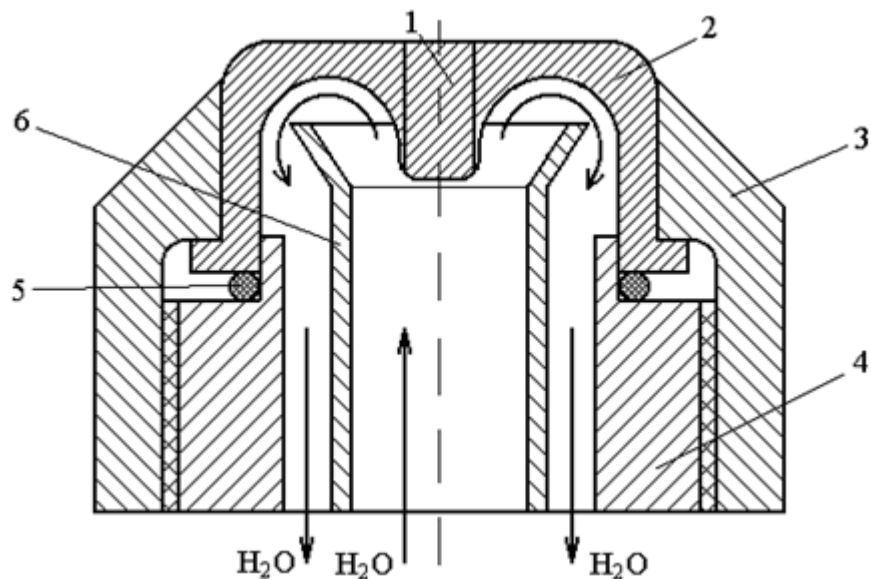
Вихор утворює зону зниженого тиску на осі дугового каналу в якій і розміщується електрична дуга. Стабілізація дуги на осі каналу запобігає передчасному шунтуванні її на стінку вихідного електрода і утримує катодну пляму прив'язування на активній цирконієвій (гафнієвій) вставці термохімічного електрода.

Для роботи розпилювача застосований серійний термохімічний катод типу ОБ 1542, який розроблений ІЕЗ ім. Є.О. Патона і використовується в установках повітряно-плазмового різання.

Електрод має вигляд мідної гільзи, в яку запресована активна цирконієва вставка. Закріплення термохімічного катода здійснюється за допомогою накидної гайки, яка фіксує і одночасно центрує її на корпусній деталі катодного вузла. У даному конкретному випадку застосовано пряме охолодження катода проточною водопровідною водою (рис. 2.4). Вода подається через дефлектор до внутрішньої порожнини мідної гільзи катода, омиває цю порожнину і повертає у зворотному напрямку. Після омивання теплонапружених елементів плазмотрона вода зливається в систему каналізації.

Зміна зруйнованого в результаті тривалої роботи катода здійснюється шляхом відкручення накидної гайки спеціальним ключем і заміною катода на новий. Ущільнення змінного катода здійснюється через кільцеву гумову

прокладку. Катодний вузол фіксується відносно анодного вузла і ізолюється від нього за допомогою системи ізоляторів із карболіту.



1 – активна вставка; 2 – мідна обойма; 3 – накидна гайка; 4 – корпус катодного вузла; 5 – прокладка; 6 – дефлектор.

Рисунок 2.4 – Схема прямого охолодження гільзового термохімічного катода

Анодний вузол виконаний за традиційною схемою прямого охолодження.

Матеріал електродів – мідь М1. Герметизація електродів здійснюється через кільцеві гумові прокладки.

Вісь дугового каналу в межах анода співвісна із напрямком осьової складової швидкості вихідного плазмоутворювального газу.

## 2.2 Система електричного живлення плазмового генератора

Джерело живлення АПР – 402 (рис. 2.5) є тиристорним випрямлячем із крутоспадними зовнішніми характеристиками [7]. Складові елементи джерела АПР – 402 розміщені у безкаркасній сталевій шафі, на зовнішній панелі якої розміщені кнопки керування, контрольні прилади, елементи сигналізації і захисту

установки. АПР – 402 дозволяє працювати при зміні робочої напруги розпилювача в межах від 100 до 250 В і струмі дуги від 100 до 450 А.

Ініціювання дуги осциляторне.

Штатна електрична схема джерела живлення АПР – 402 розрахована на запуск плазмотронів з додатковим електродом, який використовується на період запуску як позитивний електрод для горіння допоміжної дуги, і як нейтральна вставка на період роботи в штатному режимі.

В експериментальних дослідженнях використовувався двоелектродний плазмотрон без допоміжного електроду, тому схема підключення та запуску розпилювача була модернізована (рис. 2.6).

У цьому варіанті підключення не використовується чергова дуга, яка технічно передбачена в джерелі живлення АПР – 402. Запуск здійснюється відразу на основному струмі дуги, значення якого попередньо встановлюється на панелі керування джерела.



Рисунок 2.5 – Загальний вигляд джерела живлення АПР – 402

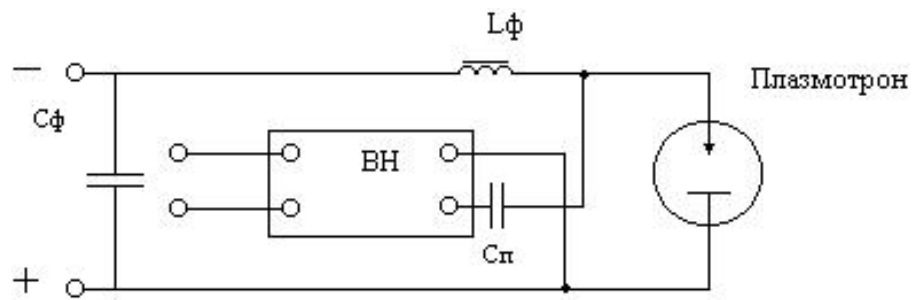
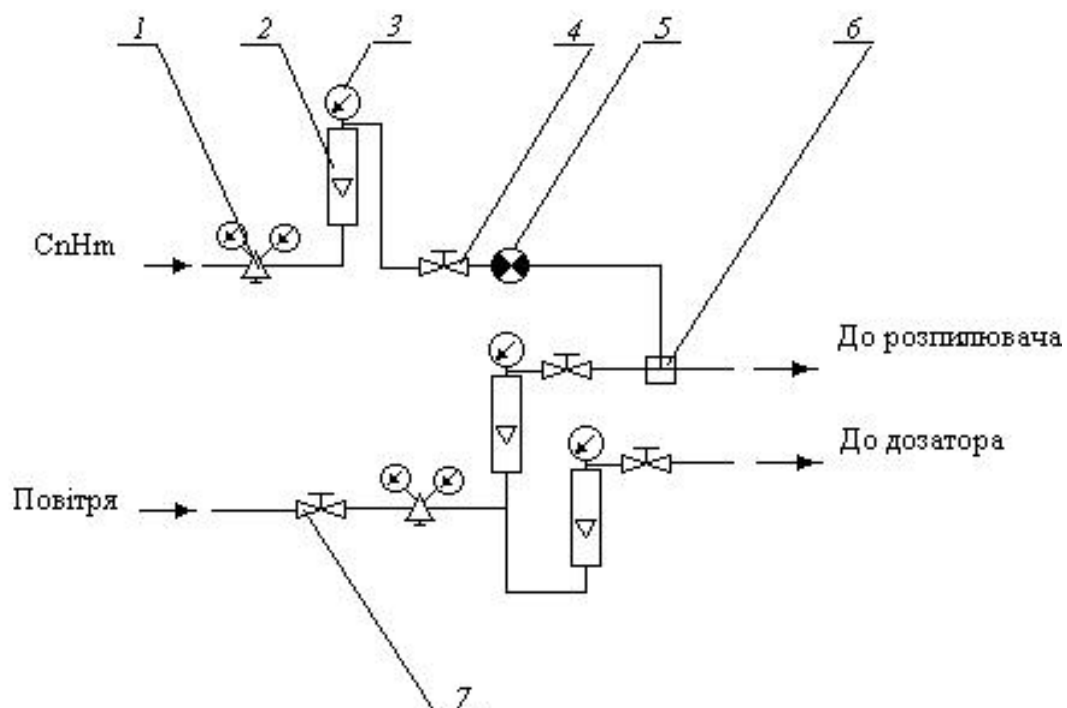


Рисунок 2.6. – Схема запуску розпилювача

### 2.3 Система живлення робочими газами

Досліджування процесу генерації дугової плазми проводилося із застосуванням плазмоутворювального повітря та сумішей повітря з вуглеводневим газом. Тому станція газоприготування (рис. 2.7) має технічну можливість подавання і контролю вихідних характеристик двокомпонентної суміші: один із компонентів – повітря, другий компонент – вуглеводневий газ (у конкретному випадку – балонний пропан-бутан).



1 – редуктор; 2 – ротаметр; 3 – манометр; 4 – голчастий вентиль; 5 – зворотній клапан; 6 – змішувальна камера; 7 – запірний кран

Рисунок 2.7 – Принципова схема станції газоприготування установки плазмового нанесення покриттів

Конструктивно газоприготувальна станція побудована у вигляді металевої шафи, всередині якої розміщені: елементи регулювання витрати газів (голчасті крани); вимірювальні прилади (тиску газу – манометри, витрати – ротаметри); елементи приготування суміші (змішувальна камера).

Пристрої для підтримання постійного тиску компонентів газової суміші (редуктори) знаходяться ззовні, відповідно на повітряній мережі і балоні із скрапленим пропан-бутаном.

Ротаметри для вимірювання витрати компонентів газової суміші попередньо протаровані за допомогою еталонного газового лічильника. Коефіцієнт витрати окислювача підраховувався виходячи із показників ротаметра та манометра з використанням тарувальної кривої.

Змішувальна камера для приготування суміші газів побудована з використанням інжекційного ефекту при перемішуванні компонентів. Це дає змогу ефективніше використовувати балон пропан-бутану.

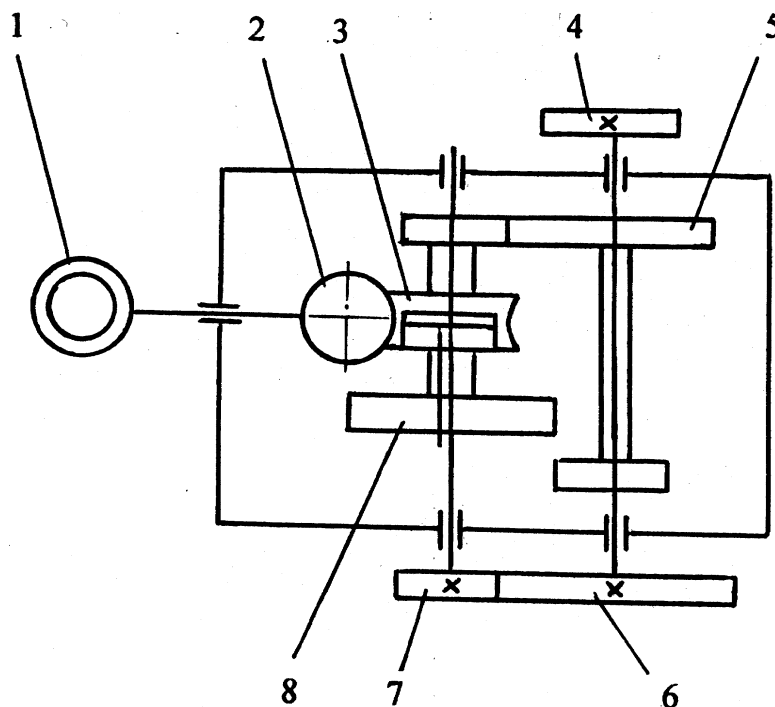
## **2.4 Система подавання дротяним матеріалом**

В експериментальній установці використаний спеціалізований механізм подавання дроту, який входить до складу комплексу установки плазмового напилення УПУ-ЗД, УПУ-8М для подавання дроту до плазмотрона ПМ-25 (кінематична схема механізму показана на рис. 2.8).

Він забезпечує плавно-ступінчасте регулювання швидкості подавання дроту і складається з реверсивного електродвигуна постійного струму Д-25Л, комбінованого редуктора з ведучими роликами, котушки внутрішнього укладання дроту і кронштейна для закріплення котушки.

Всі елементи механізму змонтовані на гетинаксовій основі.

При вмиканні електродвигуна ролики переміщують дріт по боудену із швидкістю, яка може регулюватися.



1 – електродвигун; 2 – черв'як; 3 – зубчастий вінець; 4 – ведучий ролик; 5 – блок шестерень; 6, 7 – зубчаста циліндрична пара шестерень; 8 – рухома шестірня

Рисунок 2.8. Кінематична схема редуктора установки УПУ-3Д:

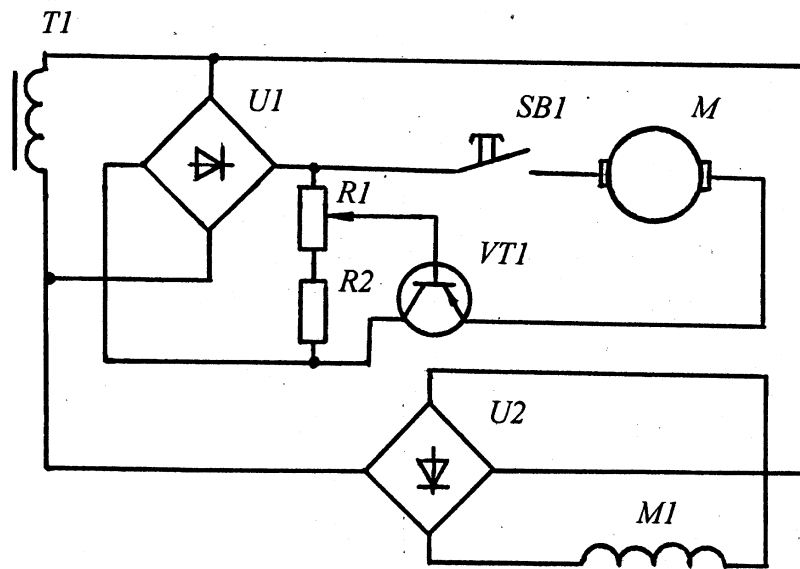
Швидкість подавання дроту регулюється в інтервалі (75...450) м/год. зміною швидкості обертання електродвигуна і у межах (1...2,5) за допомогою перемикача швидкостей на редукторі.

Рух від електродвигуна 1 передається або через черв'ячну пару 2-3, рухоми шестірню 8 та пару шестерень 6-7 на ведучий ролик 4 (висока швидкість), або через черв'ячну пару 2-3, блок шестерень 5, 8 та пару шестерень 6-7 на ведучий ролик 4 (низька швидкість).

Електричну схему регулювання швидкості електродвигуна надано на рис. 2.9.

Швидкість регулюється шляхом зміни напруги на якірній обмотці електродвигуна  $M$  за допомогою транзистора  $VT1$ . Транзистор включений послідовно в якірне коло двигуна. Напруга на обмотці збудження  $M1$  постійна.

Двигун працює доти, поки натиснута кнопка *SB1*. Схема керування живиться від мережі через знижувальний трансформатор *T1*.



*M* – електродвигун; *T1* – знижувальний трансформатор; *U1*, *U2* – випрямлячі; *R1*, *R2* – резистори; *VT1* – транзистор; *SB1* – кнопка керування

Рисунок 2.9. Електрична схема живлення механізму подавання дроту установки плазмового нанесення покриттів УПУ-3М

### 3 МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ

#### 3.1 Методика дослідження енергетичних характеристик плазмових генераторів

Визначались вольт-амперні характеристики (ВАХ) плазмового розпилювача при зміні режимних параметрів його роботи, а також втрати в елементи конструкції розпилювача.

##### 3.1.1 Методика визначення статичних ВАХ плазмотрона

Дослідження проводились у відкритій атмосфері, при нормальному тиску повітря і температурі навколишнього середовища 18 °С.

ВАХ плазмотрона визначали шляхом вимірювання струму дуги амперметром марки М42300 та напруги на дузі вольтметром марки М42300 (клас точності 1) та зразковими стрілочними приладами типу М 243 кл. 0,2 та М 1105 кл. 0,2.

Замір напруги проводився безпосередньо на плазмотроні, між катодом і анодом.

Послідовність проведення вимірювань:

- вмикається охолодження водою всіх елементів конструкції плазмотрона (катодного та анодного вузлів) шляхом подавання  $H_2O$  з мережі водопостачання за допомогою шлангів та шланг-кабелів;
- встановлюється початковий тиск плазмоутворювального газу (повітря або його суміші із пропан-бутаном) 0,3 МПа;
- ініціюється дуга в розпилювачі шляхом підключення плазмотрона до джерела живлення АПР-402;
- після виходу на режим встановлюється мінімальне значення струму – 120 А і безпосередньо на розпилювачі за допомогою вольтметра вимірюється напруга. Показання приладів вважаємо встановленими при витримці на заданому режимі роботи плазмотрона протягом 3 хв.;



- збільшується струм дуги шляхом повертання ручки регулятора струму (інтервал зміни струму 15 А). Максимальне значення струму становить 250 А.

Вимірювання повторюються за запропонованою послідовністю при інших значеннях витрати плазмоутворювального газу.

### **3.1.2 Методика вимірювання втрат тепла в елементи конструкції та визначення ККД розпилювача**

Втрати визначаються шляхом вимірювання об'єму води, витраченої на охолодження елементів конструкції плазмотрона та фіксації температури води на вході у контур охолодження  $T_{\text{вх}}$  та виході із контуру охолодження  $T_{\text{вих}}$ , перед зливанням у систему каналізації.

При вимірюваннях використовувалась мірна ємність, ртутний термометр з ціною поділки 0,2 °С і секундомір.

Розрахунок втрат проводиться за формулами:

$$P_{\text{тепл}} = c (T_{\text{вих}} - T_{\text{вх}}) m_{\text{в}} \quad (3.1)$$

де  $c$  – теплоємність води, Дж / г·К;

$T_{\text{вих}}$  – температура нагрітої води, °С;

$T_{\text{вх}}$  – температура води у мережі водопостачання, °С;

$m_{\text{в}}$  – масова витрата води, г / с.

ККД розпилювача із комбінованим підведенням енергії розраховується за формулою:

$$\eta = \frac{P_{\Sigma} - P_{\text{втр}}}{P_{\Sigma}}, \quad (3.2)$$

де  $P_{\Sigma}$  – сумарна потужність, яка підведена до плазмоутворювального газу;

$P_{\text{втр}}$  – втрати енергії в елементи конструкції розпилювача.

У свою чергу, потужність, яка підведена до розпилювача, складається із електричної потужності  $P_{\text{ел}} = U I$  та теплової потужності, яка може бути реалізована у випадку повного згоряння вуглеводневого газу  $P_{\text{вг}} = a Q_{\text{вг}}$ , де  $a$  – нижча робоча теплотворна здатність вуглеводневого газу, кВт·год. / м<sup>3</sup>;  $Q_{\text{вг}}$  – витрата вуглеводневого компонента, м<sup>3</sup> / год. (для природного газу –  $P_{\text{пг}} = 10,258 Q_{\text{пг}}$ , кВт, для метану –  $P_{\text{сн}_4} = 10,35 Q_{\text{мет}}$ , кВт,).

Питома енергія, яка рівнозначна середньомасовій ентальпії продуктів на виході із плазмотрона розраховується за виразом:

$$\varepsilon = P_{\text{кор}} / Q_{\Sigma} = (U I + P_{\text{пг}} - P_{\text{втр}}) / Q_{\Sigma}, \text{ кВт·год. / м}^3, \quad (3.3)$$

де  $Q_{\Sigma} = Q_{\text{пг}} + Q_{\text{пов}}$  – сумарна об'ємна витрата вихідної суміші.

$P_{\text{кор}}$  – корисна потужність плазмотрона (загальна потужність за виключенням втрат в елементи конструкції).

У процесі досліджень змінювався коефіцієнт витрати окиснювача від  $\alpha = 4,82$  до  $\alpha = 0,41$ , струм дуги у діапазоні (150 – 250) А, витрата плазмоутворювальної газової суміші у діапазоні (3,8 – 7,1) м<sup>3</sup> / год.

Для порівняння аналогічні експерименти проведені для повітря ( $\alpha = \infty$ ). Для цього випадку:

$$P_{\text{ел}} = P_{\text{т}} + P_{\text{втр}}, \quad (3.4)$$

Теплова потужність плазмового струменя  $P_{\text{т}}$  газової системи N-O визначалась як потужність, яка віддана потоком високотемпературного газу стінкам калориметра з урахуванням залишкового тепла частково охолоджених газових компонентів струменя.

3.2 Методика експериментальних досліджень параметрів плазмових струменів системи N-O-C-H

У роботі застосований ентальпійний зонд Грея [38]. На рис. 3.1, *а* наведена схема вимірювань, а на рис. 3.1, *б* зовнішній вид пробовідбірника.

Пробовідбірник представляє собою конструкцію із коаксіально розміщених тонкостінних мідних трубок, які утворюють систему каналів для прокачування проби газу і охолодження конструкції.

Проба відбирається на передній критичній лінії циліндра, що поперечно обдувається високотемпературним газовим потоком.

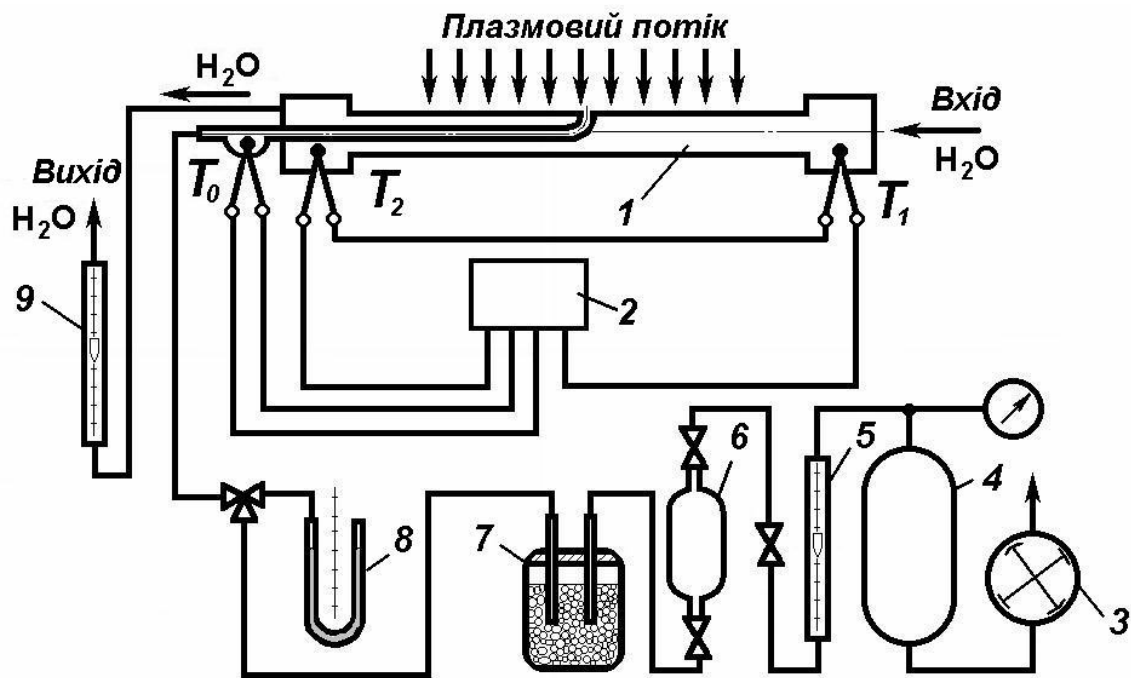
Для визначення об'ємного розподілу параметрів плазмового струменя пробовідбірник встановлений на маніпуляторі, який із точністю  $\pm 0,5 \cdot 10^{-3}$  м здатний переміщувати пробовідбірник по трьох координатних осях.

Визначення ентальпії базується на вимірюванні теплового потоку, який сприймає пробовідбірник *1* під час відбирання проби через його внутрішній капіляр. Пробовідбірник встановлюється перпендикулярно напрямку течії плазмового потоку. Приймальний отвір капіляра повернутий у бік соплового отвору плазмотрона.

Вакуумний насос *3* створює попереднє розрідження у ресивері *4*. Після відкриття запірного крана через капіляр пробовідбірника починає засмоктуватись газ із локальної зони високотемпературного газового потоку.

На шляху проби газу послідовно встановлені поглинач вологи *7*, ємність для проби газу *6*, ротаметр *5* для вимірювання об'ємної витрати газу, який відбирається. Ротаметр *5* типу НДЕМ 3486002 попередньо тарований на повітря.

Склад відібраної проби аналізувався на спареному хроматографі типу ХЛ-3 та ЛХМ-8-МД.



а



б

а – схема вимірювання: 1 – пробовідбірник (зонд); 2 – мілівольтметр; 3 – вакуумний насос; 4 – ресивер; 5, 9 – ротаметр; 6 – ємність для відбирання проби газу; 7 – поглинач вологи; 8 – вимірювач тиску;

б – зовнішній вигляд пробовідбірника

Рисунок 3.1 – Вимірювання параметрів плазмового потоку складних газових систем

Отриманий результат складу холодної проби газу, в якій містяться продукти рекомбінації газів після їх охолодження у пробовідбірнику, використовується для розрахунку реального складу газу у точці відбирання з урахуванням фактичної температури, що визначається за виміряною ентальпією.

Динамічний напір визначався підключенням капіляра пробовідбірника до U – подібного водяного манометра 8. Для запобігання спотворення структури потоку, який досліджується, масова швидкість течії газу через капіляр під час відбирання проби не повинна перевищувати швидкість течії плазми. Ця умова реалізовується шляхом регулювання розрідження у системі дещо вище абсолютного значення динамічного напору.

Витрата охолоджувальної води через пробовідбірник вимірювалась ротаметром 9 типу PIV. Тиск води охолодження становив (1000...1100) кПа.

Зміна температури охолоджувальної води під час прокачування проби газу фіксувалася диференційною термopарою X-K, підключеною до вторинного приладу (мілівольтметру) 2.

Максимальна чутливість пробовідбірника досягається за умови, що проба газу повністю віддає своє тепло стінці капіляра і набуває температури охолоджувальної рідини. Ця умова виконується підбиранням геометричних розмірів пробовідбірника – його довжина (250...300) мм і контролюється за допомогою термopари, встановленої в капілярі. Чутливість визначається як співвідношення теплового потоку, який сприйняв пробовідбірник під час відбирання проби газу через капіляр, до повного теплового потоку, що падає на зонд. Чутливість пробовідбірника знижується зі зростанням температури плазмового потоку і зростає зі збільшенням швидкості течії плазми.

Рівняння теплового балансу під час відбирання проби газу:

$$c_{\text{в}} G_{\text{в}} \Delta t_{\text{в}} = G_{\text{г}} (H_{\text{пл}} - H_{\text{хг}}), \quad (3.5)$$

де  $c_{\text{в}}$  – теплоємність води, кДж / (кг·К);

$G_{\text{в}}$  – масова витрати води через зонд, кг / с;

$\Delta t_{\text{в}} = \Delta t_{\text{вг}} - \Delta t_{\text{в0}}$  – перепад температури, К;

$\Delta t_{\text{вг}}$  – перепад температури води, що охолоджує пробовідбірник, при заборі проби, К;

$\Delta t_{\text{в0}}$  – перепад температури води, що охолоджує пробовідбірник, без відбирання проби, К;

$G_{\text{г}}$  – масова витрата проби газу, кг / с;

$H_{\text{пл}}$  – ентальпія плазми, що визначається, кДж / кг;

$H_{\text{хг}}$  – ентальпія охолодженого газу, кДж / кг.

Повний склад холодного газу проби встановлювався за вмістом  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{Ar} + \text{O}_2$ .

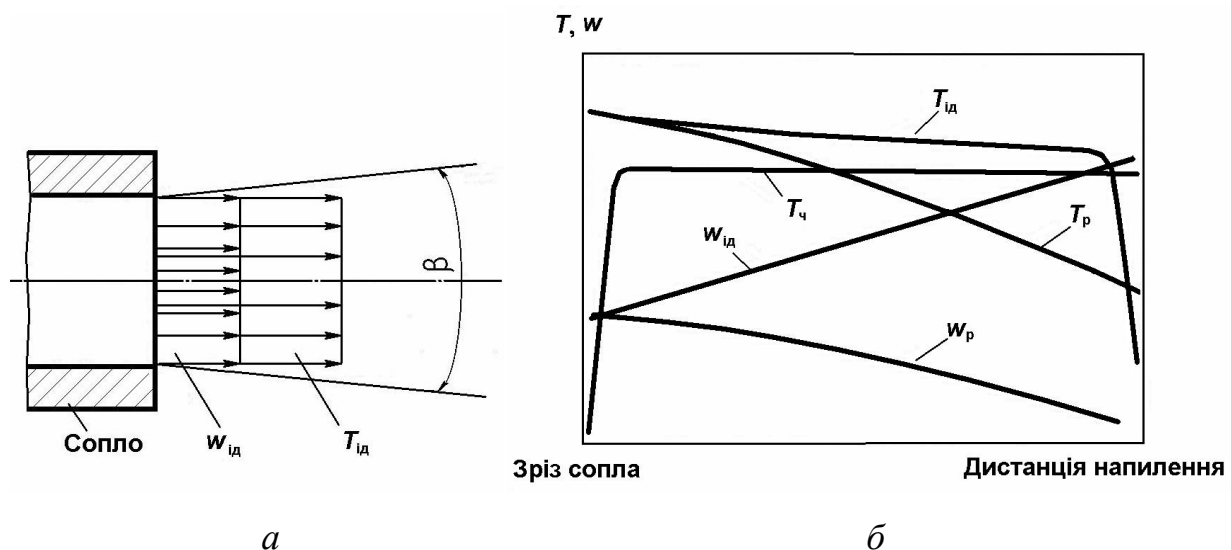
Детально методика описана у роботі [39].

## 4 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 4.1 Загальні положення. Вимоги до плазмотрона для розпилення дроту та струменя плазми, який він генерує

Під час розпилення дроту «ідеальний» струмінь плазми повинен забезпечувати (рис. 4.1):

- рівномірний (допускається нерівномірний, із максимумом на поздовжній осі) розподіл температур та швидкостей у поперечному перерізі струменя у зоні подавання дроту за умови високого рівня абсолютного значення температури і швидкості;



$T_{id}$ ,  $w_{id}$  – бажаний розподіл температури та швидкості газу вздовж струменя на дистанції наплення;  $T_r$ ,  $w_r$  – розподіл температури та швидкості вздовж струменя в реальних плазових потоках;  $T_{ch}$  – температура частинки матеріалу

Рисунок 4.1 – Ідеальний (бажаний) та реальний розподіли температури і швидкості по перерізу (а) і за довжиною (б) високотемпературного потоку при плазовому дротяному нанесенні покриття

- високе значення  $\alpha$  в зоні плавлення матеріалу дроту;
- рівномірний розподіл температур та швидкостей у поперечному перерізі струменя на всьому шляху руху частинок до поверхні виробу;

- стале, вище за температуру плавлення матеріалу дроту, значення температури струменя з моменту розплавлення матеріалу дроту до дистанції напилення;

- різке спадання рівня температури газового потоку в зоні формування покриття;

- відсутність активних компонентів навколишнього газового середовища (або зв'язування їх);

- мінімальний кут розкриття газового (двофазного) потоку.

Враховуючи, що зазвичай для розпилення дроту використовуються інертні гази, для обґрунтування можливості застосування для цих задач газоповітряних плазмотронів необхідно дослідити вплив характерних розмірів дугового каналу і режимних параметрів генерації плазми на енергетичні характеристики плазмотронів і структуру плазових струменів, що були б найбільш наближені до «ідеальних».

Аналізуючи термодинамічні характеристики плазових середовищ різного складу [69] попередньо можна констатувати, що температура плазми, яка отримана із молекулярних газів, набагато менша за температуру плазми атомарних газів, наприклад аргону. Це зменшує температурний перепад у зоні нагрівання і загалом може негативно вплинути на продуктивність процесу розпилення.

Але враховуючи, що струмись плазових розпилювачів, що працюють на молекулярних плазмоутворювальних газах і сумішах характеризується значними градієнтами температури і швидкості потоку газу за перерізом струменя і вздовж його [69], реальні умови нагрівання і прискорення частинок матеріалу, який утворює покриття, може значно перевищувати середньомасові значення.

Таким чином, для успішної реалізації процесу розпилення дроту плазмою молекулярних сумішей і, зокрема, плазмою суміші повітря із вуглеводневими газами, необхідно виконати декілька попередніх умов:

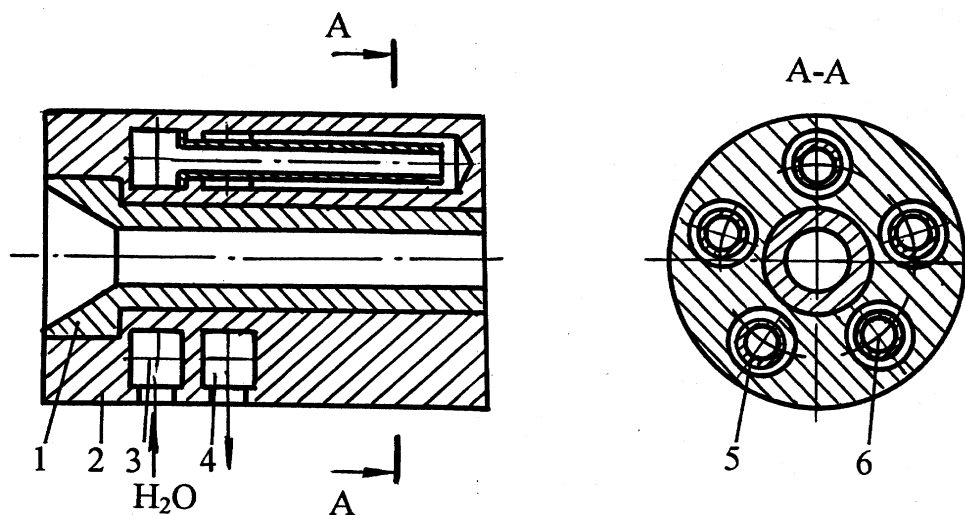
- температурний профіль струменя плазми у місці введення дроту повинен бути максимально нерівномірний;



- для підвищення швидкісних характеристик струменя процес генерації плазми повинен проходити при мінімально допустимих значеннях діаметра вихідного електрода;
- конструкція вихідного електрода повинна забезпечувати введення вихідного матеріалу у дуговий канал (у зону максимальних температур) без порушення герметичності системи його охолодження;
- довжина вихідного електрода повинна бути якомога меншою для мінімізації втрат у нього.

Суттєві втрати у вихідний електрод потребують застосування інтенсивного охолодження теплонапружених ділянок дугового каналу. Зазвичай застосовується водяне охолодження. Найбільш поширеним варіантом є пряме охолодження електрода [69]. Введення дроту в дуговий канал за таких умов потребує проходження каналом подавання дроту сорочок охолодження електрода без порушення їх герметичності, що практично досить складно і не надійно.

Для спрощення проблеми застосовуємо плазмотрон із посереднім охолодженням вихідного електрода (рис. 4.2).



1 – електрод; 2 – корпус; 3, 4 – колектор; 5 – трубка; 6 – канал

Рисунок 4.2 – Схема каналного непрямого охолодження анода

Посередні (непрямі) схеми охолодження використовують ті ж самі конструктивні рішення, що і прямі схеми: "стакан у стакані", каналні варіанти охолодження та ін., але охолоджується не електрод, а корпус електродного вузла.

У корпусі, виготовленого із матеріалу з високою теплопровідністю, закріплюється електрод, який не контактує безпосередньо з охолоджуючою рідиною. На шляху потоку тепла з'являється контактна поверхня електрода і корпуса вузла.

Вода надходить до вхідного колектора 3, проходить по системі каналів у корпусі анода, повертає на  $180^\circ$  і збирається у вихідному колекторі 4. Кожний канал являє собою мінісистему "стакан у стакані". Ефективність системи охолодження забезпечується значним збільшенням поверхні охолодження порівняно з традиційною схемою "стакан у стакані", хоча непряме охолодження менш ефективне порівняно із прямим.

Запропонована конструкція дозволяє вводити дріт в середину дугового каналу не порушуючи герметичність системи охолодження водою.

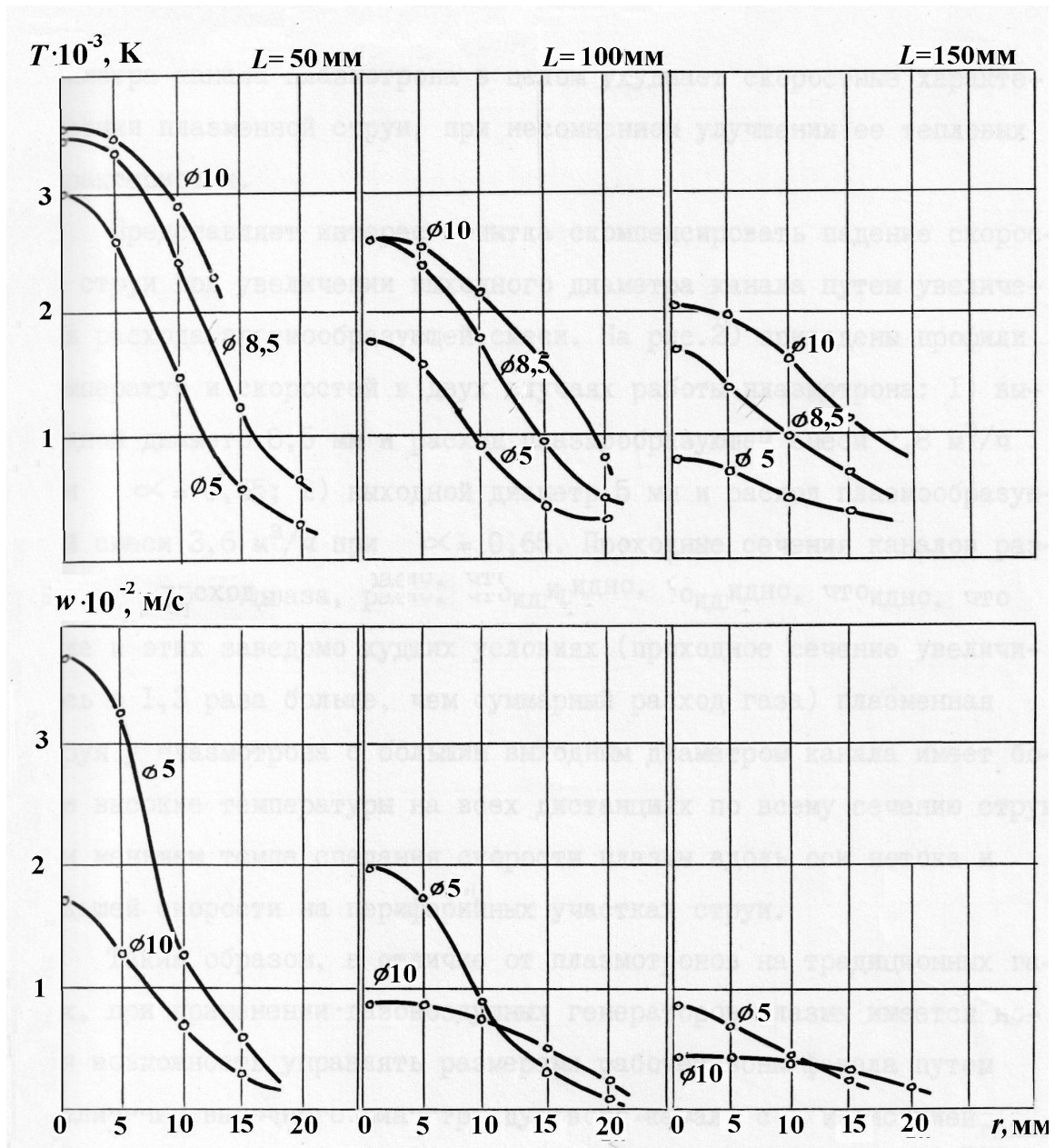
Канал для подавання дроту проходить через корпус анодного вузла між каналами охолодження, перетинає контактну поверхню із анодною вставкою і тіло анодної вставки і виходить у дуговий канал.

У запропонованому варіанті анодного вузла реалізована схема «нейтральний дріт». Дротяний або прутковий матеріал нагрівається і плавиться в основному в результаті своєї взаємодії зі струменем низькотемпературної плазми. Тим самим у номенклатуру матеріалів, що напилюються, потрапляють і неструмопровідні речовини.

Не виключається і часткове використання джоулевого тепла, якщо струмопровідний дріт ізольований від корпусної деталі анодного вузла і заземлений. Між плазмою у точці введення дроту і землею існує певна різниця потенціалів, що викликає протікання струму через дріт на землю.

## 4.2 Вплив геометричних розмірів дугового каналу на структуру та параметри потоку плазми

Із застосуванням зондової методики виміряні профілі температур і швидкостей на декількох дистанціях при однакових і постійних вхідних параметрах плазмотрона: струмі, витраті газу, коефіцієнті витрати окиснювача (рис. 4.3).



$$Q_{\Sigma} = 3,7 \text{ м}^3/\text{год.}; \alpha = 0,71; U = 145 \text{ В}; I = 200 \text{ А}$$

Рисунок 4.3 – Поперечні профілі температури та швидкості плазмового струменя при зміні діаметра вихідної ділянки дугового каналу

На рис.4.3 наведений розподіл температури та швидкості за перерізом струменя плазми на трьох дистанціях: 50 мм, 100 мм та 150 мм від зрізу сопла.

Як видно із рисунка, збільшення діаметра вихідної ділянки дугового каналу призводить до значного падіння швидкості витікання високотемпературного газу, що може погіршити умови евакуації розплавленого матеріалу з торця дроту. З цієї точки зору оптимальним можна вважати мінімально допустимий діаметр дугового каналу.

Температура струменя на зрізі сопла на поздовжній осі струменя при однакових енерговкладах буде залежати від ступеня нерівномірності профілю температур і очікується більшою у випадку меншого діаметра.

Темп падіння температури в об'ємі струменя у випадку розпилення дротяних матеріалів не відіграє суттєвого значення, бо двофазний струмінь формується вже із розплавлених частинок матеріалу, які евакуйовані потоком газу.

На рис. 4.4 показані профілі температури плазмового факела для двох діаметрів дугового каналу і постійної витрати плазмоутворювальної суміші.

Параметри плазми на зрізі сопла генератора можна дещо підвищити, переходячи на збільшену витрату плазмоутворювального газу (рис.4.5).

Враховуючи наявність попереднього закручування газу в каналі плазмотрона і інтенсивного відведення тепла від дуги газом і стінкою дугового каналу, можна очікувати підвищення нерівномірності профілю температур потоку. Більша частина газу проходить через дуговий канал мало сприймаючи тепло електричної дуги. Практично вся енергія дуги виділяється тільки в частині плазмоутворювальної суміші. Це призводить до нагрівання при осьової частини потоку до температур значно вищих за середньомасову.

Зондові методи не дозволяють підтвердити це експериментально, але підвищення продуктивності розпилення дроту при підвищенні витрати газу у певному діапазоні є непрямым підтвердження цього явища.

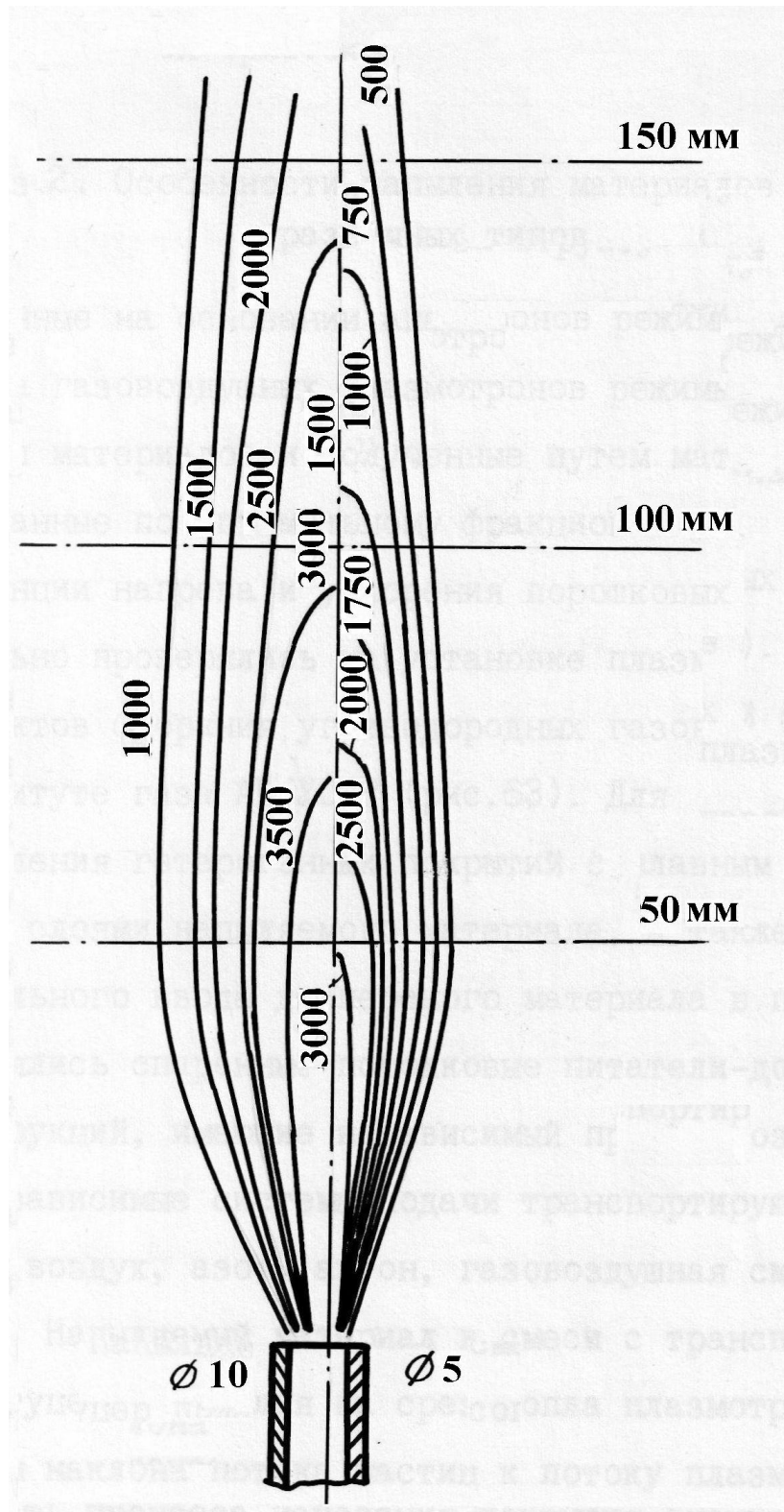


Рисунок 4.4 – Профілі температури плазмового факела для двох діаметрів дугового каналу

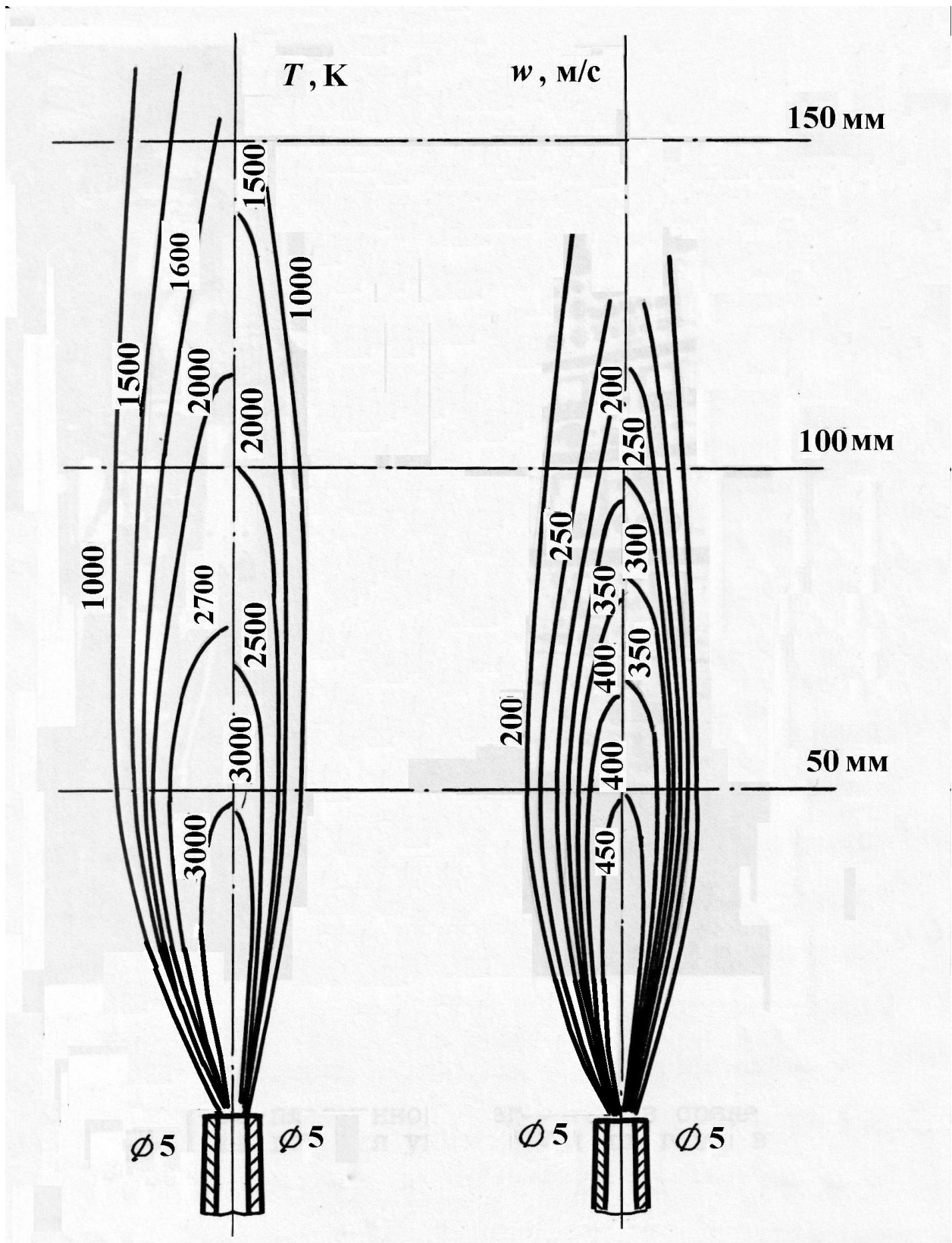


Рисунок 4.5 – Профілі температур і швидкостей при збільшенні витрати плазмоутворювального газу

### 4.3 Енергетичні характеристики розпилювача

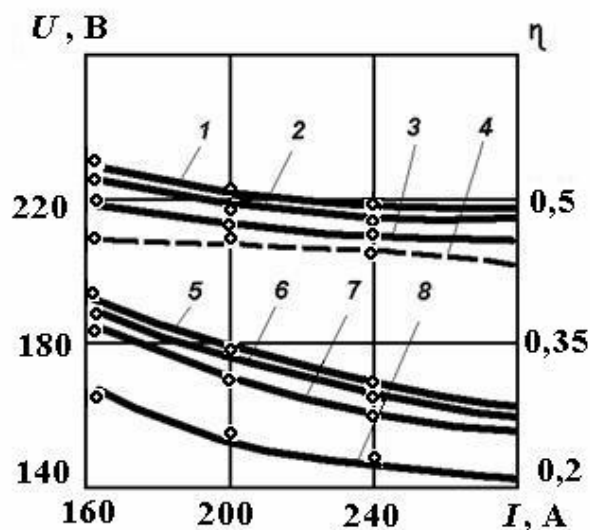
За відомою методикою (розділ 1) визначались вольт-амперні характеристики плазмотрона для розпилення дроту (рис. 4.6).

Враховуючи, що для підвищення ефективності евакуації розплавленого металу з кінця дроту необхідне збільшення швидкості витікання потоку, досліджувались плазмотрони із мінімально можливим діаметром соплового отвору. Він для конкретних режимних і геометричних параметрів плазмотрона становить 5 мм.

При такому діаметрі дугового каналу плазмотрон працює в режимі самовстановлювальної дуги. Відповідно, ВАХ таких плазмотронів розміщені вище ВАХ плазмотронів із автогазодинамічною фіксацією довжини дуги.

Напруга на дузі при роботі на газоповітряних сумішах сягає 200 В і вище.

Вольт-амперні характеристики спадні, характерні для плазмотронів із самовстановлювальною дугою.



1, 5 –  $n = 24\%$ ; 2, 6 –  $n = 18\%$ ; 3, 7 –  $n = 8,5\%$ ; 4, 8 –  $n = 0$

Рисунок 4.6 – Узагальнені ВАХ (1, 2, 3, 4) та залежності ККД від струму дуги (5, 6, 7, 8) двоелектродного плазмотрона для розпилення дроту (метан; сумарна витрата плазмоутворювальної суміші –  $3,5 \text{ м}^3 / \text{год.}$ )

На тому ж рисунку наведені залежності ККД від струму дуги.

Згідно із результатами вимірювань, загальний рівень ККД плазмотронів із самовстановлювальною дугою дещо нижчий за ККД плазмотронів із уступом. Це пояснюється збільшенням втрат в катод при підвищенні тиску в дуговій камері та збільшенням втрат в анод через певну інтенсифікацію теплообміну із стінкою дугового каналу і погіршення темпу відведення тепла у охолоджувальну рідину.

#### 4.4 Дослідження процесу розпилення дроту

Експериментально були випробувані три конструкції анодного вузла із різними конфігураціями дугового каналу плазмотрона (рис. 4.7).

У двох конструкціях реалізована принципова схема плазмотрона із самовстановлювальною дугою і в одному (варіант *б*) – із автогазодинамічною фіксацією довжини дуги. Розширення каналу, які присутні у варіантів *а* і *в* не виконують роль стабілізатора довжини дуги, а призначені виключно для покращання умов введення дроту в дуговий канал.

У варіантах *а* та *в* випадках дуга розміщується у вузькій частині дугового каналу і є самовстановлювальною.

В результаті досліджень підтверджена стійка робота генератора плазми і стабільність процесу розпилення дроту у всіх варіантах виконання анодного вузла.

У варіанті *б* спостерігалась знижена швидкість витікання плазмового струменя, що погіршувало процес евакуації розплавленого металу і призводило до зміни фракційного складу розпиленого матеріалу у бік збільшення долі частинок більш крупної фракції, що погіршувало якість отриманого покриття.

У подальших дослідженнях варіант *б* не використовувався.



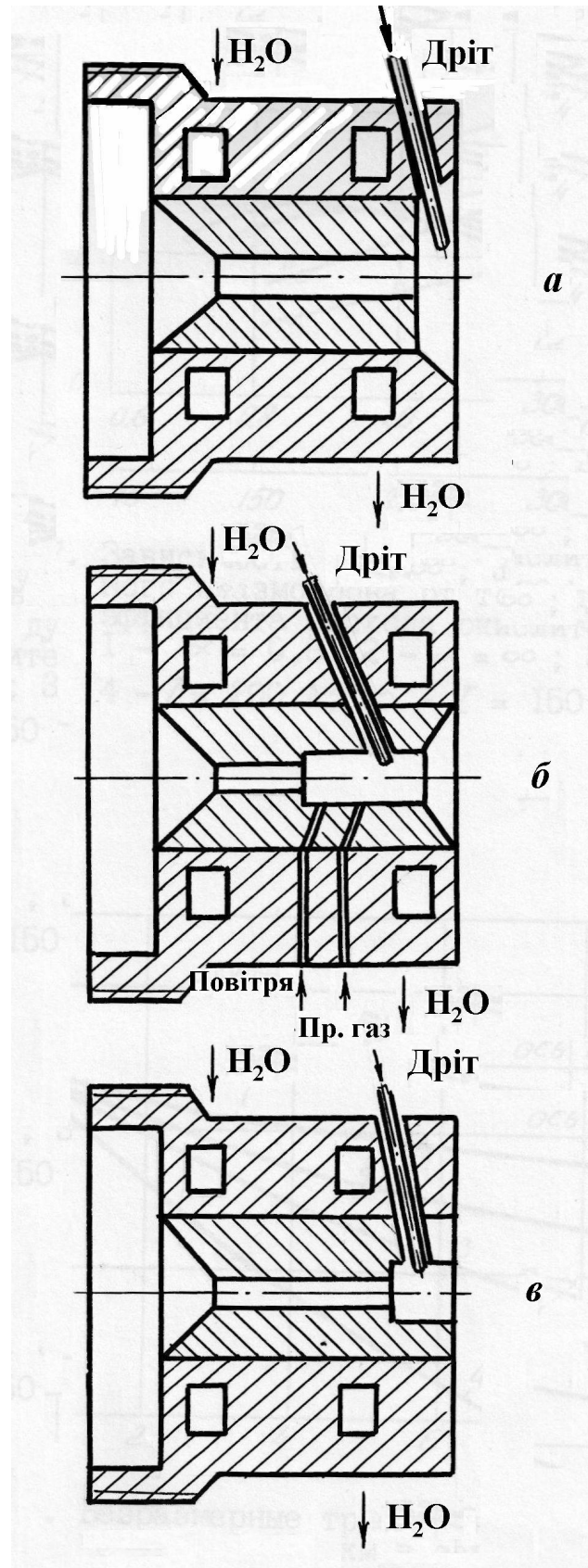
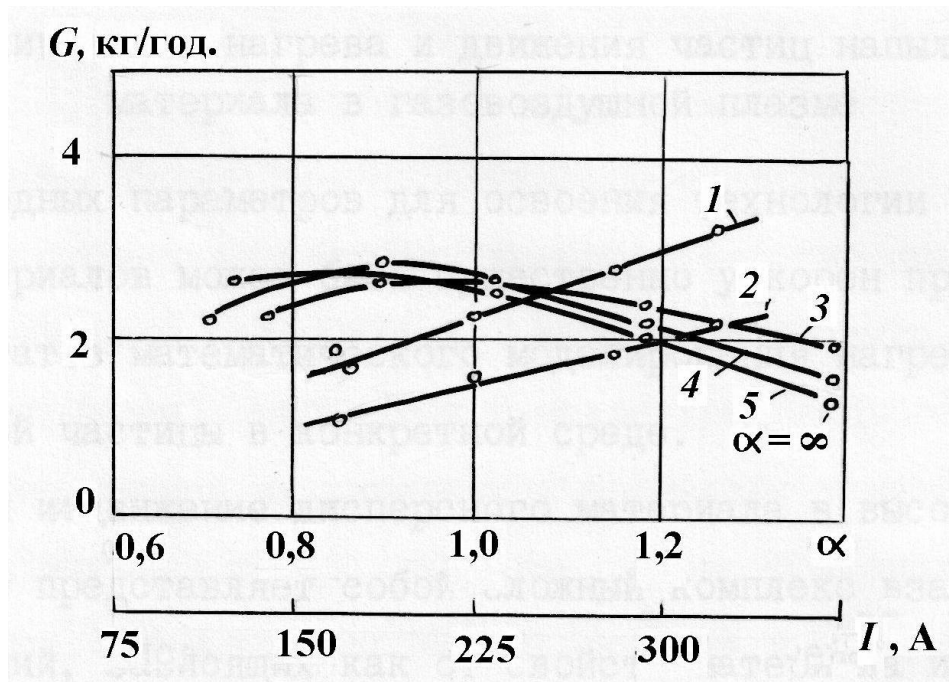


Рисунок 4.7 – Конструкції анодних вузлів газоповітряних плазмотронів, призначених для розпилення дроту

У всіх випадках було отримано якість покриттів, порівняно вищу не тільки з дугового металізацією на повітрі, але і з розпиленням аргоновими плазмотронами. Однак, внаслідок низьких порівняно із аргонною плазмою температур газоповітряної плазми у місці розміщення торця дроту, продуктивність процесу виявилася суттєво нижчою ніж у альтернативних варіантів.

За оптимальних умов вона не перевищувала 3 кг / год. (рис. 4.8).



$I - \alpha = 0,8$ ; 2 –  $\alpha = 1$ ; 3 –  $I = 250$  А; 4 –  $I = 200$  А; 5 –  $I = 150$  А;  $Q_{\Sigma} = 6,2$  м<sup>3</sup>/год.

Рисунок 4.8 – Залежність продуктивності плазмотрона для розпилення дроту від струму дуги (1,2) та коефіцієнта витрати окиснювача (3, 4, 5)

Як видно із рисунка має місце локальний максимум продуктивності при зміні складу плазмоутворювальної суміші. Максимальне значення продуктивності досягається при збагаченій суміші із коефіцієнтом витрати окиснювача  $\alpha = 0,9$ .

Залежність продуктивності від струму має практично лінійний характер. Продуктивність збільшується зростанням струму дуги через підвищення температури плазми і швидкості її витікання.

Підсумовуючи результати цієї роботи стосовно групи дрітчастих і пруткових матеріалів, можна сказати, що при потужності плазмотрона до 50 кВт, максимальна продуктивність (близько 3 кг / ч) при розпилюванні одного дроту досягається при схемі дугового каналу (рис. 4.6 в), який об'єднує принцип

самоустановлювальної дуги із частковим її прив'язуванням на струмоведучому дроті. Цей висновок кореспондується із припущеннями щодо високої нерівномірності температурного поля плазмових потоків, що створюються плазмотронами із самоустановлювальною дугою.

## **5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ**

В даній роботі розглядаємо ефективне застосування низькотемпературної плазми в процесах обробки матеріалів. Виконання цієї роботи можливе за умови створення надійних та безпечних умов праці.

При проведенні ремонтних робіт із застосуванням низькотемпературної плазми, процес наплення питання забезпечення безпеки умов праці на всіх етапах виконання технологічного процесу повинне бути в центрі уваги. На робочих місцях необхідно забезпечити достатній рівень природного й штучного освітлення.

Плазмотрон є найбільш відповідальним і водночас найменш надійним елементом комплексу обладнання для плазмового наплення. Принципово для плазмового наплення можливе використання більшості відомих типів плазмотронів, проте технологія наплення і реальні умови експлуатації висувають до них ряд вимог, які обмежують коло застосовуваних в даний час принципових схем генераторів низькотемпературної плазми.

### **5.1 Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів (ШНВФ)**

При використанні плазмотрона мають місце наступні небезпечні та шкідливі фактори:

- небезпечний рівень напруги в електричних ланцюгах;
- пожежонебезпека;
- вибухонебезпека;
- підвищений рівень шуму та вібрації;
- підвищений рівень запиленості .

Основними причинами враження електричним струмом є доторкання до струмоведучих частин, що знаходяться під напругою в робочому режимі.

Попереднє обезжирення інструмента передбачає використання бензину, ацетону та спирту.

Зрозуміло, що в повітрі робочої зони будуть присутні шкідливі пари цих речовин, які викликають алергічні захворювання в виробничих умовах. Гранично допустимі концентрації: бензину  $100 \text{ мг/м}^3$ , ацетону  $200 \text{ мг/м}^3$ , спирту  $1000 \text{ мг/м}^3$ .

## **5.2. Вимоги безпеки праці**

Нижче наведено вимоги безпеки праці, якими необхідно керуватись при складанні розділу з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях у магістерській дисертації.

### **5.2.1. Вимоги до технологічних процесів**

Вимоги безпеки праці до технологічних процесів мають відповідати вимогам ГОСТ 12.3.002-2014 [45]. Вибираючи технологію процесу обробки металів і матеріалів перевагу слід надавати тому процесу, при якому буде забезпечуватися більша безпека праці. Необхідно використовувати ті види та марки матеріалів, які при застосуванні цих процесів будуть забезпечувати мінімальне виділення в повітря шкідливих речовин. Не допускається використання матеріалів, які не пройшли гігієнічну оцінку в установленому порядку.

При створенні технологічних процесів Вибираючи технологію процесу обробки і матеріалів слід передбачити максимально можливу механізацію та автоматизацію процесів та його окремих елементів. Допустимі показники важкості та напруженості праці зварників повинні бути не вищі II класу згідно з нормами «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу» [46].

Виробниче обладнання, що застосовується у технологічних процесах, повинно відповідати загальним вимогам ДНАОП 0.00-1.21-98 [47] та ДНАОП 0.00-1.32-01 [48]. Обов'язковим етапом проектування технологічних процесів є розробка відповідних засобів та заходів колективного захисту від впливу характерних для даного процесу шкідливих та небезпечних виробничих факторів. Одним із таких заходів є застосовування пристроїв місцевої витяжної вентиляції

з системами очищення видаленого повітря від аерозолів та газів у відповідності з вимогами ДБН В.2.5-67:2013 [49].

Механізоване виробниче обладнання повинно мати вмонтовані повітроприймальні пристрої для уловлювання аерозолів і газів. Треба враховувати, що застосування технологічних процесів, які супроводжуються виділенням у повітря шкідливих речовин, з недіючою місцевою витяжною вентиляцією не допускається. Електродугова металізація, газополуменеве, плазмове, детонаційно-газове і газодинамічне напилювання, а також інші термічні процеси обробки металів, матеріалів та виробів середніх і малих розмірів у стаціонарних умовах слід виконувати в спеціально обладнаних кабінах. Кабіна повинна мати відкритий верх та виготовлятися з негорючих матеріалів. Між стіною та підлогою кабіни необхідно залишати зазор, висота якого визначається видом технології. Площа кабіни повинна бути достатньою для розміщення виробничого обладнання, стола, пристрою місцевої витяжної вентиляції, оброблюваного виробу та інструменту. Експлуатація балонів, контейнерів зі стиснутим і скрапленим газом, рамп, повинна здійснюватись у відповідності з нормами ДНАОП 0.00-1.07-94.

«Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением». Балони зі стиснутими газами слід розташовувати на відстані не ближче 5 м від зварювального пальника і 1 м – від отоплювальних приладів. У разі наявності на отоплювальних приладах екранів, що захищають балони від нагрівання, відстань від балона до екрана має бути не меншою 0,1 м.

### 5.2.2. Вимоги до виробничих приміщень

Робочі місця для електродугової металізації, газополуменового, плазмowego, детонаційно-газового та газодинамічного напилювання повинні захищатися стаціонарними або переносними світлонепроникними огорожами з матеріалів, що не згорають, і, висота яких має бути не менш ніж 2,5 м та забезпечувати надійність захисту. 12 Відстань між устаткуванням, від устаткування до стін та колон приміщення, інших споруд, ширина проходів та проїздів повинні відповідати

чинним будівельним нормам, нормам технологічного проектування цехів та ГОСТ 12.3.002-2014.

Ширина проходів по периметру робочого стола, стенда, виробу, над яким працюють, повинна бути не менш 1 м. Підлоги для виробничих приміщень для виконання електродугової металізації, газополуменевого, плазмового, детонаційно-газового та газодинамічного напилювання мають бути виготовлені з матеріалів, що не згоряють і мають малу теплопровідність. Підлога повинна мати рівну не ковзку поверхню та задовольняти санітарно-гігієнічним вимогам. Виробничі приміщення повинні бути обладнані загальнообмінною припливновитяжною вентиляцією відповідно до СНиП 2.04.05-91\*У. Повітрообмін виробничих приміщень належить розраховувати на розведення шкідливих речовин, не вловлених місцевими витяжними пристроями, до рівня ГДК.

При цьому кількість повітря, що подається припливними системами, повинна розраховуватися у відповідності з ДБН В.2.5-67:2013 [50]. Видалене повітря з виробничих приміщень в атмосферу повинно проходити фільтрацію (очищення) від шкідливих речовин до концентрацій, що не перевищують допустимих рівнів викидів, у відповідності з СНиП 2.04.05-91\*У. Подавання припливного повітря треба здійснювати в робочу зону або у напрямку робочої зони. Температура повітря, що подається вентиляційними установками, повинна бути не нижче +20 0С згідно з ДСН 3.3.6.042-99 [43].

Параметри мікроклімату виробничих приміщень повинні відповідати вимогам [43]. Якщо інтенсивність теплового опромінення працюючих перевищує значення ДСН 3.3.6.042- 99 [43], слід передбачати спеціальні засоби захисту: екранування джерела, повітряне душення, засоби індивідуального захисту. Рівні шуму, ультразвуку та інфразвуку мають відповідати вимогам [45], а загальної і місцевої вібрації – [46]. Освітлення цехів, ділянок і робочих місць, де виконуються роботи з електродугової металізації, газополуменевого, плазмового, детонаційно-газового та газодинамічного напилювання, повинно відповідати ДБН В.2.5-28-2006 [51].

Під час виконання цих робіт всередині замкнутих і важкодоступних просторів (посудин, корпусів, відсіків) освітлення повинно здійснюватися зовнішніми джерелами світла спрямованої дії чи місцевим освітленням з напругою не більш 12 В, при цьому освітленість робочої зони повинна становити не менше 30 лк.

### 5.2.3. Вимоги до організації робочих місць

Організація, облаштування та оснащення робочих місць для електродугової металізації, газополуменевого, плазмового, детонаційно-газового та газодинамічного напилювання мають відповідати ДСТУ ГОСТ 12.2.061:2009 [52]. Такі робочі місця можуть бути стаціонарними, нестаціонарними, постійними і непостійними (тимчасовими). Стаціонарні місця для працюючих в сидячому положенні повинні бути укомплектовані робочими кріслами з регульованими параметрами згідно з ДСТУ 7234:2011 [53].

Сидіння і спинка крісла повинні бути виконані з негорючих матеріалів, які легко очищуються, з низьким коефіцієнтом теплопровідності. Постійні робочі місця, які живляться електричною енергією від багатопостових джерел повинні бути обладнані щитками з сигнальною лампою, що показує робітнику наявність або відсутність напруги в електричному ланцюгу виробничого обладнання. Під час виконання робіт з електродугової металізації, газополуменевого, плазмового, детонаційно-газового та газодинамічного напилювання в одному приміщенні з іншими роботами необхідно вживати заходи, що виключають можливість впливу небезпечних та шкідливих виробничих факторів на працюючих.

Обробка виробів малих і середніх розмірів відкритою дугою у стаціонарних умовах повинно провадитись у спеціально обладнаних кабінках. Кабіни мають бути з відкритим верхом, а між стінками kabіни та підлогою належить залишати зазор не менший 50 мм, при використанні газової обробки металів – не менше 300 мм. Вільна площа в кабіні на одне робоче місце повинна складати не менше 3 м<sup>2</sup>. Кабіна на два і більше робочих місць, а також робочі місця на поточно-



конвеєрних лініях повинні бути розділеними захисними ширмами, згідно з ГОСТ 12.2.062-81, що захищають працюючих від випромінювання дуги, бризок розплавленого металу та забезпечують достатній простір кожному працюючому. На нестаціонарних робочих місцях під час виконання робіт з електродугової металізації та плазмового напилювання для захисту робочого персоналу, що знаходиться неподалік, від випромінювань дуги рекомендується користуватись мобільними захисними екранами [54].

Розташування обладнання належить провадити таким чином, щоб ширина проходів складала:

- між стіною будинку та обладнанням
- не менш 0,5 м;
- між стаціонарними джерелами живлення
- не менш 0,8 м;
- між стаціонарним та багатопостовими джерелами живлення електрошлакового переплавлення, а також рухомими механізмами та деталями, що переміщуються – не менш 1,5 м;
- між обладнанням та місцями складування
- не менш 1,0 м.

Трубопроводи гідросистем високого тиску, що розташовані в зоні роботи обслуговуючого персоналу, повинні бути закриті захисними екранами. Стаціонарні робочі місця для електродугової обробки (металізації) металоконструкцій масою понад 15 кг повинні бути обладнані вантажопідйомними пристроями. Стаціонарні робочі місця, пости та стенди для тих технологічних процесів, які супроводжуються виділенням у повітря робочої зони аерозолів і газів, належить обладнати пристроями місцевої витяжної вентиляції та атестувати їх на відповідність нормам ГДК. Робочі місця для електродугової та плазмової обробки виробів з підігріванням має бути обладнане екранами, укриттям для підігрітих виробів, які забезпечують зменшення опромінення працюючого відповідно з вимогами ДСН 3.3.6.042-99 [43].

Обладнання для електродугової та плазмової обробки матеріалів повинно мати захисні (переносні [55] або стаціонарні) екрани, які забезпечують захист працюючих від оптичного випромінювання. Під час використання електродугових та плазмових технологій на відкритому повітрі над обладнанням та робочими місцями повинні бути споруджені навіси з негорючих матеріалів. За відсутності навісів такі роботи під час атмосферних опадів проводити забороняється.

Роботи з використанням електродугової металізації, газополуменевого, плазмового, детонаційно-газового та газодинамічного напилювання в замкненому або обмеженому просторі повинні провадитись під контролем двох спостерігачів з кваліфікаційною групою з безпеки праці не нижче II, яким належить знаходитись ззовні. Працівник, що виконує ці роботи повинен мати запобіжний пояс з канатом, кінець якого знаходиться у спостерігачів. Робочі місця, розташовані вище 1,3 м від рівня землі або суцільного покриття повинні бути оснащені огорожами висотою не менш 1,1 м згідно з ГОСТ 12.4.059-89. Для виконання робіт на висоті більше 5 м слід установлювати риштування (площадки) з негорючих матеріалів згідно з вимогами ДСТУ Б В.2.8-44:2011. Працюючі зобов'язані користуватись вогнестійкими запобіжними поясами та страхувальними фалами з карабінами, а також спеціальними сумками для інструменту.

Не допускається проведення електродугових, плазмових та газополуменевих робіт без вживання заходів, що виключають можливість пожежі як під час цих робіт, так і після закінчення. 14 Під час проведення електродугових, плазмових та газополуменевих робіт при температурі нижче -200С повинні бути забезпечені умови, які відповідають вимогам ДБН В.2.2-28-2010.

#### 5.2.4. Вимоги до вентиляції

При проведенні електродугових, плазмових, газополуменевих та інших термічних процесів обробки матеріалів доцільно застосовувати місцеву вентиляцію. В інших випадках може використовуватись загальнообмінна

вентиляція. Вона також повинна застосовуватись в комбінації з місцевою вентиляцією, розрахованою на видалення з виробничого приміщення шкідливих речовин не локалізованих місцевими витяжними пристроями (відсмоктувачами). Конструкція місцевих відсмоктувачів вибирається в залежності від виду технологічного процесу, обладнання та оснащення. Вона повинна забезпечувати необхідну чистоту повітря на робочому місці при мінімальних витратах повітря, яке видаляється, запобігати розповсюдженню шкідливих речовин по об'єму приміщення, не заважати виконанню технологічних операцій. Прив'язка відсмоктувачів до обладнання повинна здійснюватись з урахуванням максимально можливого приближення його до джерела шкідливих виділень. Типові схеми та конструкції відсмоктувачів, а також методи їх розрахунку узагальнено в методичних вказівках до проектування [56]. Кількість повітря, яку належить видалити або подати вентиляційною установкою (необхідний повітрообмін виробничих приміщень  $L$  в  $\text{м}^3/\text{год}$ ) визначається різними методами в залежності від конкретних умов: за інтенсивністю виділення шкідливих речовин в повітря приміщення, за заданою швидкістю всмоктування повітря біля джерела утворення аерозолів та газів, за емпіричними формулами або повітрообміном, що рекомендується.

#### 5.2.5 Загальні вимоги електробезпеки

Основними причинами ураження персоналу електричним струмом є доторкання: до струмоведучих частин, що знаходяться під напругою в робочому режимі; до струмоведучих частин, що випадково опинились під напругою; до неструмоведучих частин, що опинились під напругою внаслідок пошкодження електроізоляції; ураження електричною дугою та напругою кроку. Виробничі приміщення з точки зору ураження електричним струмом належать до категорії особливо шкідливих. Експлуатація зовнішніх електроустановок прирівнюється до умов експлуатації в особливо небезпечних приміщеннях. 16 Електротехнічні вироби з точки зору безпеки повинні відповідати вимогам ПУЕ-2017 [57].

В їх конструкції для захисту від ураження струмом в робочому режимі можуть використовуватись:

- ізоляція струмоведучих частин (робоча, додаткова, подвійна, посилена);
- безпечна напруга в електричному колі;
- елементи для захисного заземлення металевих неструмоведучих частин виробу, які можуть опинитись під напругою (при пошкодженні ізоляції, порушенні режиму роботи тощо);
- оболонки для запобігання можливості випадкового доторкання до струмоведучих частин та частин, що рухаються і нагріваються;
- блокування для запобігання помилкових дій та операцій;
- екрани та інші засоби захисту від небезпечного і шкідливого впливу електромагнітних полів, теплового, оптичного й рентгенівського випромінювання;
- засоби вилучення небезпечних і шкідливих речовин, що утворюються в процесі експлуатації;
- елементи, призначені для контролю ізоляції та сигналізації щодо її пошкодження, а також для вимикання виробу при зменшенні опору ізоляції нижче від допустимого рівня;
- попереджувальні надписи, знаки, фарбування в сигнальні кольори та інші засоби сигналізації про небезпеку (у поєднанні з заходами безпеки);
- виконання вимог ергономіки. Для захисту від ураження струмом в аварійному режимі застосовують: заземлення, вимикання, подвійну ізоляцію. Заземлення застосовують завжди при живленні від мереж з ізольованою нейтраллю та за наявності мережі з глухозаземленою нейтраллю при напрузі понад 1000 В. Захисне вимикання – високонадійна швидкодіюча система захисту, яка застосовується в пересувних електроустановках, які використовують як генератор з ізольованою нейтраллю, а також в інших випадках, коли умови експлуатації потребують високого рівня безпеки.

### 5.2.6 Вимоги до експлуатації електричного обладнання

Електричне обладнання, що застосовується у виробничих процесах, у тому числі технологічне, механічне і допоміжне, має відповідати вимогам [58, 57]. Пристрої, які використовуються для електродугового та плазмового напилення, повинні задовольняти вимоги [59].

Підключення та вмикання мережі живлення устаткування для дугового і плазмового напилювання, спостереження за його справним станом, а також ремонт повинен проводити електротехнічний персонал, що має групу допуску не нижче III. Джерела живлення повинні підключатися до розподільних електричних мереж з напругою не вище 600 В. Безпосереднє живлення зварювальної дуги від силової, освітлювальної та контактної мережі не допускається. Пересувні джерела живлення на час їх переміщення необхідно відключати від мережі. Біля роз'ємів (затискачів) для підключення джерел зварювання повинен бути напис

«МЕРЕЖА!». На видному місці корпусу джерела живлення повинен бути напис «Без заземлення не вмикати!». З'єднування джерел живлення з електродуговими та плазмовими установками повинно здійснюватися кабелями. Виробниче електрообладнання повинно бути обладнане вольтметром або сигнальною лампочкою, які вказують на наявність або відсутність напруги в електричному колі. В установках ручного і механізованого дугового напилювання вольтметр та сигнальна лампочка розташовуються на панелі джерела живлення, а в установках автоматичного дугового напилювання – на пульті керування. Металеві частини всіх видів електричного обладнання, які в процесі експлуатації можуть опинитись під напругою, повинні бути надійно заземлені. Кожна одиниця електричного обладнання повинна мати окремий провід заземлення, який приєднується до магістралі заземлення. Вимоги до виконання захисного заземлення на всіх видах електричного обладнання мають відповідати вимогам [59].

Гранично допустимі рівні напруги дотику та струмів, що можуть виникати на електричному обладнанні, мають відповідати вимогам [59]. Допуск осіб до

виконання електродугового та плазмового напилювання повинен здійснюватися після їх ознайомлення з технічною документацією і проведення інструктажу з експлуатації обладнання та охорони праці. Не дозволяється провадити ремонт електричного обладнання, що знаходиться під напругою. Електричне обладнання повинно регулярно перед початком роботи (кожної зміни) підлягати перевірці на відсутність замикання, оголених струмоведучих частин, справність ізоляції, цілісність проводів та кабелів живлення, а також справність пристроїв (компонентів) систем безпеки праці (блокувальних пристроїв тощо) [60, 61].

#### 5.2.7 Електробезпека виконання робіт

Корпус будь-якої електродугової установки необхідно заземлювати. Захисне заземлення і занулення виконується згідно з вимогами [20]. Послідовне включення в заземлюючий провідник декількох апаратів забороняється. Окремі елементи електричного кола, а також відрізки кабелів при нарощуванні довжини повинні бути з'єднані роз'ємними з'єднувальними муфтами. Забороняється з'єднувати електричні кола скрутками з оголеним кабелем.

Струмопідвідні кабелі пристрою для створення електричної дуги повинні бути по всій довжині ізольовані та захищені від механічних ушкоджень. Зворотнім проводом, що з'єднує оброблювальні вироби з джерелом струму, можуть слугувати гнучкі, а також металічні шини достатнього перерізу, металеві плити і сама оброблювана конструкція. Використання в якості зворотнього проводу мережі заземлення металевих будівельних конструкцій будівлі, комунікацій і не електродугового технологічного обладнання забороняється. З'єднання між собою окремих елементів, що використовуються в якості окремого проводу, повинно виконуватися ретельно (зварюванням 18 або зажимом струбциною).

Зажим вторинної обмотки трансформатора, до якого підключається зворотній провід, а також аналогічні зажими у випрямлячах і генераторах електричного струму, в яких обмотки збудження дуги підключаються до

розподільчої електричної мережі без розділяючого трансформатора, необхідно заземлювати. Якщо установка має кілька пультів керування, обслуговування яких з одного робочого місця неможливе, кожен пульт повинен бути обладнаний апаратом ручного аварійного відключення.

На установках або автоматичних лініях з великим фронтом обслуговування кнопки аварійного відключення повинні розташовуватися одна від одної на відстані не більше 10 м. Кнопки керування, що використовуються в таких випадках, повинні мати защібки, які забезпечують тільки примусове повернення контактів у початковий стан. Якщо для забезпечення безпеки працюючих установкою необхідно керувати одночасно обома руками, система керування повинна забезпечити дворучне включення, що допускає можливість пуску установки тільки одночасним включенням пускових кнопок (рукояток), які повинні розташовуватися на відстані 300-600 мм одна від одної. В особливо відповідальних випадках для дворучного включення повинна бути передбачена протизаклинна схема, яка виключає можливість роботи на установці, якщо одна з кнопок (рукояток) включення заклинена.

Схема приєднання декількох джерел струму, що працюють на одну електричну дугу, повинна виключати можливість одержання між виробом і електродом напруги, що перевищує найбільшу напругу холостого ходу одного з джерел електричного струму. Електричні установки мають бути захищені запобіжниками або автоматами зі сторони мережі живлення. Багатопостові електричні агрегати, крім захисту з боку мережі живлення, повинні мати у загальному проводі електродугового ланцюга автоматичний вимикач та запобіжники на кожному проводі на робочому місці. Усі електродугові установки з джерелами змінного і постійного струму у випадках роботи в особливо небезпечних умовах (всередині металевих ємностей, колодязів, відсіків, на понтонах тощо) повинні бути обладнані пристроями автоматичного відключення холостого ходу або обмеження його напруги до 12 В не пізніше 1 с після розмикання електродугового ланцюга. Обмежник, виконаний у вигляді окремої приставки, має бути заземлений окремим проводом. Замкнуті простори

резервуарів, котлів, металевих ємностей, відсіків і т.д. під час виконання робіт з використанням електричної дуги повинні освітлюватися світильниками з напругою не вище 42 В, установленими ззовні оброблюваного виробу, або ручними переносними світильниками закритого виконання з напругою не більш 12 В.

Трансформатор для переносних світильників необхідно встановлювати поза оброблюваним виробом, а його вторинну обмотку – заземлити. Застосування автотрансформаторів для зниження напруги живлення світильників забороняється. Електродуговий інструмент не повинен мати відкритих струмоведучих частин, а рукоятки необхідно виготовляти із струмоізолюючих матеріалів. Забороняється залишати на робочому місці електродуговий інструмент, що знаходиться під напругою. Пересувні електродугові установки під час їх пересування необхідно відключати від мережі. Приєднання і від'єднання від мережі електродугових установок, переключення струму рукоятками, розташованими всередині установки за дверцятами, що не мають пристрою блокування, а також спостереження за справним станом установок у процесі експлуатації повинно виконуватися електротехнічним персоналом. Весь персонал, що обслуговує електродугові установки, повинен періодично проходити інструктаж про безпеку електричного струму і способи надання першої допомоги.

#### 5.2.8 Захист від теплового випромінювання

Інтенсивність теплового випромінювання в оптичному діапазоні (ультрафіолетове, видиме, інфрачервоне) на постійних робочих місцях не повинна перевищувати допустимих величин, наведених у таблиці 5.1 [43].

Якщо за технічних причин неможливо досягти зазначених щільностей потоку випромінювання, то необхідно застосовувати заходи захисту: екранування джерела випромінювання, застосування кабін чи поверхонь з радіаційним охолодженням, повітряним душенням (з допустимою швидкістю руху повітря



меншою 3,5 м/с), використання теплозахисних килимків, взуття, охолоджуваних костюмів. Захист працівників від інфрачервоного випромінювання забезпечується скороченням впливу джерел теплового випромінювання. \* Допустима інтегральна інтенсивність теплового випромінювання не повинна перевищувати 350 Вт/м<sup>2</sup>.

#### 5.2.9 Вимоги до застосування засобів індивідуального захисту

Працівники, які виконують роботи з електродугової металізації, газополуменевого напилювання, плазмового напилювання, детонаційно-газового напилювання та газодинамічного напилювання, повинні забезпечуватись засобами індивідуального захисту згідно з галузевими нормами, в залежності від характеру дії небезпечних і шкідливих виробничих факторів і відповідних вимог ДСТУ 7239:2011 [62]. Виріб та призначення засобів індивідуального захисту органів дихання повинні провадитися згідно з вимогами ДСТУ EN 133:2005 [63]. Під час виконання робіт з використанням відкритої електричної дуги для захисту очей та обличчя працівників від випромінювання дуги, бризок розплавленого металу та іскор 21 слід застосовувати щитки згідно з ГОСТ 12.4.035-78 зі світлофільтрами за ДСТУ EN 169- 2001 [64]. Для захисту рук необхідно застосовувати рукавиці згідно з ДСТУ EN 420-2017 [65].

Для зниження небезпеки ураження електричним струмом працюючі повинні забезпечуватися килимками діелектричними гумовими, а також в умовах підвищеної небезпеки (обмежених просторах) взуттям гумовим і рукавицями типу Ен та Ев згідно нормативно-технічної документації. Для захисту голови під час зварювання великогабаритних виробів в умовах підвищеної небезпеки та електрошлакового зварювання повинні застосовуватися захисні каски згідно з ДСТУ EN 397:2001 [66].

#### 5.2.10 Вимоги безпеки в надзвичайних ситуаціях

До видів небезпеки, що можуть статися на виробництві, належать: пожежа; вибух (усередині обладнання, будівлях або навколишньому середовищі); розрив

або зруйнування обладнання; викид шкідливих речовин; сполучення перелічених видів небезпеки [67, 68]. З метою запобігання виникненню та ліквідації надзвичайних (аварійних) ситуацій на підприємстві має бути план локалізації та ліквідації аварійних ситуацій і аварій у відповідності до положення [67, 68].

Під час аналізу небезпеки підприємства (об'єкта) потрібно визначити всі можливі аварійні ситуації і аварії, в тому числі й малоймовірні, з катастрофічними наслідками, які можуть виникати на підприємстві, розглянути сценарії їхнього розвитку і оцінити наслідки. Виявлення можливостей і умов виникнення аварій має виконуватись на основі аналізу особливостей роботи як окремого обладнання (апаратів, машин тощо), так і їх групи (технологічних блоків), а також з урахуванням небезпечних властивостей речовин і матеріалів (вибухопожежонебезпечних та шкідливих), що використовуються у виробництві. При цьому слід враховувати параметри стану речовин (температура, тиск, агрегатний стан тощо) і стан обладнання, які відповідають як нормальному технологічному режиму, так і режимам, які можливі при настанні й розвитку аварії.

#### 5.2.11. Пожежна безпека

Згідно з НАПБ Б.03.002-2007 [69] приміщення, у яких виконуються роботи з електродугової металізації, газополуменевого напилювання, плазмового напилювання, детонаційно-газового напилювання та газодинамічного напилювання, за вимогами вибухопожежної небезпеки належить до категорії Г (негорючі речовини й матеріали в 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). Згідно з ДНАОП 0.00-1.21-98 та ДНАОП 0.00-1.32-01 у приміщенні виділяється зона II-Па, де обертаються тверді горючі речовини.

Категорія за БЕМЗ (безпечний експериментальний зазор між фланцями оболонки, мм) – ПА (> 0,9 мм). Група вибухобезпеки сумішей (за температурою

самозапалювання) – ТІ (ТС) В > 450 °С. Ступінь вогнестійкості будівлі – І (не допускається поширення вогню на основні будівельні конструкції), мінімально допустиме обмеження вогнестійкості – 2,5 год, максимально допустиме обмеження поширення вогню для внутрішніх стін – 25 см.

Пожежна безпека (ГОСТ 12.1.004-91) забезпечується:

- запобігання спалаху ізоляції при КЗ за рахунок максимального струменевого захисту;
- запобігання утворення горючого середовища за рахунок надійної герметизації обладнання, обмеженням застосування і зберігання горючих та вибухонебезпечних речовин;
- застосування пожежної сигналізації з датчиком (ИДФ-І, ДПІД і др.);
- використанням вогнегасників (клас пожежі В): ОХП-10, ОХВП-10, ОВП-7, ОХ-7, ОП-10А; для класу пожежі Е вогнегасники типу УО, ОП-10А (вибрати тип і кількість відповідно до НАПБ Б.03.002-2007). При організації технологічного процесу дотримуються всіх вимог електростатичної іскробезпеки. Передбачається також аварійне зливання пожежонебезпечних рідин, аварійне втручання горючих газів із апаратури. Рекомендована періодична очистка робочого місця цеху, апаратури від горючих відходів, відкладання пилу, вилучення пожежонебезпечних відходів виробництва, заміна ЛВЖ і ГЖ на пожежонебезпечні технічні миючі засоби.

Передбачено пристрої, які забезпечують обмеження поширення пожежі (описати конкретно). Приміщення обладнується засобами колективного та індивідуального захисту людей від небезпечних факторів пожежі та протидимного захисту. Тип виконання електрообладнання в приміщенні повинен відповідати класу зони пожежо- та вибухобезпечності. На ділянках виробничого приміщення, де застосовується електродугова металізація, газополуменеве напилювання, плазмове напилювання, детонаційно-газове напилювання та газодинамічне напилювання, передбачаємо встановлення протипожежних щитів, укомплектованих вуглекислотними вогнегасниками, баграми, ломами, відрами,

сокирами. Біля щитів передбачаємо наявність ящиків з піском, сухість якого регулярно перевіряється.

Для гасіння можливих пожеж передбачаємо також використання азбестових покривал. Для автоматичного виявлення пожеж у виробничому приміщенні, в якому застосовується газотермічне напилювання, передбачаємо наявність датчиків, які своєчасно сповіщають про виниклу пожежу і дають команду на вмикання автоматичної системи гасіння пожежі.

#### 5.2.12 Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях

У випадку пробією електричної напруги на корпус електродугового агрегату необхідно відключити рубильник і довести до відома про це майстра або начальника дільниці. У випадку потрапляння кого-небудь під напругу, необхідно відключити електродуговий агрегат від мережі, покласти потерпілого на дерев'яний настил, підклавши під голову ватник, викликати лікаря за телефоном 103 і, якщо це необхідно, зробити пострадалому штучне дихання.

У випадку загорання електродугового агрегату необхідно відключити рубильник і приступити до гасіння пожежі за допомогою вогнегасника. Кожен робітник і службовець, що виявив пожежу або загорання, зобов'язаний: – негайно сповістити про це в заводську пожежну охорону за телефоном 101; – приступити до гасіння вогню пожежі наявними в цеху (на дільниці) засобами пожежогасіння (вогнегасник, пісок, пожежний кран тощо); – викликати до місця пожежі посадових осіб (начальника цеху, дільниці). У випадку одержання травми необхідно довести до відома про це майстра, начальника дільниці та звернутися в медпункт.

## 6 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ

«Розробка плазмотронів на вуглеводневих сумішах для розпилення дроту та дослідження їх енергетичних характеристик»

### 6.1 Опис ідеї проекту

Розглянувши в попередніх розділах розробку плазмотронів на вуглеводневих сумішах для розпилення дроту та дослідження їх енергетичних характеристик, що може використовуватися в різних напрямках виробництва. В цьому розділі буде проведено аналіз стартап-проекту, який визначить вигоди які може отримати користувач.

Таблиця 6.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Розробка плазмотронів на вуглеводневих сумішах для розпилення дроту	застосування у машинобудуванні; застосування у ремонтному виробництві;	Формування компактного плазмового потоку, що забезпечує плавлення і розгін частинок напилюваного матеріалу і утворення якісних покриттів

*Проведено аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї порівняно із пропозиціями конкурентів:*

– визначаємо попереднє коло конкурентів (проектів-конкурентів) або товарів-замінників чи товарів-аналогів, що вже існують на ринку, та проводимо збір інформації щодо значень техніко-економічних показників для ідеї власного проекту та проектів-конкурентів відповідно до визначеного вище переліку;

*Визначено перелік наступних конкурентів:*

Конкурент 1– ООО «Укр-Евро-СБ» Хмельницька область;

Конкурент 2– ООО «НВФ КМТ 2002» Полтавська область;

## Конкурент 3– ООО «НТМА» м. Івано-Франківськ.

Таблиця 6.2. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту.

№ п/п	Техніко- економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів Технологія зварювання				W (слабка сторона )	N (нейтрал ьна сторона)	S (сильна сторона )
		Мій проект	Конку- рент 1	Конку- рент 2	Конку- рент 3			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.	Використання та компанування нестандартного обладнання	+	-	-	-			+
2.	Розробка креслень	+	-	+	+			+
3.	Продуктивність	+	-	-	-			+

Після порівняння характеристик проекту з конкурентами був визначений перелік слабких, сильних та нейтральних характеристик.

## 6.2 Технологічний аудит ідеї проекту

В межах даного підрозділу проведено аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею створення проекту. Визначено технологічну здійсненність ідеї проекту, яка передбачає аналіз таких складових в таблиці 6.3.

Таблиця 6.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Створення більш продуктивного плазмотрону	Інженерні та конструкторські рішення	Наявна, але потребує наявності спеціальних креслень	Доступні

Проаналізувавши таблицю можна зробити висновок, що даний проект можна реалізувати.

### 6.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Визначаємо ринкові можливості, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкові загрози, які можуть перешкодити його реалізації. Це дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів.

Спочатку проведемо аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку, які наведені у таблиці 6.4

Таблиця 6.3 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту.

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	3
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	100
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Наявність креслень, представлення результатів проектування
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Не змінна
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	45%

За попереднім оцінюванням ринок має зростаючу динаміку і хороший попит на запропонований нами продукт, тому робимо висновок, що ринок є привабливим для входження.

Далі визначаємо потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та формуємо орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи (табл. 6.5).

Таблиця 6.4. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту.

<b>№ п/п</b>	<b>Потреба, що формує ринок</b>	<b>Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)</b>	<b>Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів</b>	<b>Вимоги споживачів до товару</b>
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
1	Простота конструктивного виконання	Заводи з машинобудувань	- креслення плазмотрону;	- легкість заміни;
2	Мінімальні масо-габаритні показники	Ремонтне будівництво	- деталі з менш вагомого матеріалу	- зручність у використанні;

При застосуванні даної технології існують певні загрози. Для попередження таких ситуацій необхідно якісне обладнання, а також виконувати роботи мають лише високо кваліфіковані робітники. Також, повинно бути своєчасне технічне обслуговування даного продукту (таблиця 6.6).

Таблиця 6.5. Фактори загроз

<b>№ п/п</b>	<b>Фактор</b>	<b>Зміст загрози</b>	<b>Можлива реакція компанії</b>
1	Конкуренція	Наявність більш дешевих плазматронів	Зацікавити потенційних клієнтів високою швидкістю виконання замовлення

В таблиці 6.6 ми визначили фактор загрози яка перешкоджає ринковому впровадженню нашого проекту, а також можливу реакцію на фактор щоб звести до мінімуму його вплив.

Але поряд із колом загроз існують і певні можливості (таблиця 6.7).



Таблиця 6.6.Фактори можливостей.

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	2	3	4
1	Можливість заміни плазмотрона та окремих його частей	Швидке виготовлення плазмотронів та його частей із різних матеріалів	Пропонувати постійним клієнтам знижку на зміну плазмотрона

В таблиці 6.7 ми визначили фактори можливостей які сприяють ринковому впровадженню нашого продукту, а вигоди які компанія може отримати відповідно від реакції на той чи інший фактор.

Таблиця 6.7.Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1	2	3
1. Тип конкуренції - олігополія	Характеризується невеликою кількістю фірм (від 2 до 10), обгороджених бар'єрами, які перешкоджають вступу в галузь нових фірм, мають контроль над цінами, але при змові з іншими олігополістами. Головною рисою олігополії є те, що кількість фірм така мала відносно розмірів ринку, що кожна з фірм-олігополістів визнає тісний взаємозв'язок одна з одною	Пропонувати технологію по найнижчим можливим цінам, замінити обладнання на аналогічне дешевше, спробувати домовитись з фірмами олігополістами про співпрацю.
2. За рівнем конкурентної боротьби- національний	Характеризується ринком збуту. Національний – на рівні країни в межах якої ведеться конкурентна боротьба.	Робити презентації з готовими рішеннями для підприємств, що займаються металоконструкціями, висвітлювати плюси своєї технології, брати участь у різноманітних технічних виставках.
3. За галузевою ознакою - внутрішньогалузева	Галузева конкуренція передбачає суперництво окремих підприємств-продавців товарів та послуг у задоволенні потреб споживачів	Пропонувати адаптацію технології до різних виробничих потреб,

Кінець табл. 6.8

4. Конкуренція за видами товарів: - товарно-родова	Характеризується товарами одного виду	Пропонувати можливості розробки автоматизованої технології
5. За характером конкурентних переваг - нецінова	Проводиться головним чином за допомогою вдосконалення якості продукції, технології виробництва, інновацій та нанотехнологій, патентування і брендування.	Застосовувати більш досконале обладнання в своїх технологічних рішеннях
6. За інтенсивністю - не марочна	Роль торгової марки незначна, хоча самі марки можуть бути присутніми на ринку	Відповідально підходити до роботи з клієнтами, якісно виконувати свою роботу і таким чином здобути визнання на ринку

В даній таблиці ми проаналізували ринок збуту нашого продукту і визначили загальні риси конкуренції на ньому.

Після аналізу конкуренції проведемо більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі.

Таблиця 6.8. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером.

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу	ООО «НТМА» ООО «НВФ КМТ 2002» ООО «Укр-Евро-СБ»	<u>ООО«Київзварювання»</u>	Росія Китай Латвія	Компанії з продажу плазмотронів	Технології побудовані за допомогою інших методів
Висновки:	Інтенсивність конкурентної боротьби з боку прямих конкурентів – є значною	- є можливості входу в ринок - є потенційні конкуренти	Постачальники диктують умови роботи на ринку: - відповідно оновлені технології; - дають високі гарантії.	Клієнти диктують умови роботи на ринку: - Відповідне наповнення технологічних та маршрутних карт;	Обмеження для роботи на ринку через товари заміники

Після всіх аналізів визначається та обґрунтовується перелік факторів конкурентоспроможності. Поки проект не впроваджено в життя, це важко зробити точно, можна дати лише попередню оцінку конкурентоспроможності.

Таблиця 6.9.Обґрунтування факторів конкурентоспроможності.

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Простота конструктивного виконання	Забезпечує якісний ремонт в умовах виробництва
2	Здатність формувати компактний високотемпературний газовий потік	Може забезпечити ефективне нагрівання до необхідної температури матеріалу, що обробляється

В таблиці 6.10 на основі аналізу проведеного в таблиці 5.9 визначили та обґрунтували фактори конкурентоспроможності нашого проекту.

Таблиця 6.10. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «Стенд з обладнанням для складання та зварювання листів обичайки».

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з нашою технологією						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Простота конструктивного виконання	1						+	
2	Здатність формувати компактний високотемпературний газовий потік	1						+	

Таблиця 6.11. SWOT- аналіз стартап-проекту.

<b>Сильні сторони:</b> - висока швидкість виконання замовлення; - відповідність конструкції всім нормативним вимогам; - продуктивність;	<b>Слабкі сторони:</b> - висока вартість автоматизованих комплексів та допоміжного обладнання - досить великі витрати часу для облаштування обладнання на конструкцію - висока вартість ремонту у випадку поломки
<b>Можливості:</b> - попит; - корисність;	<b>Загрози:</b> - конкуренція

В таблиці 6.12 проводимо перелік сильних та слабких сторін. А також ринкових загроз та ринкових можливостей який складаємо на основі факторів загроз і можливостей який ми складали раніше. Ринкові загрози та можливості на відміну від факторів ще не є реалізованими на ринку та мають певну ймовірність здійснення.

Визначені альтернативи аналізуються з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів.

Таблиця 6.12. Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту.

№ п/п	Альтернатива комплекс заходів) (орієнтовний поведінки ринкової	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Стратегія нейтралізації ринкових загроз сильними сторонами стартапу	75%	1 рік
2	Стратегія компенсації слабких сторін стартапу наявними ринковими можливостями	40%	1 рік

Проводимо аналіз розроблених нами альтернатив ринкового впровадження і з зазначених альтернатив обираємо ту яка має найбільшу ймовірність отримання ресурсів, а також є найшвидшою в реалізації. Отже обираємо стратегію нейтралізації ринкових загроз сильними сторонами стартапу наявними ринковими можливостями.

#### 6.4. Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів.

Таблиця 6.13. Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Заводи машинобудування	60%	80%	80%	10%
2	Ремонте виробництво	70%	90%	90%	30%

За результатами аналізу потенційних груп споживачів ми обрали цільові групи, для яких будемо пропонувати свою програму для оптимізації робочих центрів та визначили стратегію охоплення ринку: стратегію концентрованого маркетингу.

Для роботи в обраному сегменті ринку необхідно сформулювати базову стратегію розвитку.

Таблиця 6.14. Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
	Стратегія спеціалізації	Стратегія спеціалізації	Передбачає концентрацію на потребах одного цільового сегменту, без прагнення охопити увесь ринок. Мета тут полягає в задоволенні потреб вибраного цільового сегменту краще, ніж конкуренти	Стратегія спеціалізації

За базову стратегію розвитку було взято стратегію спеціалізації, що передбачає концентрацію на потребах одного цільового сегменту, без прагнення охопити увесь ринок.

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (табл. 6.16).

Таблиця 6.15. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
	Ні	Так	Так - креслення - методи та засоби	Стратегія заняття конкурентної ніші

Таблиця 6.16 – Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1	Продуктивність	Стратегія спеціалізації	Застосування в наукових цілях	- Позиціонування за співвідношенням "ціна – якість" - Позиціонування за сферою застосування - Стратегія позиціонування за однією ознакою

Компанія за стратегію розвитку обрала спеціалізацію, і за цільові групи було обрано підприємства з ремонтного зварювання, хоча у них вже є постачальники,

але за рахунок нової технології компанія буде забирати клієнтів у конкурентів, і проводити підтримку та реалізовувати розвиток своєї конкурентної переваги.

### 6.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Під час розроблення маркетингової програми першим кроком є розробка маркетингової концепції товару, який отримає споживач. У таблиці 6.18 підсумовуємо результати аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 6.17. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару.

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	2	3	4
1	Простота конструктивного виконання	Забезпечує якісний ремонт в умовах виробництва	Легкість заміни деталей
2	Здатність формувати компактний високотемпературний газовий потік	Може забезпечити ефективне нагрівання до необхідної температури матеріалу, що обробляється	Збільшення швидкості праці даним плазмотроном

За рахунок ключових переваг товару і стратегії диференціації, що передбачає надання товару важливих з точки зору споживача відмінних властивостей за такою ж ціною як і у конкурентів буде розроблено маркетингову програму стартап-проекту.

Наступним кроком є визначення цінових меж, якими необхідно керуватися при встановленні ціни на потенційний товар, це передбачає аналіз цін товарів конкурентів, та доходів споживачів продукту (табл. 6.19)

Таблиця 6.19. Визначення меж встановлення ціни.

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	10000 грн	13000грн	20000грн	10000-13000 грн

В таблиці проаналізовано ринкові ціни на товари аналоги та замінники, а також середній рівень доходів споживачів. За отриманими даними буде встановлена верхня та нижня межа на нашу програму.

Таблиця 6.20 Формування системи збуту.

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Звична купівля з деяким змінами, або модифікована закупівля. Вона передбачає придбання дещо змінених товарів (послуг), або зміну ціни на товар (послугу), або зміну кількості постачання).	Доставка товару покупцю, його налагодження та запуск у виробництво.	Канал нульового рівня	Власна система збуту. Виробник безпосередньо продає товар клієнту, продаж через інтернет, торгівля через магазини, поштова торгівля

Спираючись на специфіку закупівельної поведінки цільових клієнтів було обрано власну систему збуту, коли виробник безпосередньо продає товар клієнту через торгівлю в магазинах, посылками чи в роздріб.

Таблиця 6.181. Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Бути на зв'язку	- електронна пошта - моб. телефон	Проектування технологічних процесів	Зацікавлення	«Наші плазмотрони – це крок у майбутнє»

### **Висновки до розділу**

Виходячи з отриманих результатів аналізу ринку, ціну на продукцію, її конкурентоспроможності, продуктивність роботи можемо зробити висновки, що впровадження даної технології є вигідним економічним кроком у розвитку власного бізнесу. З урахуванням того, що в подальшому можливо встановлення нових ділових зв'язків та вихід на нові ринки збуту, і подальше удосконалення запропонованої технології, це дозволить розширити бізнес и вийти компанії на новий рівень.

## ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Борисов Ю. С. Газотермические покрытия из порошковых материалов: справочник / Ю. С. Борисов, Ю. А. Харламов, С. Л. Сидоренко, Е. Н. Ардатовская. – К.: Наук. Думка, 1987. – 544 с.
2. Куницкий Ю. А. Некристаллические металлические материалы и покрытия в технике / Ю. А. Куницкий, В. Н. Коржик, Ю. С. Борисов. – К.: Техника, 1988. – 297 с.
3. Вилаге Б. Особенности газотермического напыления покрытий порошковыми проволоками (Обзор) / Б. Вилаге, К. Руппрехт, А. Похмурская // Автомат. сварка. – 2011. – № 10. – С. 26–30.
4. Катц Н. В. Металлизация распылением / Н. В. Катц. – М.: Машиностроение, 1966. – 200 с.
5. Роянов В. А. Дефекты, контроль и управление качеством при сварке и родственных технологиях: учебник (4-е изд.) / В. А. Роянов, В. Я. Зусин, С. С. Самотугин, И. В. Захарова. – Мариуполь: ПГТУ, 2014. – 390 с.
6. Кудинов В. В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование: уч. для вузов / В. В. Кудинов, Г. В. Бобров; под ред. д.т.н., проф. Б. С. Митина. – М.: Металлургия, 1992. – 432 с.
7. Пащенко В. М. Обладнання для газотермічного нанесення покриття [Текст]: навч. посіб. / В. М. Пащенко. – К.: ІВЦ “Політехніка”, 2001. – 416 с.
8. Линник В. А. Современная техника газотермического нанесения покрытий / В. А. Линник, П. Ю. Пекшев. – М.: Машиностроение, 1985. – 128 с.
9. Катц Н. В. Металлизация распылением / Н. В. Катц, Е. В. Антошин, Д. Г. Вадивасов и др. – М.: Машиностроение, 1966. – 199 с.
10. Петров С. В. Плазменное газозоудное напыление / С. В. Петров, И. Н. Карп. – К.: Наук. думка, 1993. – 499 с.
11. Петров С. В. Плазма продуктов сгорания в инженерии поверхности / С. В. Петров, А. Г. Саков. – К.: ТОПАС, 2000. – 220 с.



12. Wielage B. Thermisches Spritzen — Potenziale, Entwicklungen, Maerkte / B. Wielage, K. Bobzin, C. Rupprecht, M. Brahl // Thermal Spray: DVS «Verlag», 2008. – Bul. 1. – S. 30–36.
13. Хасуи А. Техника напыления. / А Хасуи. – М.: Машиностроение, 1975. – 288 с.
14. Хасуи А. Наплавка и напыление / А. Хасуи, О. Моригаки. – М.: Машиностроение, 1981. – 192 с.
15. Кречмар Э. Напыление металлов, керамики и пластмасс / Э. Кречмар. – М.: Машиностроение, 1966. – 432 с.
16. Донской А. В. Электроплазменные процессы и установки в машиностроении [Текст]: моногр. / А. В. Донской, В. С. Клубникин. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1979. – 221 с.
17. Кудинов В. В. Плазменные покрытия / В. В. Кудинов, отв. ред. акад. Н. Н. Рыкалин. – М.: Наука, 1977. – 184 с.
18. Борисов Ю. С. Плазменные порошковые покрытия / Ю. С. Борисов, А. Л. Борисова. – Киев: Техніка, 1986. – 223 с.
19. Дзюба В. Л. Фізика, техніка та застосування низькотемпературної плазми [Текст]: моногр. / В. Л. Дзюба, К. А. Корсунов. – Луганськ: вид-во СНУ ім. В.Даля, 2007. – 448 с.
20. Борисов Ю. С. Исследование структуры и свойств газотермических покрытий системы WC–Co–Cr, полученных высокоскоростными методами напыления / Ю. С. Борисов, Е. А. Астахов, А. П. Мурашов и др. // Автомат. сварка. – 2015. – № 10. – С. 26–29.
21. Григоренко Г. М. Особенности металлургических процессов при плазменно-дуговом напылении покрытий, полученных из стальной проволоки с порошковыми наполнителями WC и WC–Co / Г. М. Григоренко, Л. И. Адеева, А. Ю. Туник и др. // Современная электрометаллургия. – 2015. – № 4. – С. 14–24.
22. Коробов Ю. С. Совершенствование технологии нанесения покрытий на алюминиевые сплавы на основе математического моделирования процесса

электродуговой металлизации: автореферат дис. канд. техн. наук: 05.03.06. – Свердловск: Уральский политехнический институт, 1981. – 23 с.

23. Петруничев В. А. К механизму плазменного распыления проволоки / В. А. Петруничев, В. В. Титков // Физика и химия обработки металлов. – 1977. – № 1. – С. 14–16.

24. Походня И. К. Производство порошковой проволоки / И. К. Походня, В. Н. Шлепаков, В. Ф. Альтер и др. – К.: Вища школа. – 1980. – 231 с.

25. Харламов М. Ю. Нагрев и плавление проволоки анода при плазменно-дуговом напылении / М. Ю. Харламов, И. В. Кривцун, В. Н. Коржик и др. // Автомат. сварка. – 2011. – № 5. – С. 5–11.

26. Коржик В. Н. Технология и оборудование для плазменно-дугового напыления для восстановления ответственных деталей железнодорожного транспорта / В. Н. Коржик, М. Ю. Харламов, С. В. Петров и др. // Вест. Восточноукр. национ. ун-та им. В. Даля. – 2011. – № 14. – С. 76–82.

27. Григоренко Г. М. Особенности структуры и свойств плазменно-дуговых покрытий армированных упрочняющими частицами, полученных из проволок с порошковыми наполнителями WC и WC+NbC / Г. М. Григоренко, В. Н. Коржик, А. А. Чайка, Н. П. Лютик и др. // Технологические системы. – 2016. – № 2. – С. 26–36.

28. Харламов М. Ю. Формирование пленки жидкого металла на торце проволоки анода при плазменно-дуговом напылении / М. Ю. Харламов, И. В. Кривцун, В. Н. Коржик, С. В. Петров // Автомат. сварка. – 2011. – № 12. – С. 3–18.

29. Образование частиц при плавлении проволоки в плазменном потоке / Г. В. Бобров, В. И. Привезенцев, Л. В. Умнова, Н. С. Суров // Порош. металлургия. – 1969. – 77, № 5. – С. 104–111.

30. 36. Гуляев И. П. Экспериментальное исследование процесса плазменно-дугового проволочного напыления материалов / И. П. Гуляев, П. Ю. Гуляев, В. Н. Коржик, А. В. Долматов и др. // Автомат. сварка. – 2015. – № 3–4. – С. 37–42.

31. Коржик В. Н. Механизированная линия «PLAZER 30PL-W» для плазменно-дугового проволочного напыления покрытий / В. Н. Коржик, М. Ф. Короб // Сварщик. – 2012. – № 4 (86). – С. 13–16.
32. Microplasma spraying / K. Yushchenko, Yu. Borisov, Yu. Pereverzev et al. // Proc. of the 14th Intern. thermal spray conf., Kobe, 1995. – P. 237–274.
33. Investigation of the microplasma spraying processes / Yu. Borisov, I. Sviridova, S. Voynarovich et al. // Proc. of the Intern. thermal spray conf., Essen, 2002. – P. 335–338.
34. Microplasma spraying of bioceramic coatings / V. Bobrik, S. Voynarovich, N. Ulianchich et al. // Proc. of the Intern. thermal spray conf., Orlando, 2003. – Vol. 1. – P. 553–558.
35. Пат. Украины 1848 В23К10/00. Плазмотрон для напыления покрытий / Ю. С. Борисов, С. Г. Войнарович, А. А. Фомакин, К. А. Ющенко. – Опубл. 16.06.2003, Бюл. № 6.
36. Борисов Ю. С. Микроплазменное напыление с использованием проволочных материалов / Ю. С. Борисов, А. Н. Кислица // Автомат. сварка. – 2002. – № 3. – С. 54–55.
37. Microplasma wire spraying / Yu. Borisov, A. Kislitsa, S. Voynarovich // Proc. of the Intern. thermal spray conf. and exposition ITSC 2004 «Thermal Spray Solutions Advances in Technology and Application», Osaka, Japan, 2004.
38. Пащенко В. М. Генерування потоків плазми та керування їх енергетично-просторовими параметрами [Текст]: моногр. / В. М. Пащенко. – Київ: Гнозіс, 2014. – 283 с.
39. Пащенко В. М. Дугові генератори в технологіях інженерії поверхні [Текст] / В. М. Пащенко. – Харків: Мачулін, 2018. – 288 с.
40. ГОСТ 12.0.003-74. ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
41. ГОСТ 12.1.007-76. ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности.

42. ГОСТ 12.1.005-88. ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.

43. ДСН 3.3.6.042-99. Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.

44. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.

45. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації.

46. Основи охорони праці / К. Н. Ткачук, М. О. Халімовський, В. В. Зацарний та ін. // За ред. К. Н. Ткачука і М. О. Халімовського. – К.: Основа, 2006. – 448 с.

47. ГОСТ 12.3.002-2014. Процессы производственные. Общие требования безопасности.

48. Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу № 0472-14.

49. ДНАОП 0.00-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів.

50. ДНАОП 0.00-1.32-01 Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок.

51. ДНАОП 0.00-1.07-94. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением.

52. Степанчук А. М., Білик І. І. Матеріали для напилювання покриттів: навчальний посібник. – Київ: Центр учбової літератури, 2016. – 236 с.

53. Левченко О. Г., Полукаров О. І. Охорона праці у зварювальному виробництві: Навчальний посібник. – К.: Основа, 2014. – 352 с.

54. ДБН В.2.5-28-2006. Природне і штучне освітлення.

55. ДСТУ ГОСТ 12.2.061:2009. ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности к рабочим местам.

56. ДСТУ 7234:2011. Дизайн і ергономіка. Обладнання виробниче. Загальні вимоги дизайну та ергономіки.

57. Левченко О. Г., Арламов А. Ю. Мобильный защитный экран для нестационарных рабочих мест ручной дуговой сварки // Автоматическая сварка. – 2017. – № 2. – С. 49- 53.

58. Местные вытяжные устройства к оборудованию для сварки и резки металлов: Методические указания по проектированию. - Л.: ВНИИОТ. – 1980. – 52 с.

59. ПУЕ-2017. Правила улаштування електроустановок. – К.: Міненерговугілля України, 2017. – 617 с.

60. ДСТУ EN 954-1:2003. Безпечність машин. Елементи безпечності систем керування. Частина 1. Загальні принципи проектування.

61. ДСТУ EN ISO 13849-1:2016. Безпечність машин. Деталі систем управління, пов'язані з забезпеченням безпеки. Частина 1. Загальні принципи проектування».

62. ДСН 3.3.6.096-2002. Державні санітарні норми та правила при роботі з джерелами електромагнітних полів.

63. ДСТУ 7239:2011. Національний стандарт України. Система стандартів безпеки праці. Засоби індивідуального захисту. Загальні вимоги та класифікація.

64. ДСТУ EN 133:2005. Засоби індивідуального захисту органів дихання. Класифікація.

65. ДСТУ EN 169-2001. Засоби індивідуального захисту очей. Фільтри під час виконання зварювання та споріднених процесів. Вимоги до пропускання та рекомендації щодо використання.

66. ДСТУ EN 420-2017. Загальні вимоги до рукавиць. 28. ДСТУ EN 397:2001. Каски захисні промислові.

67. Положення щодо розробки планів локалізації та ліквідації аварійних ситуацій і аварій, № 424/3717 від 30.06.1999 р.

68. ДСТУ 3273-95. Безпечність промислових підприємств. Загальні положення та вимоги.

69. НАПБ Б.03.002-2007. Визначення категорії приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою.