

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

Зварювальний факультет
Кафедра інженерії поверхні

«На правах рукопису»
УДК 621.781

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри


І.В. Смирнов

« 7 » 12 2018 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 132 Матеріалознавство

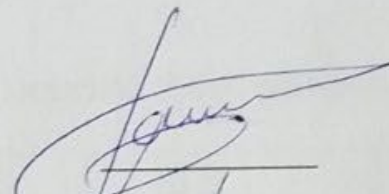
на тему: «Розробка критеріального параметра оцінки ефективності
плазмотронів для нанесення покриттів»

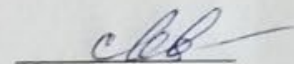
Виконав (-ла):
студент (-ка) II курсу, групи ЗП-71мп
Дюмін Олексій Костянтинович

Керівник:
Професор, д.т.н.
Пашенко В.М.

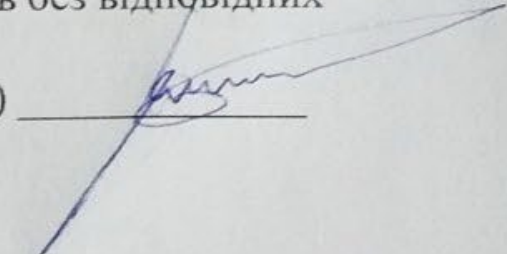
Консультант з охорона праці:
Зав. Каф, д.т.н, проф.
Левченко О.Г.

Рецензент:





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

Студент (-ка) 

Київ – 2018 року

Анотація

В магістерській дисертації розглядається питання розробки критеріального параметру оцінки ефективності плазматронів для нанесення покриттів Представлено технологію та комплекс обладнання для проведення технологічного процесу

Проведено літературний огляд, розглянуті різні методики досліджень, були проведені дослідження енергетичних характеристик ПГ-1Е, був розроблений стартап та розглянуто питання охорони праці. Магістерській дисертації складається з пояснювальної записки та графічної частини.

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

Обсяг пояснювальної записки 83 сторінки МД

Ключові слова: критеріальний параметр, ефективність плазматронів, аксіальне подавання газу, ентальпія, самовстановлювальна дуга

Annotation

In the master's thesis the question of development of a criterion parameter of an assessment of efficiency of plasmatrons for drawing coverings is considered the technology and a complex of the equipment for carrying out technological process is presented

A literature review was conducted, various research methods were considered, studies of the energy characteristics of PG-1E were conducted, a startup was developed and issues of labor protection were considered. Master's thesis consists of an explanatory note and a graphic part.

Explanatory note includes sections (analytical, structural, technological, start-up labor protection), which include illustrations, tables, graphs.

The volume of explanatory notes page 83 MD

Key words: criterion parameter, the efficiency of the plasmatron, the axial gas flow, enthalpy

ЗМІСТ

Перелік скорочень, умовних позначень	6
ВСТУП.....	7
1 ПЛАЗМОТРОНИ ДЛЯ НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ	8
2 ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	27
3 МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ	34
3.1 Вимірювання витрати плазмоутворювальних газів	34
3.2 Вимірювання електричних параметрів	38
3.3 Вимірювання втрат в елементи конструкції генератора плазми.....	39
4 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ	41
5 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	54
5.1 Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів (ШНВФ).....	54
5.2. Інженерні рішення для забезпечення безпеки праці	55
5.3. Розрахунок інженерного рішення.	57
5.4. ВИМОГИ БЕЗПЕКИ В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	58
5.5. ПОЖЕЖНА БЕЗПЕКА	59
5.6. ВИМОГИ БЕЗПЕКИ В АВАРІЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	62
6 Розроблення стартап-проекту.....	63
6.1 Резюме проекту	63
6.2 Організація проекту	64
6.3 Канва бізнес моделі проекту	64
6.4 Ключові види діяльності проекту.....	65
6.5 Ціннісні пропозиції та споживачі.....	68
6.6 Взаємовідносини зі споживачами та канали збуту.....	71
6.7 Обґрунтування ресурсів та витрат проекту	72
6.8 План робіт та партнери проекту	72
6.10 Грошовий потік та економічна оцінка проекту	74
6.11 Розрахунок індексу рентабельності інвестицій в проект.....	75
Висновки	77
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	78

Перелік скорочень, умовних позначень

КВМ – коефіцієнт використання матеріалу

ККД – коефіцієнт корисної дії

T - температура

α - коефіцієнт температурного (лінійного) розширення

ρ - густина матеріалу

C - питома теплоємність

R - питомий електроопір

ВАХ - Вольт-амперні характеристики

A – розмірний коефіцієнт рівний

I – струм дуги в А;

U – напруга на дузі

G – витрата плазмоутворювального газу;

P – тиск плазмоутворювального газу

Q_1 – витрата повітря за графіком градування;

ρ_{1n} – густина повітря у нормальних умовах;

ρ_{2n} – густина газу, який вимірюється, у нормальних умовах;

p_1 – абсолютний тиск повітря, витрата якого вимірюється при градуванні у нормальних умовах;

p_2 – абсолютний тиск газу, який вимірюється, у робочих умовах

ВСТУП

Низькотемпературна дугова плазма достатньо давно і широко застосовується в сучасному машинобудуванні, плазмохімії, металургії та ремонтному виробництві. Технології плазмової обробки складають основу інженерії поверхні – перспективного напрямку науково-технічного прогресу. В останні роки здобули потужний розвиток генеративні технології – технології, які базуються на принципі виготовлення виробів пошаровим нарощуванням об'єктів до досягнення потрібних їх характеристик на нано-, мікро- і макрорівнях із формуванням фізичної поверхні. Пошарове вирощування твердих тіл на макрорівні, перехід від віртуального простору і віртуальних моделей до твердотільних об'єктів незалежно від ступеня складності їх конструкції, форми і розмірів здійснюється із використанням цілого ряду технологій, у тому числі плазмових.

Ефективне застосування низькотемпературної плазми у процесах обробки матеріалів можливе за умови створення надійних та економічних конструкцій генераторів плазми, здатних працювати в широкому діапазоні зміни режимних параметрів.

1 ПЛАЗМОТРОНИ ДЛЯ НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ

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

На нашу думку, ці вимоги можна сформулювати наступним чином:

- формування компактного плазмового потоку, що забезпечує плавлення і розгін частинок напилюваного матеріалу і утворення якісних покриттів;
- простота конструктивного виконання, що забезпечує якісний ремонт в умовах виробництва;
- технологічність при масовому виготовленні, мінімальна кількість ущільнень у трактах охолоджуючої води і подачі плазмоутворювального газу;
- мінімальні масо-габаритні показники при заданій потужності;
- раціональне застосування кольорових і корозійностійких матеріалів;
- тепловий ККД плазмотрона на рівні (0,65-0,85);
- пологоспадні, жорсткі або зростальні вольт-амперні характеристики плазмотрона у робочому діапазоні струмів, що дозволяють повніше використовувати встановлену потужність джерел живлення або знизити її;
- плазмотрон повинен забезпечити стабільність параметрів плазмового потоку по температурі, швидкості і складу, а також необхідний профіль цих параметрів по перетину і довжині факела;

- питома енергія плазмового потоку залежно від виду напилюваного матеріалу повинна мати можливість зміни від 5 до 20 кВт·год. / м³ ($D = 4$).

Найбільш повно цим умовам задовольняють генератори низькотемпературної плазми, що використовують як джерело тепла для нагріву газу термічну електричну дугу (ЕДП).

Є відомості про спроби застосування ВЧ-плазмотронів для напилення покриттів [1], однак параметри ВЧ-плазмотрона і показники процесу не досягають аналогічних показників ЕДП.

З усієї гами принципів схем ЕДП найбільш широко знайшли застосування одноструменеві плазмотрони із внутрішньою дугою (непрямої дії) і з винесеною дугою (прямої дії). Плазмотрони із розподіленими електродами, багаструменеві і плазмотрони з паралельним і послідовним з'єднанням електричних дуг не набули широкого поширення через складність конструктивного виконання і ряду інших недоліків [2, 3, 4, 5].

Конструктивна простота сприяла широкому застосуванню плазмотронів прямої дії із самовстановлювальною довжиною дуги. Ними оснащені серійні вітчизняні та частина зарубіжних установок плазмового напилення.

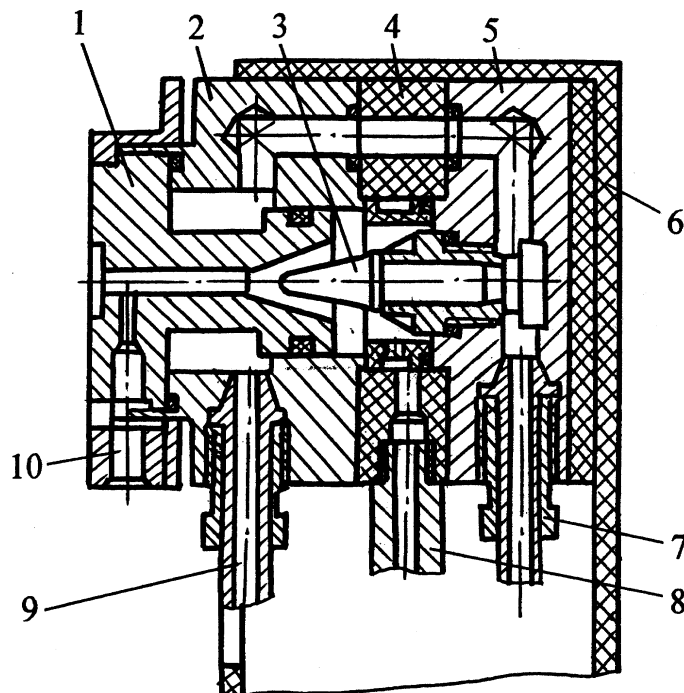
Розрізняють плазмові генератори із "короткою" і "довгою" самовстановлюваною дугою.

Плазмотрони із "довгою" дугою мають високий ККД (до 80 %) за рахунок великих витрат плазмоутворювального газу, ефективно захищає стінки дугового каналу від впливу дуги; середньомасова температура струменя при цьому зазвичай не перевищує 5000 К [6]. У таких плазмотронах використовується газодинамічна стабілізація дуги в каналі струменем закрученого газу і швидкість плазмового струменя у них значно вище, ніж у плазмотронів із "короткою" дугою [7]. Однак низька температура і великі витрати плазмоутворювального газу сприяють збереженню значного завихрення на

виході з сопла, що створює труднощі при введенні в струмінь дисперсного матеріалу і не дозволяє отримати високий коефіцієнт використання порошку.

Низька температура плазмового струменя обмежує номенклатуру матеріалів, що напилюються, і знижує продуктивність процесу.

Серійні установки УПУ-3Д комплектуються плазмотронами типу ПП-25 (ГН-5К). Це типові представники плазмових генераторів із самовстановлювальною "короткій" дугою [8].



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

Рисунок 1.1 – Плазмовий розпилювач ПП-25,[34]

Вони мають вольфрамовий електрод-катод і мідне кільцеве сопло-анод. Канал анода виконаний гладким або з уступом. Довжина післяуступної частини приблизно

дорівнює вихідному діаметру каналу, який незначно (на 1 мм) перевищує діаметр доступної частини каналу. Розширення каналу викликано не потребою у фіксації середньої довжини дуги, а технологічними міркуваннями: зручністю введення порошку в канал, необхідністю збільшення діаметра плазмового потоку, який витікає із плазмотрона, для спрощення процесу введення порошку в струмінь [8].

Застосування в даній конструкції вольфрамового катода дозволяє працювати на токах (400-500) А, але обмежує можливі плазмоутворювальні середовища інертними газами, їх сумішами із воднем і чистим, без домішки кисню, азотом.

Напруга на дузі при роботі на азоті і його сумішах з воднем не перевищує (100-110) В, тому досяжна потужність плазмотронов цієї схеми становить близько 30 кВт (при прийнятному ресурсі електродів). Ресурс електродів різко скорочується зі збільшенням струму.

Вольт-амперні характеристики плазмових генераторів із самовстановлювальною довжиною дуги крутоспадні. Із похибкою 4 % для плазмотронів, що входять до складу установок УМП-5-68 і УМП-6-80, вони описуються залежністю [9]:

$$U = A \left(\frac{I^2}{G} \right)^{-0,038} G^{0,308}, \quad (1.1)$$

де A – розмірний коефіцієнт рівний 32 для аргону і 122,7 для азоту;

I – струм дуги в А;

G – витрата газу, г / с; U – напруга на дузі, В.

Для однокамерного плазмотрона прямої полярності ця залежність має вигляд; [12]

$$U = 1290 \left(\frac{I^2}{G} \right)^{-0,15} \left(\frac{G}{d} \right)^{0,3} (P \cdot d)^{0,25}, \quad (1.2)$$

де d – діаметр робочого каналу плазмотрона;

I – струм дуги;

G – витрата плазмоутворювального газу;

P – тиск плазмоутворювального газу [10].

Основні характеристики плазмових генераторів із самовстановлювальною дугою досить добре вивчені. Авторами відзначаються суттєві недоліки плазмотронів із "короткою" дугою: середня довжина дуги не перевищує діаметра дугового каналу [11]. Відзначаються коливання анодної плями і, як наслідок, коливання параметрів плазмового струменя (температури, ентальпії, швидкості витікання), тобто параметрів, які підвищують експлуатаційні якості напилених покриттів.

У роботі [12] досліджено вплив положення анодної плями на коефіцієнт використання порошку і продуктивність процесу. Спостерігалася зміна КВП від 3 до 75 % залежно від взаємного розташування сопла для підведення порошку і місця знаходження анодної плями (максимальне значення КВП і продуктивності спостерігалася, коли пляма знаходиться навпроти порошкового каналу). За цих же умов максимальна і щільність напиляного покриття. Запропоновано збільшити довжину дуги, щоб внесок анодної плями в ентальпію струменя був менше вкладу стовпа дуги, або інтенсивно обертати анодну пляму за допомогою магнітного поля, вирівнюючи тим самим параметри плазмового струменя.

У роботі [9] були проведені дослідження характеристик плазмотрона УМП-5-68. Експериментально підтверджено зміщення частини плазмового струменя, яка яскраво світиться, і максимуму динамічного тиску до стінки сопла. Зсув пояснюється децицею

довжини дуги (0,5-1) см і шунтуванням дуги на стінку сопла. Зі збільшенням струму і зменшенням витрат газу зміщення збільшується, при цьому падає наповненість профілю масової витрати газу.

Відзначається низький термічний ККД плазмотронів [13] при роботі на аргоні (він не перевищує 0,5) і відносно низький при роботі на азоті і його суміші з аргонном – (0,5-0,6). ККД зростає зі збільшенням витрати [13] і падає зі збільшенням струму дуги [14].

У роботі [15] проведено аналіз нестабільностей обладнання, що впливають на нестабільність властивостей і характеристик покриттів. Умовно нестабільності були розділені на три групи. Третя група містить нестабільності, які викликані роботою плазмотрона. До них віднесли: зміну положення і довжини стовпа дуги в каналі плазмотрона; зміну конфігурації електродів, що викликана ерозією і місцевими прогарами у соплі; зміну межелектродної відстані.

Ці нестабільності призводять до коливання теплових характеристик плазмотрона і, як наслідок, коливань параметрів струменя: ентальпії, температури, швидкості і положення плазмового струменя в просторі.

Визначальним параметром процесу наплення, як зазначається в [15], є питома ентальпія, по якій визначають температуру і швидкість плазмового струменя. Слід зазначити, що на плазмотронах із самовстановлювальною дугою не вдається отримати високі значення питомої ентальпії в плазмовому струмені. З урахуванням ККД вона не перевищує (5-6) кВт·год. / м³ [13].

Особливо слід сказати про низьку стійкість електродів у плазмотронів із самовстановлювальною довжиною дуги. У них застосовується аксіальне або слабозакручене подавання плазмоутворювального газу, тобто анодна пляма мляво рухається по поверхні каналу і має переважне положення в певній його частині. Це призводить до перегрівання електрода і підвищеної ерозії міді.

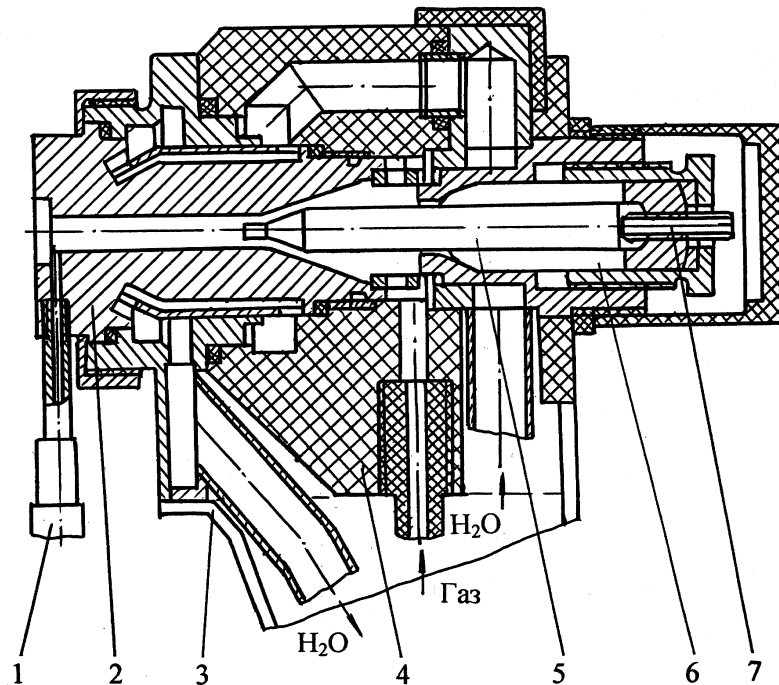
Ресурс роботи сопла в установці УМП-6-80 не перевищує 100 годин за умови роботи на надчистих газах і струмах менше 300 А. При використанні технічного азоту ресурс зменшується до 20 год. [16].

Ерозія анода становить $(7,8 \cdot 10^{-7})$ г / А·с. Ерозія вольфрамових катодів в аргонівій і азотній плазмі становить $(1 \cdot 10^{-9} - 1 \cdot 10^{-8})$ г / А·с і визначається умовами охолодження і конфігурацією електрода [17].

Застосування аксіального або слабозакрученого подавання плазмоутворювального газу підвищує вимоги до аеродинаміки вхідної частини дугового каналу, величини зазору між анодом і катодом, конфігурації катода і чистоті поверхні електродів.

Аксіальне подавання газу наділяє плазмовий факел цінною з технологічної точки зору якістю: є лише осьова складова швидкості плазмового потоку і повністю відсутня радіальна і тангенціальна складові. У факела менший порівняно із закрученою струменем кут розкриття. Це дозволяє раціонально ввести напилюваний матеріал у плазмовий струмінь і підвищити коефіцієнт його використання. Однак, недоліки цього типу плазмотронів перераховані вище, роблять безперспективним подальше вдосконалення реальних конструкцій плазмотронів з короткою дугою.

Слід зазначити, що зарубіжні установки плазмового напилення типу "МЕТКО" ЗМВ (Італія, США), "КАСТОЛІН" (Швейцарія), "СІЕЛЕКТРО КОРП." (США), SG-100 (М-2) "ПЛАЗМАДАЙН" (США), також оснащені плазмотронами із самовстановлюваною довжиною дуги, тобто до них можна застосувати аналіз їх достоїнств і недоліків, наведений вище для вітчизняних плазмотронів серійних установок УПУ і УМП [18].



: 1 – штуцер для подавання матеріалу, що напилюється; 2 – анод; 3 – рукоятка; 4 – ізолятор; 5 – катод; 6 – цанга; 7 – гвинт регулювання

Рисунок 1.2 – Плазмовий розпилювач до установки УПУ-8М,[3]

Широке поширення отримали плазмотрони із фіксацією середньої довжини дуги уступом [19]. Соплами з уступом оснащені окремі варіанти плазмотронів серійних установок УПУ і УМП і ряд експериментальних плазмотронів. При раптовому розширенні потоку відбувається зниження тиску і швидкості газу в заступній частині каналу та виникнення зворотних вихорів безпосередньо за уступом, що створює сприятливі умови для шунтування електричної дуги в цій зоні [20, 10]. Середня довжина дуги залишається незмінною в досить широкому діапазоні зміни струму і витрати газу.

Конструктивно плазмотрони із фіксацією довжини дуги уступом виконуються так само, як і плазмотрони із самовстановлювальною довжиною дуги. Можлива заміна

електродів із гладким каналом на електроди з профільованим каналом в одній і тій же конструкції плазмотрона.

Вольт-амперна характеристика плазмотронів із самовстановлювальною довжиною дуги розташована в площині $U-I$ вище характеристики плазмотрона із фіксацією середньої довжини дуги температурним полем (вихідний електрод з уступом), тому що довжина дуги в плазмотронах з уступом в середньому менше довжини самовстановлювальної дуги.

ВАХ має сідлоподібний характер і у певному діапазоні струмів зростає ділянку. Вихідна ділянка ВАХ обмежена з боку малих струмів ставленням $I/d = 100$ А / см [21], а з боку великих – ВАХ дуги із самовстановлювальною дугою. Причому збільшення довжини каналу призводить до зміщення ВАХ в область високих напруг і скорочення області вихідних ділянок по струму, а зростання витрат газу – до розширення цієї області [22].

Відзначається, що стійке горіння дуги в плазмотронах цього типу забезпечується відносно великою (0,01 кг / с) витратою плазмообразуючого газу.

Узагальнена вольт-амперна характеристика при роботі на повітрі має вигляд [11]:

$$\frac{U d}{I} = 4,55 \left(1 + 4,60 \cdot 10^{-5} \frac{I}{d} \right) \left(\frac{I^2}{G d} \right)^{-0,5} \left(\frac{G}{d} \right)^{-0,27} \left(\frac{l}{d} \right)^{0,95} (P \cdot d)^{0,23}. \quad (1.3)$$

Відношення діаметра уступу до діаметру вузької частини дугового каналу змінювалося в межах (1,8...1,9).

Реальні конструкції плазмотронів для наплення із фіксацією середньої довжини дуги уступом працюють у діапазоні струмів, де вольт-амперна характеристика пологоспадна або жорстка [15].

Плазмотрони з уступом відрізняються зниженим, порівняно з плазмотронами із самовстановлюваною дугою, рівнем пульсацій параметрів плазмового потоку ((5-7)% проти 30% у останніх) [19].

Обмежена зона шунтування дуги дозволяє вкоротити канал вихідного електрода, зменшивши тим самим втрати в стінку. Це піднімає ККД плазмотрона з уступом до (0,65-0,75) [23].

Положення анодної плями після уступу в деякому діапазоні зміни струму і витрати газу не змінюється [10], тому з'являється можливість керувати питомою енергією плазмового струменя плазмотрона, змінюючи величину струму і витрату плазмоутворювального газу, або кожен з цих параметрів окремо. Реально досяжні значення питомої енергії 10 і більше кВт·год. / м³ [23].

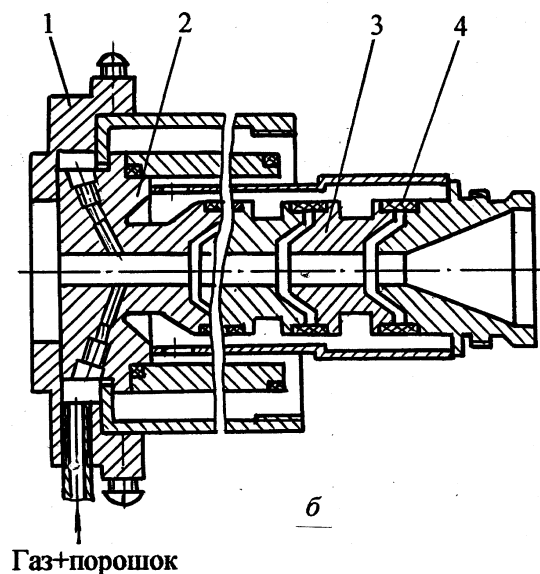
Стійкість електродів у плазмотронів з "уступом" не відрізняється від стійкості електродів у плазмотронів із самовстановлюваною дугою при сумірних струмах дуги. Таким чином, плазмотрони з фіксацією середньої довжини дуги уступом мають якості, які дають їм можливість зберігати певне місце в гамі плазмотронів для наплення.

У ряді робіт [24, 25] досліджувалися енергетичні характеристики потужних плазмових генераторів (100-150) кВт зі складною геометрією дугового каналу, що працюють на сумішах вуглеводневих газів з повітрям.

Порівняно низька питома ентальпія і велика, порівняно з плазмотронами з міжелектродними вставками (МЕВ) нерівномірність профілів основних параметрів плазмового потоку не дозволяють ефективно застосовувати плазмотрони з газодинамічною стабілізацією довжини дуги для високопродуктивного наплення

тугоплавких матеріалів (Al_2O_3 , ZrO_2 і т.і.). Обмежені також можливості збільшення одиничної потужності плазмотрона.

На сьогодні найбільш перспективними для наплення цих матеріалів вважаються плазмотрони з міжелектродними вставками [26], причому мова йде про два варіанти плазмотронів з МЕВ: плазмотрони із секціонованим каналом і плазмотрони з пористими каналами.



1 – колектор; 2 – анод; 3 – МЕВ; 4 – ізолятор-ущільнювач

Рисунок 1.3 – Плазмовий розпилювач до установки УПУ-8М (варіант з МЕВ):

[13]

Незважаючи на високий ККД – до 95 % [27], плазмотрони з пористою МЕВ мають ряд суттєвих недоліків, що стримують застосування їх в установках плазмового наплення. При тривалій роботі відбуваються незворотні зміни у пористій структурі матеріалу і вдування плазмоутворювального газу стає неконтрольованим. При випадковому торканні електричною дугою стінки пористого каналу він стає непридатним до подальшої нормальної роботи. При збільшенні витрати

плазмоутворювального газу порушується стійкість електричної дуги у зв'язку з попаданням її елементів в умови локально-поперечного обдування [19].

Плазмотрони із секціонованими МЕВ частково вирішують проблеми підвищення одиничної потужності генератора при помірних струмах дуги і ресурсу роботи електродів. Слід зазначити ускладнення конструкції плазмотронів з МЕВ, погіршення масо-габаритних показників і зменшення надійності конструкції в цілому, хоча при сумірній потужності за рахунок більш високої напруги на дузі можна знизити струм дуги, збільшуючи тим самим термін служби електродів.

Характеристики плазмотронів з міжелектродними вставками при вихровому і аксіальному подаванні газу досліджені та узагальнені для ряду плазмоутворювальних середовищ у роботах [11, 28].

В роботі [29] відзначається низький ККД цих плазмотронів при роботі на малих витратах газу. При розподіленому подаванні плазмоутворювального газу ККД суттєво підвищується за рахунок зниження втрат у стінку дугового каналу. Реальний ККД знаходиться в інтервалі (0,5-0,85).

У плазмотронах із розподіленою витратою, на відміну від конструкцій з постійною витратою плазмоутворювального газу, нагрівання робочого тіла відбувається по всій довжині каналу. Граничні параметри досягаються на довжині, яку можна порівняти з його діаметром [29], тобто основна маса газу нагрівається саме на граничній ділянці.

Єдиної аналітичної залежності ККД від визначальних параметрів на плазмотронах із секціонованою МЕВ отримати не представляється можливим [28]. ККД розраховують поелементно. Це пов'язано з тим, що до параметрів, які вже використовується – струму дуги, витраті газу, діаметру і довжині каналу, тиску необхідно додати параметри, що враховують загороджувальне охолодження, можливість варіювання довжиною ділянки розвиненої турбулентної течії та ін.

У роботі [29] проведено порівняння значень ККД плазмотронів із самовстановлюваною довжиною дуги і з МЕВ залежно від струму дуги. Показано перевагу плазмотронів з МЕВ перед аналогічними за технічними даними плазмотронами із самовстановлюваною дугою. У цій же роботі наведена залежність ентальпії гальмування повітря від струму у двох зазначених вище типів плазмотронів. Показано, що у плазмотронів з МЕВ ентальпія залежить від струму майже за лінійним законом, тоді як у плазмотронів із самовстановлюваною довжиною дуги навіть при ККД, який умовно дорівнює одиниці, зростання ентальпії сповільнюється із підвищенням струму, що пояснюється зменшенням напруги на дузі.

У ряді робіт [30, 31] відзначається покращання роботи плазмотронів із МЕВ на великих витратах газу, тому що ефективність застосування секціонованої МЕВ із розподіленою витратою газу сильно залежить від витрати захисного газу.

Конструктивно плазмотрони з МЕВ і розподіленим подаванням плазмоутворювального газу виконуються у вигляді послідовно з'єднаних катодного вузла з подачею захисного газу і без такої, набору водоохолоджуваних міжелектродних вставок і анодного вузла. Застосування міжсекційного вдування ускладнює конструкцію наявністю розподільного апарату. Слід зазначити також ускладнення схеми ініціювання дуги і електроживлення плазмового пальника при застосуванні багатосекційної міжелектродної вставки. Розроблено та реалізовано спеціальні схеми для запуску подібних плазмотронів [32].

Перераховані вище фактори ускладнюють застосування плазмотрона з МЕВ в установках для наплення.

У роботі [33] встановлено, що у плазмотронах з МЕВ за певних умов можливе подвійне дугоутворення (принцип мінімуму Штеенбека). Однак, ця умова, будучи необхідною, не є достатньою. Якщо в конкретному випадку подвійне дугоутворення більш переважно відповідно до принципу Штеенбека, то можливість його здійснення

залежить від рівня потенційного бар'єру, який в свою чергу визначається параметрами шару газу між дугою і стінкою сопла. Звідси впливають два способи запобігання подвійного дугоутворення: секціонування МЕВ так, щоб для кожної секції виконувалося нерівність, і другий спосіб – формування на внутрішній поверхні сопла шару "холодного" газу певних параметрів, тобто збільшення висоти потенційного бар'єру. Тут важливе значення має склад газу.

У роботі [30, 31] відзначається, що наявність в суміші двоатомних газів сприяє зниженню температури дуги і підвищує напругу пробою шару газу між соплом і дугою. Як приклад показано, що застосування суміші аргону і водню знижує ймовірність подвійного дугоутворення порівняно із аргоною плазмою, незважаючи на більш високу, у (2-3) рази, напруженість поля в стовпі дуги.

Повітряні суміші при взаємодії з дугою утворюють плазму, що має в своєму складі вільний водень, СО, СО₂ та інші компоненти, процентний вміст яких залежить від коефіцієнта витрати окислювача у вихідній суміші. При цьому зростає висота потенційного бар'єру, що перешкоджає подвійному дугоутворенню порівняно із повітряною, азотною, аргоною плазмою. Відкривається можливість створення плазмотронів, що використовують одиночну або подвійну МЕВ, і мають досить високі енергетичні показники порівняно із двоелектродними плазмотронами і одночасно конструктивно простих, легких в обслуговуванні і експлуатації.

Крім розглянутих, знаходять застосування і спеціальні типи плазмотронів.

Зростаючі вимоги до якості покриттів, що наносяться, і конкуренція з боку інших способів нанесення покриттів і, зокрема, детонаційного, призвели до створення рядом зарубіжних фірм плазмотронів із надзвуковою швидкістю витікання струменя [8]. Аналогічні роботи проводяться і у нас у країні [34, 35].

Як правило, плазмотрони із надзвуковою швидкістю струменя працюють в умовах зниженого тиску в камерах з динамічним вакуумом або контрольованою атмосферою

[36, 37]. При цьому досягаються швидкості струменів М2, М3 на потужності 40 і 80 кВт. Швидкості частинок матеріалу, що напилюється, зростають до 800 м/с. Конструктивно надзвукові плазмотрони відрізняються від дозвукових формою дугового каналу, який має соплову ділянку, що розширюється. При роботі плазмотрона в камеру з атмосферним тиском, тиск газу на вході в плазмовий генератор має більш високі значення порівняно з традиційними варіантами.

Розрізняють два типи надзвукових плазмотронів: ті, у яких дуга проходить крізь критичний перетин каналу, і плазмотрони, що розганяють до надзвукової швидкості вже сформований плазмовий струмінь.

Ерозійний знос надзвукового сопла негативно впливає на режим витікання газу, тому ресурс роботи надзвукових плазмотронів значно нижче, ніж у дозвукових. Якщо до цього додати істотні труднощі при введенні порошку в надзвуковий струмінь і малий час перебування напилюваного матеріалу в зоні плазмового потоку, то можна припустити обмеження сфери застосування надзвукових плазмотронів напиленням металевих порошоків для отримання покриттів високої щільності [38].

Фірмою "Аквацентр" розроблений плазмотрон із частково винесеною дугою, що працює на водяній плазмі [30, 31]. В якості катода використовується графітовий витратний пруток, який спеціальним механізмом подається в зону електричної дуги, у міру спрацьовування. Дуговий канал від торця катода до зрізу формуючого сопла є набором завихрювальних шайб, через пази яких тангенціально подається дистильована вода, що стелеться по стінках каналу в напрямку від катода до формувального сопла. У сопла вона зливається і подається назад у систему водопостачання. Водяна пара, що утворюється в результаті теплового впливу дуги на водяній вихор, і є плазмоутворювальним газом. Анодом плазмотрона служить обертається сталевий диск діаметром 150 мм. [39]. Аналогічну в принципі конструкцію має і плазмотрон, що входить до складу установки плазмового напилення УН-108, розробленої в ІЕЗ ім. Є. О. Патона. В УН-108 в якості катодного вузла використовується плазмовий

різак, що складається з катода і формує сопла. Анодом служить сталевий або мідний обертовий диск [40]. У розробці "Аквацентр" напилюваний матеріал подається у плазмовий струмінь за диском, що обертається. Подача порошку перед анодом знижує надійність процесу внаслідок небезпеки налипання матеріалу, що напилюється, на поверхню анода.

Плазмотрони з частково винесеною дугою поряд з відомими перевагами мають ряд серйозних недоліків. У міру зношування диска змінюється орієнтація дуги у просторі щодо місця подавання порошкового матеріалу, що призводить до порушення стабільності процесу прогрівання порошку у деформованому плазмовому струмені; спостерігається інтенсивне випаровування металевих матеріалів у дузі. Наявність відкритої ділянки дуги довжиною кілька калібрів сприяє інтенсивному підсмоктуванню навколишнього повітря у плазмовий струмінь, що змінює спочатку встановлений склад плазмового середовища і, як наслідок, призводить до неконтрольованої зміни хімічного складу матеріалу, що напилюється. У плазмотронах з частково винесеною дугою не вдається сформувати робоче тіло з необхідними і стабільними у часі і просторі параметрами. До недоліків слід віднести: великі габаритні розміри подібних плазмотронів (наприклад, "Аквацентр" $1040 \times 250 \times 300$ мм) і велику масу (50 кг – "Аквацентр") [41]; наявність обертових деталей, підведення струму через обертові контактні групи, складність заміни і відновлення зношених електродів.

У ряді організацій розроблені і застосовуються для нанесення покриттів двоструменеві плазмотрони [11, 42].

Плазмотрони цього типу, наприклад, ДГП-50 [42], складаються із двох розташованих під кутом плазмових головок. Електричний струм від одного електрода до іншого тече по струменях плазми [43]. Для запуску і живлення плазмотронів застосовується досить складна схема, яка створює допоміжні високочастотний і дуговий розряди між електродами і діафрагмами обох головок. Плазмотрони цього

типу, наприклад, ДГП-50 [42], складаються з двох розташованих під кутом плазмових головок. Електричний струм від одного електрода до іншого тече по струменів плазми [43]. Для запуску і харчування плазмотронов застосовується досить складна схема, яка створює допоміжні високочастотний і дугового розряди між електродами і діафрагмами обох головок.

Плазмотрони цього типу досягають потужності 50 кВт при струмі до 150 А і ККД на рівні (0,5...0,8) Основна перевага цих генераторів низькотемпературної плазми – низька ерозія електродів.

В роботі [42] відзначається наявність ефекту природного підсмоктування (інжекції) дисперсних матеріалів у зоні злиття струменів.

Аналогічна конструкція була розглянута у роботі [11]. Відзначається труднощі введення дисперсного матеріалу у зону змішування плазмових потоків. Підвищення струму до 300 А погіршує енергетику плазмотрона (ККД плазмотрона зменшується до (60-70) %). Таким чином плазмотрони з винесеною дугою мають певні переваги при роботі на токах до 200 А на потужності до (40-50) кВт. Введення напилюваного матеріалу за зоною змішування плазмових потоків не дає переваг цим плазмотронами як джерел нагріву дисперсного матеріалу порівняно з плазмотронами традиційних лінійних схем.

Великого поширення в інших областях плазмової техніки отримали коаксіальні плазмотрони постійного струму. Вони забезпечують отримання плазмових потоків великої потужності і поперечних розмірів. Конструктивно виконуються у вигляді двох коаксіально розташованих циліндричних електродів, між якими горить дуга, яка переміщується в зазорі магнітним полем. За рахунок розвиненої поверхні електродів і переміщення дуги досягається відносно великий ресурс електродів [6, 11]. Одночасно відзначаються недоліки цієї принципової схеми: циклічність нагріву порошку з частотою (2,5...10) Гц; можливість прилипання порошку до стінки при його внутрішньому подаванні; неможливість варіювання витратою газу в широких межах через імовірність зриву дуги, що знаходиться в умовах поперечного обдування.

Вихідне формувальне сопло, яким забезпечені коаксіальні плазмотрони, знижує ККД пристрою.

У роботі [19] відзначається значна ерозія центрального електрода.

Осьова швидкість газу на виході при тиску до 10^6 Па не перевищує 120 м / с при нерівномірності поля температур до 20 % і поля швидкостей до 30 %; ресурс не більше (25...30) год. при тиску до $(2 \cdot 10^6)$ Па і струмі до 1000 А [6].

На меншому струмі плазмотрони вельми чутливі до зміни витрати плазмоутворювального газу [19]. Однак, є повідомлення про успішне застосування коаксіальних плазмотронів для напилення тугоплавких матеріалів [44].

У ряді робіт описані конструкції плазмотронів, в яких були зроблені спроби збільшити час перебування матеріалу, що напилюється, у високотемпературної зоні. У роботі [45] представлений плазмотрон з коаксіальної подачею порошку. При певних співвідношеннях площ перетину каналу, по якому подається газопорошкова суміш і плазмоутворювальний газ і перетину каналу сопла виключається, на думку авторів, можливість налипання частинок матеріалу, що напилюється, на катод і забезпечується можливість інжекції газопорошкової суміші із зазору між електрично нейтральною вставкою і соплом-анодом. Цим виключається утворення настилів.

Згідно [45], поки вдалося створити плазмотрон потужністю (5-12) кВт при витраті плазмоутворювального газу (0,1-0,2) г / с (по азоту). Плазмотрон досить складний за конструкцією і, як випливає з принципу його роботи, досить чутливий до ерозійного зносу електродів.

В роботі [46] обговорюються переваги напилення у ламінарному потоці. Відзначається мале перемішування потоку плазми з навколишньою атмосферою, висока швидкість частинок, велика довжина струменя плазми, малий кут розкриття струменя, високе енерговміст ламінарного потоку, низький рівень шуму, простота і легкість введення матеріалу, що напилюється, у струмінь плазми. Однак слід зазначити відсутність життєздатних конструкцій ламінарних плазмотронів для напилення, а

значна чутливість останніх до ерозії електродів веде до переходу пальника у турбулентний режим.

Особливості, відмічені у розглянутих генераторів низькотемпературної плазми нетрадиційних схем, обмежує область їх застосування спеціалізованими установками плазмового напилення.

2 ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Установка є комплексом систем живлення дугового плазмового генератора електричною енергією, робочими газами, дисперсними та дротяними матеріалами, охолоджувальною водою (див.рис. 2.1).

До складу установки входять також системи вентиляції, шумоізоляції та забезпечення її безпечної експлуатації, системи автоматизації запуску плазмотрона та його зупинки і взаємного переміщення виробу та плазмового генератора.

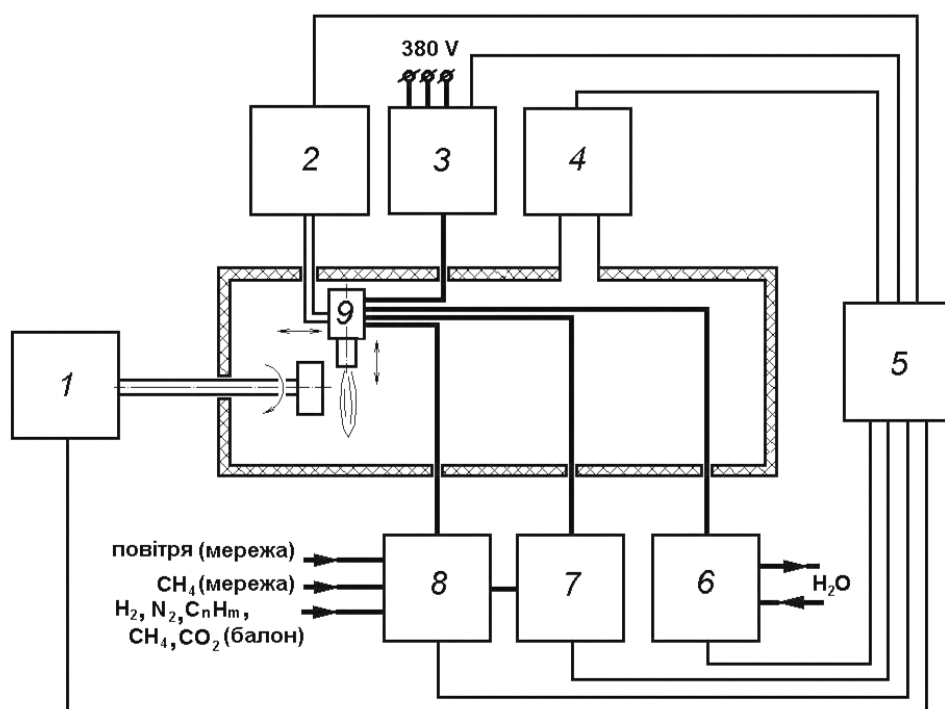
В якості джерела живлення електричною енергією застосований стабілізатор струму АПР-402 із напругою холостого ходу 300 В і діапазоном плавного регулювання струму (120-450) А.

Джерело живлення АПР-402 підтримує стабільне горіння дуги в діапазоні робочих напруг (100 – 280) В, що дозволяє досліджувати плазмові генератори в достатньо широкому діапазоні потужностей від 15 до 120 кВт.

Запуск двоелектродних плазмотронів здійснюється за спрощеною схемою, без чергової дуги. Після пробою між електродного проміжку осцилятором типу ВІР-101УЗ, одразу ініціюється основна дуга, що живиться від тиристорного випрямляча. Для захисту випрямляча від високої напруги осцилятора в коло дуги введений високочастотний *R-C* фільтр.

Контроль на рівнем електричних параметрів роботи плазмотрона проводиться за штатними амперметром і вольтметром на панелі керування джерелом АПР-402, а вимірювання струму дуги і напруги на дузі у процесі випробувань – цифровими приладами.

Основним плазмоутворювальним газом у процесі досліджень було повітря і суміші його із вуглеводневими газами.



a



б

a – структура експериментальної установки; 1, 2 – маніпулятори; 3 – джерело живлення плазматрона; 4 – система вентиляції; 5 – блок керування; 6 – система

охолодження теплонапружених елементів установки; 7 – система подавання матеріалу, який напилюється; 8 – система газоприготування; б – загальний вигляд установки

Рисунок 2.1 – Експериментальна плазмова установка[24]

Повітря компримувалося автономним компресором, оснащеним додатковою системою ресиверів та масляних фільтрів.

Природний газ використовувався балонний (15 МПа). Альтернативою природному газу може бути скраплений балонний пропан-бутан.

Система газоприготування установки дозволяє застосування і інших балонних газів: азоту, аргону, вуглекислоти та ін.

Перед подаванням до плазмового генератора приготовлена суміш газів проходить додаткове очищення; стабілізуються її параметри, регулюється витрата. У процесі роботи здійснюється автоматичний поріг контроль за тиском компонентів газової суміші і вимикання установки у випадку його зниження нижче допустимого рівня. Вимірювання витрати проводиться зразковими манометрами і ротаметрами типу РМ-ІІ, РМ-ІV, НДЕМ 3486002.

Охолодження елементів конструкції плазмотрона та інших теплонапружених компонентів установки і зондової апаратури здійснюється проточною водопровідною водою із загальної мережі водопостачання із тиском (300-500) кПа. Відведення води здійснюється у каналізаційну систему.

Температура води на вході і виході контурів охолодження вимірюється електронними термометрами опору із точністю 0,1 °С і контролюється лабораторними ртутними термометрами із такою ж ціною поділки. Витрата води фіксується ротаметрами РМ-ІV (точні вимірювання здійснюються шляхом застосування мірних ємностей).

Для подавання дисперсних матеріалів можуть бути використані тарілчасті дозатори-живильники, витрата порошку в яких регулюється зміною числа обертів

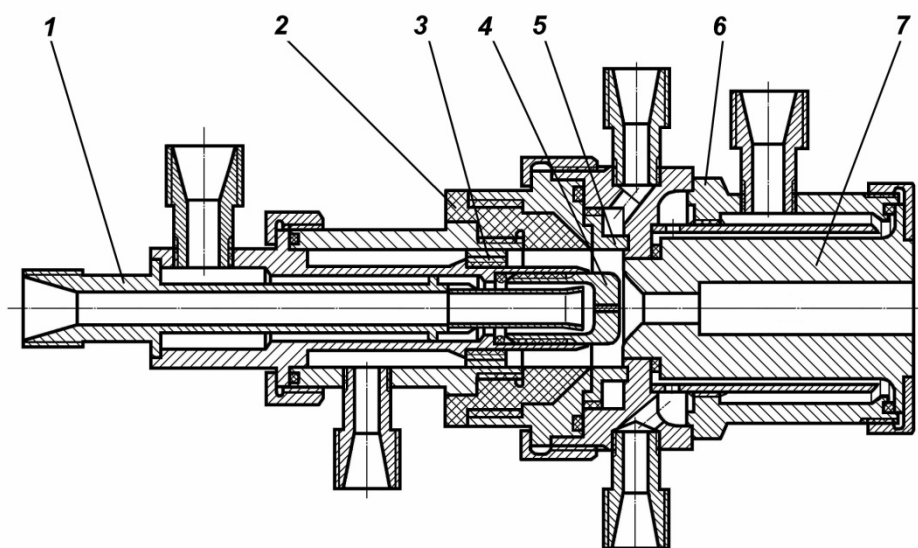
дозуючої тарілки та зазором між бункером із дисперсним матеріалом і тарілкою. Технічно забезпечена можливість використання в якості транспортуючого газу будь-яких газів або їх сумішей.

Дослідження проводились у шумозахисному боксі 15В-Б, оснащеному маніпуляторами для забезпечення обертального руху деталі типу «тіло обертання» та переміщення плазмотрона по трьох координатних осях відносно об'єкта обробки.

Автоматизація запуску та вимикання плазмового генератора забезпечується штатними засобами джерела живлення та захисного боксу.

Досліджувався плазмотрон найбільш розповсюдженої принципової схеми із автогазодинамічною фіксацією довжини дуги і, для порівняння, плазмотрон із самоустановлюваною довжиною дуги.

У всіх випадках, плазموутворювальна суміш (повітря або суміш повітря із вуглеводневим газом) подавалась до дугового каналу через аксіально-тангенціальний закручувальний пристрій через зазор між термохімічним електродом-катодом типу ОБ1542А або ОБ1541 та мідним анодом.



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[44]

Досліджувались енергетичні характеристики дослідного плазмового генератора ПГ-1Е, конструкція якого представлена на рис. 2.2.

Електрод-анод має вигляд мідного стакана, який безпосередньо 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.

В досліджуваному плазмотроні застосовані дві різні схеми подавання плазмоутворювального газу – аксіально-тангенціальна та тангенціальна.

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.

Джерело живлення АПР – 402 (рис. 2.4) є напівпровідниковим випрямлячем із крутоспадними зовнішніми характеристиками []. АПР – 402 розміщено в 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.

Підпалювання дуги осциляторне.

Штатна електрична схема джерела живлення АПР – 402 розрахована на запуск плазмотронів із 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. 2.3).

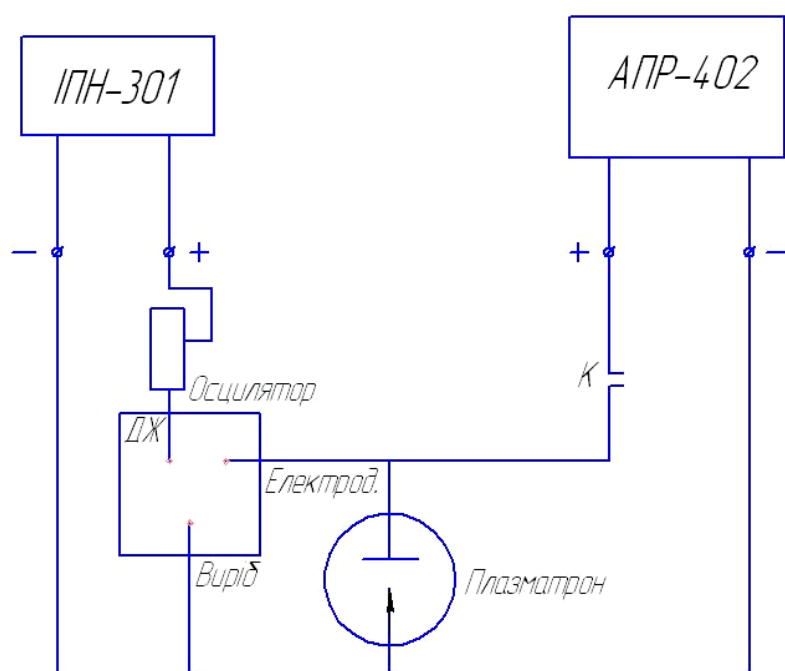


Рисунок 2.3 – Схема підключення та запуску розпилювача [52]

Для запобігання неконтрольованого спрацьовування термохімічного катоду застосовувалась схема автоматичного ступінчастого виходу плазмового розпилювача на робочий режим.

У даному варіанті запуск чергової дуги здійснювався на джерелі живлення ІПН-301, що складається із силового трансформатора, блоку трансформаторів зворотного зв'язку, пульта керування, панелі з електроапаратурою і блоку вентилів. Джерело пересувне, змонтоване на візку, захищене кожухом. А для основної дуги – джерело живлення АПР-402.

3 МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ

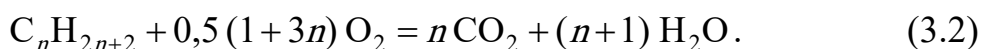
3.1 Вимірювання витрати плазмоутворювальних газів

В дослідях 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.

Для характеристики співвідношення між горючою компонентою і окиснювачем застосовується характерний параметр, який використовується в теорії горіння – коефіцієнт витрати окиснювача α . Коефіцієнт α – відношення фактичної витрати повітря $Q_{\text{п}}$ до кількості повітря $Q_{\text{п}}^{\circ}$, теоретично необхідної для повного згорання горючого газу даного складу. У випадку повного згорання:

$$\alpha = Q_{\text{п}} / Q_{\text{п}}^{\circ} = 1. \quad (3.1)$$

Реакцію повного окислення вуглеводнів виду C_nH_{2n+2} можна записати у вигляді:



Оскільки в повітрі міститься 20,95 % O_2 , теоретично необхідний для повного згорання об'єм повітря дорівнює:[3]

$$Q_{\text{п}}^{\circ} = \frac{100 \cdot 0,5}{20,95} (1 + 3n) = 2,387(1 + 3n). \quad (3.3)$$

Якщо $Q_{\text{г}}$ – об'ємна витрата горючого газу, який надходить до плазмотрона, зв'язок

між об'ємним вмістом горючого газу у суміші k_r і коефіцієнтом витрати окиснювача має вигляд:[3]

$$k_r = \frac{Q_r \cdot 100\%}{Q_r + Q_{\text{п}}} = \frac{Q_r \cdot 100\%}{Q_r + \alpha Q_r Q_{\text{п}}^0} = \frac{100}{1 + \alpha Q_{\text{п}}^0}, \quad \% \text{ об'ємних.} \quad (3.4)$$

За відсутності горючого газу в суміші, тобто для повітря:p[3]

$$\alpha = \frac{100 - 0}{0 \cdot Q_{\text{п}}^0} = \infty. \quad (3.5)$$

Таким чином, повітряна плазма є окремим, граничним випадком газоповітряної плазми у разі значення коефіцієнта витрати окиснювача, що дорівнює нескінченності.

У першому наближенні співвідношення між вуглеводневим газом і повітрям (коефіцієнт витрати окиснювача α) визначається за показаннями ротаметрів при відомому тиску газу.

Для метану:

$$\alpha = 0,1017 \frac{Q_{\text{пов}}}{Q_{\text{вг}}}, \quad (3.6)$$

де $Q_{\text{пов}}$ – об'ємна витрата повітря, $\text{м}^3/\text{год.}$;

$Q_{\text{вг}}$ – об'ємна витрата метану, $\text{м}^3/\text{год.}$

За результатами хімічного аналізу проби газу може бути визначене уточнене значення коефіцієнта витрати окиснювача:[13]

$$\alpha_{\text{ха}} = 0,095 \frac{\text{O}_2 + \text{Ar} + \text{N}_2}{100 - (\text{O}_2 + \text{Ar} + \text{N}_2)}, \quad (3.7)$$

де O_2 , Ar , N_2 – об'ємний вміст компонентів (у відсотках).

Вимірювання об'ємної витрати компонентів плазмоутворювальної суміші здійснювалось за допомогою поплавкових ротаметрів типу РМ-II, РМ-IV.

Принцип дії ротаметра базується на сприйманні поплавком, який переміщується у ротаметричній трубці, динамічного напору рідини або газу, який проходить знизу вверх. Внутрішня поверхня трубки має форму конуса. При підйманні поплавка, прохідний проміжок між міделем (найбільшим діаметром) поплавка і внутрішнім діаметром трубки збільшується, перепад тиску на поплавок зменшується. При тиску, який дорівнює вазі, що припадає на одиницю площі його поперечного перерізу, настає рівновага. Кожному положенню поплавка відповідає певне значення витрати.

Робочий тиск ротаметрів – 0,6 МПа. Втрата тиску не перевищує 0,01 МПа.

Градуювання ротаметрів – індивідуальне і здійснюється на місці виготовлення. Для визначення витрати із похибкою, яка нормована, до паспорта додається графік значень витрати.

При використанні ротаметра з градуюванням по повітрю на газах, які відрізняються за густиною (у даному випадку вуглеводневі), а також при зміні тиску і температури газу від зазначених у паспорті, здійснюється перерахунок за формулами:[24]

$$Q_2 = Q_1 \sqrt{\frac{\rho_{1n} \cdot p_1 \cdot T_2}{\rho_{2n} \cdot p_2 \cdot T_1}}, \quad (3.8)$$

$$Q_2 = Q_1 \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2}}, \quad (3.9)$$

де Q_2 – витрата газу у робочих умовах;

Q_1 – витрата повітря за графіком градування;

ρ_{1n} – густина повітря у нормальних умовах;

ρ_{2n} – густина газу, який вимірюється, у нормальних умовах;

p_1 – абсолютний тиск повітря, витрата якого вимірюється при градуванні у нормальних умовах;

p_2 – абсолютний тиск газу, який вимірюється, у робочих умовах;

T_1 – температура повітря, яка вимірювалась при градуванні, за шкалою Кельвіна;

T_2 – температура газу, який вимірюється, у робочих умовах за шкалою Кельвіна;

ρ_2 – густина повітря, яка вимірювалась при градуванні;

ρ_1 – густина газу, який вимірюється, у робочих умовах.

3.2 Вимірювання електричних параметрів

Напругу U і струм дуги I вимірювали зразковими стрілочними приладами типу М 243 кл. 0,2 та М 1105 кл. 0,2.

Вимірювання струму здійснювались шляхом встановлення додаткового 500-амперного шунта у силовому колі безпосередньо біля генератора плазми.

Шкала амперметра проградуєвана в амперах із врахуванням параметрів шунта.

Напруга на дузі вимірювалась на приєднувальних штуцерах плазмотрона.

На період запуску вольтметр від'єднувався від об'єкта вимірювання для запобігання його пошкодження високою напругою осцилятора.

За виміряне значення приймалось середнє арифметичне із п'яти показників, отриманих з інтервалом у 5 секунд.

Отримані за допомогою зразкових приладів значення струму дуги та напруги на дузі контролювались показниками штатних приладів джерела живлення (кл.1,5).

В окремих випадках застосовувався цифровий вольтметр Ф 4214.

3.3 Вимірювання втрат в елементи конструкції генератора плазми

Втрати в електродні вузли плазмотрона визначались шляхом вимірювання витрати охолоджувальної води та її температури на вході та виході контуру охолодження. Витрата визначалась застосуванням мірчої посудини та секундоміра.

Температура води вимірювалася ртутними лабораторними термометрами із ціною поділки 0,1 °С. [13]

$$P_{\text{втр}} = c_{\text{H}_2\text{O}} Q_{\text{H}_2\text{O}} (t_{\text{вих}} - t_{\text{вх}}), \quad (3.10)$$

де $c_{\text{H}_2\text{O}}$ – питома теплоємність води;

$Q_{\text{H}_2\text{O}}$ – витрата охолоджувальної води;

$t_{\text{вих}}$ – температура води на виході системи, К;

$t_{\text{вх}}$ – вхідна температура води, К.

Температура вхідної води контролювалась періодичним її вимірюванням протягом всього часу проведення експериментів, через нестабільність температури у часі.

3.4 Визначення коефіцієнта корисної дії (ККД) генератора плазми та питомої енергії плазми

ККД розпилювача із комбінованим підведенням енергії розраховується за формулою:[24]

$$\eta = \frac{P_{\Sigma} - P_{\text{втр}}}{P_{\Sigma}}, \quad (3.11)$$

де P_{Σ} – 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 $P_{\text{ел}} = UI$ 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. / м³; $Q_{\text{вг}}$ – витрата вуглеводневого компонента, м³ / 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: [24]

$$\varepsilon = P_{\text{кор}} / Q_{\Sigma} = (UI + P_{\text{пг}} - P_{\text{втр}}) / Q_{\Sigma}, \text{ кВт} \cdot \text{год.} / \text{м}^3, \quad (3.12)$$

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) м³ / год.

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

4 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

До технологічних дугових плазмотронів висуваються загальні та специфічні (для кожного технологічного процесу) вимоги:

- високий ККД;
- здатність формувати компактний високотемпературний газовий потік, що може забезпечити ефективне нагрівання до необхідної температури матеріалу, що обробляється. При плазмовому нанесенні покриттів додається здатність прискорювати частинки матеріалу до визначеної швидкості;
- здатність забезпечувати стабільність параметрів потоку плазми за температурою, швидкістю та складом, а також потрібний профіль цих параметрів за перерізом вздовж та поперек потоку;
- можливість зміни (у певних межах) абсолютного значення потужності конкретного зразка;
- здатність до зміни питомої енергії високотемпературного робочого тіла залежно від вимог технологічного процесу;
- здатність змінювати у процесі роботи окиснювально-відновний потенціал плазмового середовища;
- високий ресурс роботи;
- простота конструктивного виконання, яка забезпечує якісний ремонт в умовах виробництва;
- технологічність при масовому виготовленні;
- мінімальні масо-габаритні показники;
- раціональне використання кольорових матеріалів;

- естетичний вигляд та ергономічна доцільність.

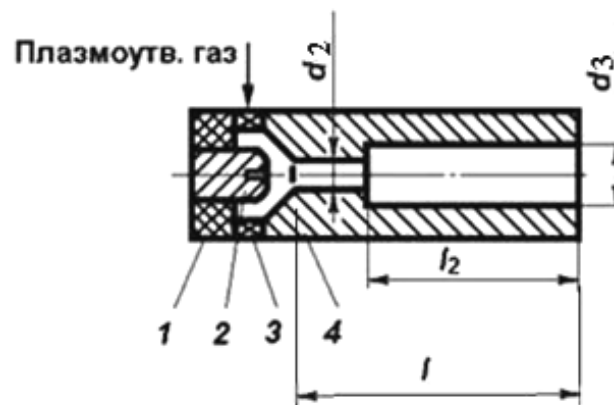
Енергетичний процес нагрівання газу електричною дугою значною мірою визначається геометричними характеристиками дугового каналу, складом та витратою плазмоутворювальної суміші, схемою подавання плазмоутворювального газу.

Відсутність коректних аналітичних методів розрахунку геометричних та режимних параметрів плазмотронів підвищує важливість експериментальних методів дослідження.

У роботі досліджувались плазмотрони, які працюють на сумішах повітря з вуглеводневими газами потужністю від 25 кВт до 50 кВт (у межах однієї конструкції).

У всіх випадках зберігався незмінним кут входу у дуговий канал і геометрія катодного вузла. Кут входу в дуговий канал становив 90° .

При постійній загальній довжині анода 43,5 мм досліджували аноди з гладким каналом діаметром від 4,5 до 7 мм (із кроком 0,5 мм) і аноди, які мають канал з уступом (рис. 4.1).



l – ізолятор; 2 – термохімічний електрод (катод); 3 – завихрювач; 4 – вихідний електрод (анод)

Рисунок 4.1 – Принципова схема плазмотрона [51]

Діаметр доуступної частини d_2 змінювався від 4,5 до 6 мм; діаметр зауступної частини d_3 – від 5,5 до 10 мм з тим же кроком 0,5 мм.

Відношення загальної довжини анода l до довжини вузької частини змінювалось від 1,6 до 7 із кроком 1,8.

Для досліджених плазмотронів при $d_2 \leq 4$ мм спостерігалось теплове замикання дугового каналу на стадії запуску плазмотрона; при $d_2 > 7$ мм швидкісні характеристики струменя є діапазоні досліджуваних витрат плазмоутворювального газу не задовольняють вимогам технології плазмового напилення.

Підтримуючи постійними витрату і вихідний склад газу, змінювали робочий струм дуги із кроком 50 А в межах сталої роботи плазмотрона (без порушення дуги, переміщення в вузьку частину каналу, виносу дуги на торець анода, наявності великомасштабних низькочастотних пульсацій та ін.).

Середній діапазон зміни струму склав (140-300) А. Верхня межа обмежена стійкістю електрода 0Б1541А, нижня – стійкою роботою джерела струму АПР - 402.

Проведені експериментальні серії на трьох рівнях витрат плазмоутворювальної суміші: 1,5; 2,5; 3,5 м³/год. і при 5 складах плазмоутворювальної суміші: $n = 0$ (повітря); $n = 0,085$; $n = 0,12$; $n = 0,18$; $n = 0,24$.

Основним показником ефективності застосування генераторів плазми є продуктивність технологічних процесів, реалізованих за їх допомоги. Але враховуючи, що продуктивність технологічних процесів інженерії поверхні зазвичай пропорційна потужності використаного генератора плазми, практично важко порівнювати за цим показником плазмотрони різної потужності. Доцільніше аналізувати питомі енергетичні показники, які демонструють вибрані для порівняння зразки, а також безрозмірні характеристики процесу перетворення енергії.

Враховуючи, що генератор плазми (плазмотрон) є перетворювачем одного виду (або кількох видів) енергії у теплову енергію робочого тіла і призначений для створення стабільно відтворюваних протягом певного часу потоків низькотемпературної плазми з відомими температурою, швидкістю та розподілом параметрів у просторі, метою проведених досліджень було визначення оптимальних геометричних характеристик дугового каналу, які б забезпечували цю ефективність процесів перетворення енергії.

Першим за значимістю показником енергетичної ефективності плазмового генератора є його ККД. Він характеризує повноту перетворення енергії і не є сталою величиною, а залежить від режимних параметрів генерації плазми. Значення ККД сучасних технологічних генераторів плазми коливається в широких межах: від 0,5 до 0,9. Наприклад, характерні значення ККД плазмотронів для нанесення покриттів, які працюють на сумішах повітря із вуглеводневими газами, лежать в діапазоні (0,7-0,85) [47].

Ще одним, не менш важливим енергетичним параметром технологічних плазмотронів, є значення питомої ентальпії плазмового струменя. Саме цей показник характеризує потенційну можливість плазмового струменя нагрівати за визначений час матеріал до потрібної температури. На практиці питома ентальпії визначається кількістю енергії, вкладеної в одиницю об'єму газу за одиницю часу [48]. Для плазмового нанесення покриттів, наприклад, значення питомої ентальпії визначає тип матеріалу, який може бути оброблений за допомогою конкретного робочого тіла. Матеріали із відносно низькою температурою плавлення (метали, сплави, пластмаси тощо) можуть утворювати покриття при значеннях питомої ентальпії (3-7) кВт·год./м³. Для нанесення тугоплавких покриттів, наприклад, із кераміки необхідно підвищувати питому ентальпії до значень (8-12) кВт·год./м³. Здатність плазмового генератора через зміну режимних параметрів генерації плазми змінювати значення питомої ентальпії плазмового струменя є необхідною умовою його універсальності як інструмента для

обробки матеріалів. За цим показником особливе місце займають плазмові генератори на сумішах повітря із вуглеводневими газами. За рахунок подавання на вхід плазмотрона двох видів енергії (електричної енергії та енергії горючого газу), з'являється додатковий канал впливу на загальну потужність генератора плазми без погіршення його загального ККД [49].

У ідеальному випадку необхідне узгодження встановленої потужності джерела живлення і генератора плазми, який від нього живиться.

Враховуючи сказане, для визначення оптимальних прохідних перетинів анода при первинній обробці отриманого масиву даних, логічним шляхом нами був обраний умовний безрозмірний критерій оптимізації:[51]

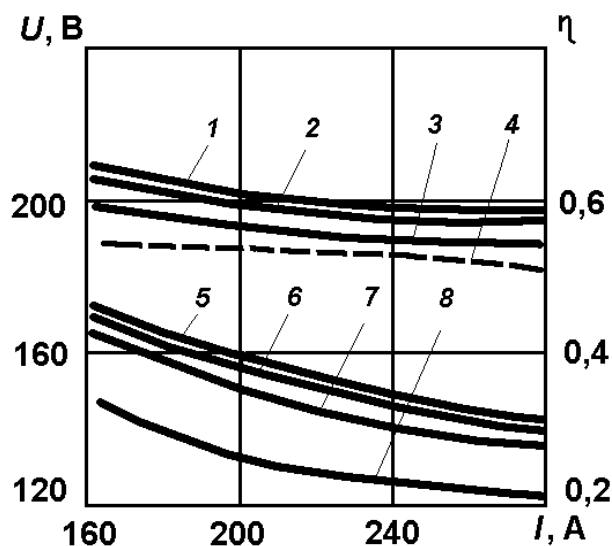
$$\beta = \bar{\eta} \cdot \frac{\epsilon_{\max}}{\epsilon_{\min}} \cdot \frac{\bar{U}}{U_{xx}}, \quad (4.1)$$

де $\bar{\eta} = \frac{1}{I_{\max} - I_{\min}} \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} f(I) dI$ – осереднений по діапазону зміни робочого струму

термічний ККД плазмотрона;

I_{\max} та I_{\min} – відповідно максимальне та мінімальне значення робочого струму;

$\eta = f(I) dI$ – функція залежності ККД від струму за умови сталої витрати плазмоутворювального газу та незмінного співвідношення між компонентами плазмоутворювальної суміші (рис. 4.2).



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

Рисунок 4.2 – Узагальнені ВАХ (1, 2, 3, 4) та залежності ККД від струму дуги (5, 6, 7, 8) двоелектродного плазмотрона із автогазодинамічною стабілізацією довжини дуги (метан; сумарна витрата плазмоутворювальної суміші – $2,5 \text{ м}^3 / \text{год.}$)

[51]

$\frac{\varepsilon_{\max}}{\varepsilon_{\min}}$ – відношення ентальпії ентальпії на зрізі анода плазмотрона за тих же умов;

$\bar{U} = \frac{1}{I_{\max} - I_{\min}} \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} f(I) dI$ – осереднене значення напруги на дузі при зміні струму

від мінімального до максимального значення, причому $U = f(I)$ (рис. 4.1) при $Q_{\Sigma}, n = \text{const}$ – об'ємний вміст природного газу в плазмоутворювальній суміші;

$U_{\text{хх}}$ – напруга холостого ходу джерела живлення. Характеристики побудовані з використанням залежностей, наведених у роботі [48].

Згідно із запропонованим критерієм, у випадку оптимізації геометричних розмірів дугового каналу кращий плазмотрон повинен мати вищий термічний ККД, ширший

діапазон зміни питомої ентальпії на зрізі анода, а його середня напруга на дузі повинна якомога менше відрізнятися від напруги холостого ходу джерела живлення.

В ідеальному варіанті, при повному виборі потужності джерела живлення $\frac{\bar{U}}{U_{xx}} = 1$

. За відсутності теплових втрат $\bar{\eta} = 1$. Мінімальний робочий струм тиристорного джерела типу АПР-402 визначається налаштуванням джерела в становить , зазвичай, $I_{\min} = 100$ А. Менший за значенням струм не підтримується схемою керування джерелом, але у разі необхідності є технічна можливість змінити це значення у менший бік шляхом заміни частини елементної бази схеми керування.

Максимальний робочий струм визначається допустимим струмовим навантаженням катода і становить $I_{\max} = 300$ А.

Внаслідок цього межеве значення співвідношення максимальної та мінімальної питомої ентальпії:[51]

$$\frac{\varepsilon_{\max}}{\varepsilon_{\min}} = \frac{P_{\max} Q_{\Sigma}}{P_{\min} Q_{\Sigma}} = \frac{\bar{U} I_{\max} \bar{\eta}_{\Gamma}}{\bar{U} I_{\min} \bar{\eta}_{\Gamma}} = \frac{I_{\max}}{I_{\min}} = \frac{300}{100} = 3, \quad (4.2)$$

а значення $\beta_{\text{ід}} = 1 \cdot 1 \cdot 3 = 3$.

На рис. 4.3 представлена залежність коефіцієнта ефективності від вмісту природного газу у газоповітряній суміші для $d_2 = 4,5$ мм та $l/l_2 = 1,6$ при різних значеннях витрати та зміни d_3 від 5,5 до 9,5 мм.

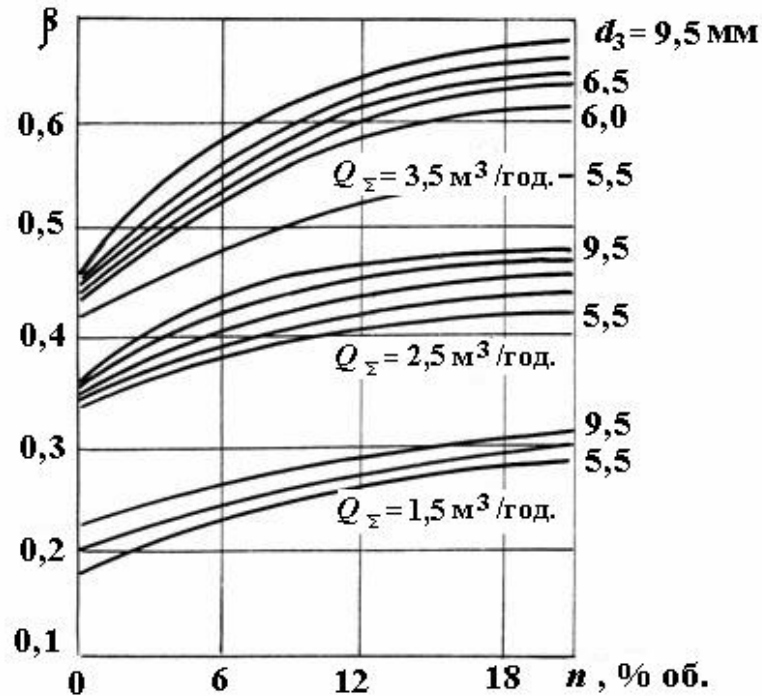


Рисунок 4.3 – Залежність параметра ефективності β від вмісту природного газу в суміші ($d_2 = 4,5$ мм, $l/l_2 = 1,6$) [51]

Для порівняння на цьому ж рисунку наведена залежність $\beta = f(n)$ для гладкого анода, яка свідчить, що за енергетичними характеристиками плазмотрон із само встановлюваною довжиною дуги суттєво поступається плазмотрону із уступом.

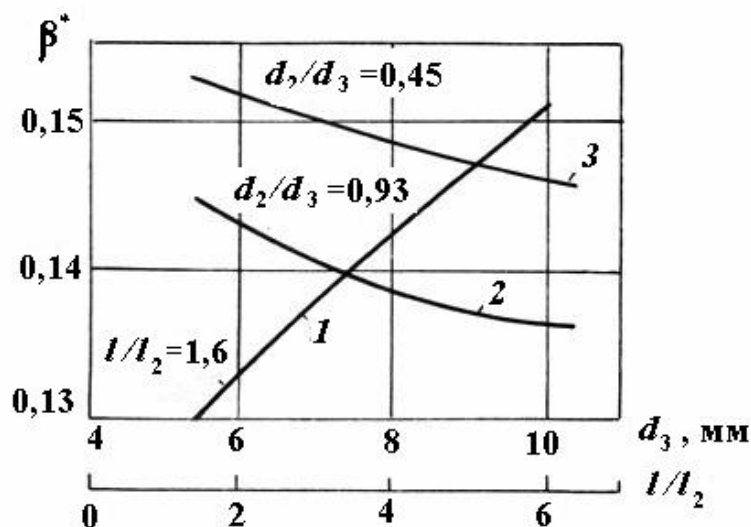
Як видно із рисунка, коефіцієнт ефективності β суттєво залежить від витрати та складу плазмоутворювальної суміші. Для виявлення пріоритетних геометричних співвідношень цей вплив виключаємо, використовуючи приведений коефіцієнт ефективності у вигляді: [51]

$$\beta^* = \frac{\beta}{Q_{\Sigma}^{0,9}(1,2+n)}, \quad (4.3)$$

де n – вміст природного газу в долях. од.;

Q_{Σ} – витрата газу, м³/ год.

При зміні n від 0,08 до 0,24, тобто від 8 до 24 % об, і витрати від 1,5 до 3,5 м³/ год., всі дані рис. 4.3 з точністю ± 1 % вироджуються у залежність $\beta^* = f(d_3)$ (рис.4.4).



$n = (8 \dots 24) \% \text{ об.}, Q_{\Sigma} = (1,5-3,5) \text{ м}^3 / \text{ год.}$

Рисунок 4.4 – Залежність приведенного коефіцієнта ефективності від діаметра вихідної ділянки каналу (1) та довжини вузької частини каналу за умови постійної довжини анода (2,3) [51]

Вплив співвідношення довжини анода до довжини його доуступної частини також можна оцінити за допомогою рис. 4.4. Як видно із рисунка, незалежно від зміни співвідношення d_2/d_3 , приведений коефіцієнт ефективності зростає зі зменшенням l/l_2 .

Найкраще співвідношення $l/l_2 = 1,6$. При подальшому його зменшенні дуга втягується у вузьку частину анода і плазмотрон починає працювати у нештатному режимі.

На рис. 4.5 представлена залежність β^* від співвідношення d_2/d_3 . Як видно із графіків, параметр ефективності зростає із наближенням до значень (0,45-0,5), що добре узгоджується із гідродинамічними уявленнями щодо надійної роботи уступу як фактора обмеження зони шунтування дуги саме при таких співвідношеннях.

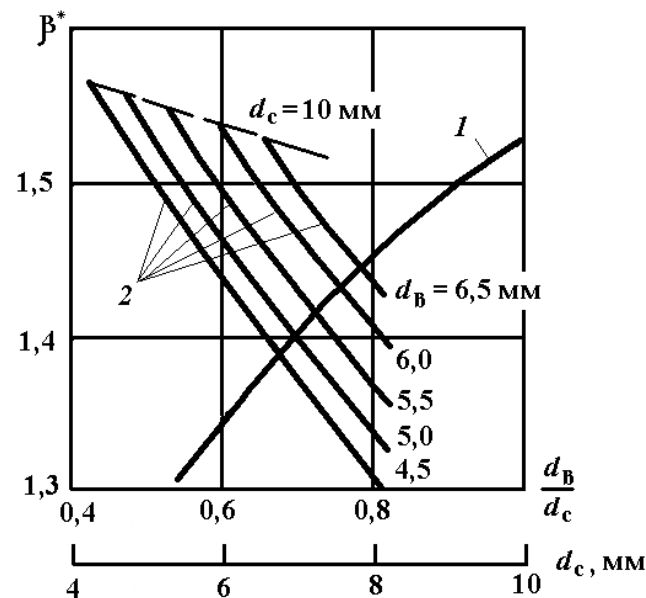


Рисунок 4.5 – Залежність приведенного критерію ефективності β^* від співвідношення діаметрів дугового каналу d_B/d_C та діаметра соплової частини каналу d_C [51]

Підсумовуючи наведені результати, можна стверджувати, що запропонований коефіцієнт ефективності може бути використаний для порівняльного аналізу плазмотронів інших конструкцій і потужностей.

На сьогодні створено і застосовується значна кількість плазмових пристроїв різної потужності. Вони відрізняються продуктивністю, надійністю, діапазоном зміни енергетичних характеристик тощо. Вибір оптимальної для конкретного технологічного процесу конструкції здійснюється, зазвичай, за одним, критичним на думку експерта, параметром. Такий вибір часто носить суб'єктивний характер і не завжди є раціональним.

Універсальний критерій оцінки енергетичної ефективності технологічних плазмових генераторів посередньої дії, який не залежить від потужності та продуктивності пристроїв, що порівнюються, дозволяє перевести процес вибору із категорії якісного аналізу у кількісний.

Для цього можливе його модифікація з метою підвищення універсальності застосування. Наприклад, середнє значення ККД може бути визначене як середнє арифметичне мінімального і максимального значень, отриманих при зміні всіх можливих режимних параметрів генерації плазми.

Визначення граничних значень питомої ентальпії можливе як у запропонованому варіанті – при зміні струму дуги за умови сталої витрати плазмоутворювального газу та незмінного співвідношення між компонентами плазмоутворювальної суміші. Іншим варіантом може бути розрахунок значень мінімальної та максимальної питомої ентальпії за умови мінімального струму та максимальної витрати плазмоутворювального газу і максимального струму та мінімальної витрати газу, відповідно.

Плазмовий генератор є невід'ємним елементом системи «джерело живлення-плазмотрон». Стабільність роботи плазмотрона значною мірою залежить від узгодження вольт-амперних характеристик (ВАХ) плазмотрона і джерела живлення. До того ж, узгодження параметрів згаданої системи дозволяє більш ефективно

використовувати встановлену потужність джерела живлення і може дозволити знизити його вартість за рахунок спрощення конструкції.

Як відомо, форма вольт-амперної характеристики плазмового генератора залежить від його принципової схеми і може бути спадною, нейтральною або висхідною [29]. Застосування плазмових генераторів зі спадною характеристикою потребує використання джерел живлення із різко спадною (вертикальною) ВАХ – «джерел струму». Формування характеристики такого виду забезпечується за рахунок значного ускладнення схеми керування джерелом живлення [50]. Плазмові генератори із висхідною характеристикою не висувають жорстких вимог до форми ВАХ джерела живлення і, в окремих випадках, дозволяють працювати із «джерелами напруги», тобто джерелами живлення із жорсткою горизонтальною ВАХ [29].

Крім того, застосування генераторів плазми із висхідною ВАХ підвищує ефективність керування загальною потужністю плазмотрона шляхом зміни струму дуги. Це, у свою чергу, підвищує діапазон можливої зміни питомої ентальпії струменя плазми.

Форма ВАХ, як критерій для порівняльної оцінки енергетичної ефективності генераторів плазми, може бути врахована у вигляді співвідношення значень напруги на дузі у крайніх точках діапазону робочих струмів плазмотрона:[51]

$$\frac{U_{I_{\max}}}{U_{I_{\min}}}, \quad (4.4)$$

де $U_{I_{\max}}$ – значення напруги на дузі при максимально допустимому струмі дуги;

$U_{I_{\min}}$ – значення напруги на дузі при мінімально допустимому струмі дуги.

Таким чином, для порівняльної оцінки енергетичної ефективності технологічних плазмотронів посередньої дії пропонується використовувати безрозмірний критерій, який є добутком трьох безрозмірних параметрів:[51]

$$\beta = \bar{\eta} \cdot \frac{\varepsilon_{\max}}{\varepsilon_{\min}} \cdot \frac{U_{I_{\max}}}{U_{I_{\min}}} \quad (4.5)$$

Енергетично більш ефективним для обробки матеріалів можна вважати той генератор плазми, для якого розраховане значення β є найбільшим. Значення β зростає у разі підвищення ККД, розширення діапазону можливої зміни питомої ентальпії плазми та формування висхідних вольт-амперних характеристик. Порівняння конструкцій, у випадку різних за потужністю і конструктивним особливостями плазмотронів, доцільно здійснювати для номінальних витрат плазмоутворювального газу і рекомендованого у кожному конкретному випадку складу плазмоутворювальної суміші.

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 напilenня 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 напilenня. Принципово для плазмового напilenня можливе використання більшості відомих типів плазмотронів, проте технологія напilenня 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 мг/м^3 , ацетону 200 мг/м^3 , спирту 1000 мг/м^3 .

5.2. Інженерні рішення для забезпечення безпеки праці

Плазмова обробка Для проведення плазмового зварювання, різання та напилення металів виділяють окремі приміщення або ізольовані сектори цеху. Допоміжні операції для плазмової обробки (механічна обробка, очищення, приготування порошків тощо) повинні проводитися за межами основних ділянок, де використовується плазмова технологія. 13

Пристрої місцевої витяжної вентиляції повинні блокуватися з технологічним обладнанням. Ручну плазмову обробку необхідно виконувати в укритті типу витяжної шафи, внутрішні поверхні якої повинні мати звукопоглинаюче покриття. Установки високочастотної низькотемпературної плазми необхідно екранувати відповідно до вимог ГОСТ 12.1.006-76. Балони зі зжатыми газами потрібно встановлювати за межами дільниці плазмової обробки з наступною подачею газу до газозабірної щита. У приміщеннях, де зберігається водень, повинна бути механічна приточно-витяжна вентиляція з кратністю повітрообміну не менше 10. Вміст водню у повітрі приміщення необхідно контролювати автоматичними газоаналізаторами.

Плазмове напилення металів слід виконувати у герметичних камерах з контролем атмосфери або в кабінах, виготовлених за формою і величиною виробів і покритих зсередини звукопоглинаючим матеріалом з коефіцієнтом звукопоглинання не менше 0,7. При напиленні деталей великих розмірів для зниження рівня шуму і ультразвуку слід застосовувати звукоізоляційні кожухи, не міцно прикріплені до обладнання. Якщо за умовами технологічного процесу на установках неможливо застосовувати звукоізолюючі кожухи, оператори повинні знаходитися в

звукоізольованих кабінах з вікнами для спостереження і дистанційним керуванням процесу. Якщо місцева витяжна і загальнообмінна вентиляція не може забезпечити належну чистоту повітря, наприклад, при різанні в замкнених і напівзамкнених просторах, необхідно здійснювати примусову подачу чистого повітря в зону дихання робітника.

Для усунення можливості ураження електричним струмом разом з загальними засобами електробезпеки необхідно перевіряти роботу кнопочних пристроїв дистанційного вмикання і вимикання установки з метою запобігання випадковому пуску обладнання та блокуючих пристроїв, що забезпечують автоматичне відключення електроживлення у разі зупинки подачі води для охолодження, а також блокування кожуха, що закриває струмопідвідні частини осцилятора і відключає електроживлення при зніманні кожуха. Усі операції з плазмової обробки потрібно проводити не менш ніж двома робітниками. Для обезжирення деталей перед напиленням не можна застосовувати трихлоретилен, при взаємодії якого з азотом можливе утворення фосгену.

Для попередження дії токсичних речовин передбачені:

- окреме приміщення для приготування розчинів та робіт з токсичними речовинами, яке обладнане загальнообмінною та місцевою витяжною, вентиляцією;
- місцева витяжна вентиляція на робочих місцях Швидкість повітря в робочому перерізі місцевої вентиляції повинна бути не менша 0,6 м/с;
- очищення видаленого вентиляцією повітря, що забруднене шкідливими речовинами, для чого вентиляція оснащується фільтром для очищення повітря від пилу;
- світлову та звукову сигналізація, яка сповіщає про припинення роботи вентиляції;

- індивідуальні засоби захисту (респіратор фільтруючий універсальний РУ-60М).

Для попередження дії шуму та вібрації передбачено використання активних трубчастих глушителів абсорбційного типу для облицювання звукопоглинаючими матеріалами внутрішньої поверхні повітропроводів (мінераловатні щити, $a = 0,98$ при $f = 1000\text{Гц}$, $\delta = 30$ мм для глушіння шуму високих частот).

Для попередження враження електричним струмом:

- захист ізоляції зовнішньої електропроводки від термічних та механічних пошкоджень;
- установка ізоляційних огорожень, захисних кожухів. Установка приладів для відключення живлення у шафі керування та автоматичні вимикачі;
- надійне заземлення всіх струмоведучих частин обладнання, які мають бути під напругою;
- опір ізоляції між корпусом та підкладкотримачем (до якого прикладена напруга до 1500В постійного струму) 20 МОм;
- опір між пристроєм заземлення і будь-якою металічною частиною установки, крім конструктивно ізольованих елементів, не більше 0,1 Ом;
- опір ізоляції між джерелом плазми та корпусом камери 1МОм.

5.3. Розрахунок інженерного рішення.

Проектування системи починається з розрахунку необхідної продуктивності по повітрю, яка вимірюється в кубічних метрах за годину. Розрахунок об'єму повітря, яке необхідно видалити місцевою вентиляцією L_m , визначають, виходячи з заданої швидкості всмоктування біля джерела виділення шкідливих речовин, характеристики спектру швидкостей всмоктування для певної конструкції всмоктувального отвору та наявності поверхонь, що огорожують зону всмоктування. У цьому випадку

$$L_M = 3600 \times F_0 \times V_0,$$

$$F_0 = 3.14 \times 0.25^2 = 0.18$$

$$L_M = 3600 \times 0.18 \times 30 = 1944 \text{ кубів повітря}$$

де F_0 – площа відкритого перерізу витяжного отвору відсмоктувача, м² ;
 V_0 – швидкість всмоктування повітря у цьому прорізі, м/с. Площу F_0 визначають конструктивними особливостями технологічного обладнання та вибраного витяжного пристрою.

Значення V_0 знаходять, виходячи з умов забезпечення заданої швидкості повітря V_x в зоні зварювання або різання на відстані X (м) від центра всмоктуючого отвору.

Швидкість руху повітря, що створюється місцевими відсмоктувачами біля джерел виділення шкідливих речовин, повинна бути: - при плазмовому напиленні – не менше 1,3 м/с

Для витяжних пристроїв з гострими краями найпростішої форми швидкість всмоктування повітря розраховується за такими формулами:

$$V_0 = 16 \times V_x (X/d)^2 ;$$

$$V_0 = 16 \times 1,3 \times (0.30/0.25)^2 ;$$

$$V_0 = 30 \text{ м/с}$$

де d – діаметр округлого отвору або гідравлічний діаметр для квадратного отвору, який умовно може дорівнювати квадрату швидкості, м;

5.4. 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 [14, 15]. З 26 метою запобігання виникненню та ліквідації надзвичайних

(аварійних) ситуацій на підприємстві має бути план локалізації та ліквідації аварійних ситуацій і аварій у відповідності до положення [14].

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.

5.5. ПОЖЕЖНА БЕЗПЕКА

Згідно з НАПБ Б.07.005-86 приміщення, у яких виконуються зварювальні роботи, за вимогами вибухопожежної безпеки належить до категорії Г (негорючі речовини й матеріали у гарячому, розжареному, розплавленому станах, процеси обробки яких супроводжуються виділенням променистої теплоти, іскор та полум'я; горючі гази, рідини, тверді речовини, які спалюються чи утилізуються у вигляді палива). 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. Клас пожежі – Е (пов'язаний з аваріями електроустановок)

Таблиця 5.5 клас пожежі, пов'язаний з аваріями електроустановок [52]

Таблиця Клас пожежі, пов'язаний з аваріями електроустановок

1	Клас пожежі				
	А	В	С	Д	Е
2	3	4	5	6	
Характеристика горючого середовища	Тверді горючі речовини (дерево, папір, текстиль тощо)	ГР та плавильні матеріали (мазут, гас, спирти, лаки, синтетичні матеріали)	ГГ (H ₂ , C ₂ H ₂ , інші вуглеводні тощо)	Метали та їх сплави (К, Na, Mg)	Електроустановки
Вогнегасні засоби	Усі види (передусім – H ₂ O)	Розпилена H ₂ O, піни, галоїдовуглеводні (хладони), порошки	Газові сполуки: інертні – N ₂ , CO ₂ , галоїдовуглеводні, порошки (H ₂ O – для охолодження)	Порошки (спокійна подача на поверхню горіння)	CO ₂ , порошки, галоїдовуглеводні

Пожежна безпека (ГОСТ 12.1.004-85) 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 і вибухонебезпечних речовин; • застосування пожежної сигналізації з датчиком (ИДФ-І, ДПД 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.07.005-86).

При організації технологічного процесу дотримуються усіх вимог електростатичної іскробезпеки (ГОСТ 12.1.018-79). 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 зварювання, 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 в виробничому приміщенні, в якому виконується зварювання, передбачаємо наявність датчиків, які своєчасно сповіщають про виниклу пожежу і дають команду на вмикання автоматичної системи гасіння пожежі.

5.6. ВИМОГИ БЕЗПЕКИ В АВАРІЙНИХ СИТУАЦІЯХ

У випадку пробією електричної напруги на корпус зварювального агрегату необхідно відключити рубильник і довести до відома про це майстра або начальника ділянки.

У випадку потрапляння кого-небудь під напругу, необхідно відключити зварювальний 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 зварювального 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 ділянці) засобами пожежогасіння (вогнегасник, пісок, пожежний кран тощо); – викликати до місця пожежі посадових осіб (начальника цеху, ділянки). У випадку одержання травми необхідно довести до відома про це майстра, начальника ділянки та звернутися в медпункт.

6 Розроблення стартап-проекту

6.1 Резюме проекту

Стартап як форма малого ризикового (венчурного) підприємництва впродовж останнього десятиліття набула широкого розповсюдження у світі через зниження бар'єрів входу в ринок (із появою Інтернету як інструменту комунікацій та збуту стало простіше знаходити споживачів та інвесторів, займатись пошуком ресурсів, перетинати кордони між ринками різних країн), і вважається однією із наріжних складових інноваційної економіки, оскільки за рахунок мобільності, гнучкості та великої кількості стартап-проектів загальна маса інноваційних ідей зростає.

Даний проект включає в себе реконструкцію існуючого парового котла з переведенням на спалювання біомаси. Після закінчення всіх робіт, це дозволить замовнику суттєво економити витрати на природний газ а також утилізувати відходи власного виробництва. Також головною перевагою є забезпечення себе гарячим водопостачанням, теплом та електроенергією і можливість продавати споживачу.

Даний проект виконує ТОВ "Енергомашпроект", яке має великий досвід по впровадженню новітніх технологій по спалювані біомаси та відходів виробництва. За роки існування має за своїми плечами велику кількість вдало виконаних проектів та визнання на ринку серед конкурентів.

Загальні витрати проекту на йдуть розроблення технічної документації, матеріали та виконання монтажних робіт. Всі розходи покриває замовник, який зацікавлений в реалізації даного проекту.

6.2 Організація проекту

ЗАТ "Заплазський цукровий завод", 66513, Одеська обл. Любашівський район, смт. Зеленогірське, площа 60 - річчя Жовтня. Зареєстрований в Любашівській районній адміністрації Одеської обл. 17.03.2000. Даний проект, а саме реконструкція парового котла, реалізує ТОВ "Енергомашпроект" яке має великий досвід у реалізації проектів, які пов'язані з реконструкцією або впровадженням нових технологій.

6.3 Канва бізнес моделі проекту

Таблиця 6.1 - Канва бізнес моделі проекту [54]

КЛЮЧОВІ ПАРТНЕРИ	КЛЮЧОВІ ВИДИ ДІЯЛЬНОСТІ	ЦІННІСНІ ПРОПОЗИЦІЇ	ВЗАЄМОВІДНОСИНИ ЗІ СПОЖИВАЧАМИ	(5) СПОЖИВЧИЙ СЕГМЕНТ
<u>БМЗ</u> <u>"Прогресс"</u> <u>ОАО</u> «Сатер» ПАО «Харківський котельно-	Монтаж котельного агрегату, зварювальні роботи.	Проект надає можливість спалювання біомаси на реконструйованому паровому котлі. Це призведе на	Встановлені ділові відносини на основі договорів та контрактів.	Споживачем є ЗАТ "Заплазський цукровий завод". В

механічний завод»	КЛЮЧОВІ РЕСУРСИ	зменшення витратів на природний газ.	КАНАЛИ ЗБУТУ	даному проєкті не можна виділити різні споживчі сегменти.
Обладнання для котельні	Матеріали	Додатковим фактором	Збут через завод	
Матеріали для виготовлення продукції	Сировина	являється знищення відходів виробництва.	виробник	
Технічна документація	Люди			

6.4 Ключові види діяльності проєкту

Вид проєкту за характером інновації:

- дослідно-конструкторська робота: розробка технічної документації на реконструйований котел;
- запровадження нової технології: спалювання біомаси на ланцюговій решітці;

Спрямованість проєкту:

- економія енергоресурсів;
- поліпшення стану навколишнього середовища.

В проєкті запропоновано спалювання біомаси, що дасть значну економію на витраті природного газу.

Висновок щодо науково-технічного рівня ідеї:

- на рівні кращих світових аналогів;
- має аналоги Україні.

Даний проект на рівні з світовими аналогами через свою практичність, основне обладнання має європейські сертифікати якості і високі показниками ККД.

Таблиця 6.2 - Основні бізнес-процеси проекту [54]

Група процесів	Бізнес-процес	Ступінь опрацювання бізнес-процесу	
		є реалізованим	буде реалізованим
Розробка технічних умов та проекту	Розробка технічних умов	є реалізованим	
	Підбір обладнання	є реалізованим	
	Розробка проекту	є реалізованим	
Погодження з замовником	Погодження з замовником обладнання	є реалізованим	
	Погодження проекту з замовником і інстанціями	є реалізованим	

Продовження таблиці 6.2

Реалізація проекту	Закупівля матеріалу		буде реалізованим
	Будівельні роботи		буде реалізованим
	Монтаж обладнання		буде реалізованим
	Пуско-налагоджувальні роботи		буде реалізованим
Обслуговування котельні	Гарантійне обслуговування		буде реалізованим
	Після гарантійне обслуговування		буде реалізованим

6.5 Ціннісні пропозиції та споживачі

Проектом передбачено спалювання відходів виробництва на реконструйованому паровому котлі. Це призведе до зменшення витрат на природний а також видалення відходів зі складів зберігання. Дане підприємство буде забезпечене електроенергією, теплом та гарячою водою, яке буде виробляти сама.

Характер формування споживчої цінності проекту:

- здешевлення задоволення існуючих потреб;
- незалежність від енергосистеми.

Таблиця 6.3 - Зміст ідеї проекту [54]

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Сегменти споживачів	Цінність для споживачів
Незалежність від енергосистеми	1. Вироблення електроенергії	Комунальні підприємства міста	Власна електроенергія, яку можна як продавати так і використовувати у власних цілях
	2. ГВП та вироблення тепла	Комунальні підприємства міста	Цілорічна і безперебійна подача гарячої води

Таблиця 6.4 - Аналіз ідеї проекту [54]

№	Техніко- економічні характери- стики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (сл.с.))	N (н.с.)	Б (с.с.)
		Мій проект	Конку- рент 1	Конку- рент 2	Конку- рент 3			
1.	Котел паровий	ПК ТОВ "Енергом"						12 млн.
2.	Котел водогрійни		Російськи й котел					13,5 млн. €
3.	Котел утилізатор			Польські й котел			15,5 млн. \$	
4.	Піковий котел				Німецьки й котел	17,5 млн. \$		

Таблиця 6.5 - Технологічний аудит ідеї проекту [54]

№	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1.	Будівництво котельні		Технологія відпрацьована	Технологія доступна
2.	Розробка технічної документації	Спеціалісти конструкторського відділу	Технологія відпрацьована	Технологія доступна
3.	Впровадження новітніх технологій	Спеціалісти конструкторського відділу	Технологія відпрацьована	Технологія доступна
4.	Виготовлення деталей	Завод виробник	Технологія відпрацьована	Технологія доступна
5.	Монтаж котельного агрегату	Працівники	Технологія відпрацьована	Технологія доступна
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: поступове виконання всіх пунктів договору				

Таблиця 6.5 - SWOT-аналіз проекту [54]

<p>Сильні сторони (S):</p> <p>економічність</p> <p>енергонезалежність</p> <p>зменшення витрат</p>	<p>Слабкі сторони (W):</p> <p>вагома ціна</p> <p>важкий монтаж</p>
<p>Можливості (O):</p> <p>збільшення потужності</p> <p>удосконалення систем</p> <p>встановлення даних систем на інші КА</p>	<p>Загрози (T):</p> <p>можливі поломки</p> <p>довгостроковий простій обладнання</p> <p>великі затрати</p>

6.6 Взаємовідносини зі споживачами та канали збуту

Таблиця 6.6 - Взаємовідносини зі споживачами та канали збуту [54]

№	Сегмент споживачів	Особливості поведінки	Вимоги споживачів	Канали збуту	Інші аспекти взаємовідносин
1.	Комунальні підприємства міста	Робота в широкому діапазоні навантаження з паспортними показниками; найнижча ціна	Фактори, що формують поведінку клієнта: стандарти, технічні регламенти, ціна	Теплоцентра лі, лінії електропередач	Контракти, договори

6.7 Обґрунтування ресурсів та витрат проекту

Таблиця 6.7 - Товари аналоги [54]

№	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на продукцію	Розрахункова ціна продукції
1.	12 млн.\$	9 - 15 млн.\$	2 млн.\$	9-17 млн.\$	12 млн.\$

6.8 План робіт та партнери проекту

Таблиця 6.8 - Розрахунок загальних початкових інвестиційних витрат [54]

№	Назва етапу	Строки виконання	Обсяги фінансування, тис. грн.
1.	Проведення досліджень	1 місяць	100
2.	Розробка технології	2-3 місяці	500
3.	Придбання устаткування	1 місяць	5000
4.	Організація діяльності та запуск проекту	3-4 місяці	400
5.	Витрати на управління	1 місяць	200

6.	Початкові виробничі витрати	2 тижні	150
7.	Інші витрати	1 місяць	700
Разом		10-12 місяців	7050

Таблиця 6.9 - Розрахунок виробничих витрат [54]

№ з/п	Стаття витрат	Сукупні витрати за період, тис. грн.
		2018
1.	Загальногосподарські витрати	500
1.1.	витрати на демонтаж існуючого котла	300
1.2.	комунальні витрати	-
2.	Витрати на матеріальні ресурси (комплектуючі. сировина)	3000
3.	Витрати на оплату праці	500
4.	Інші витрати (якщо є)	-
<i>Разом:</i>		4300

Таблиця 6.10 - Розрахунок загальних витрат на реалізацію проекту [54]

Показник	Значення по роках
	2018
Інвестиційні витрати(п. 7.3)	7,5 млн.грн
Виробничі витрати(п. 7.4)	4,3 млн.грн
Обсяг загальних витрат, в тому числі за рахунок	
– власних коштів	
– кредиту	
– коштів інвестора	– 12 млн.грн

6.10 Грошовий потік та економічна оцінка проекту

Точка беззбитковості відображає обсяг виробництва інноваційної продукції, при досягненні якого виручка від реалізації покриває сумарні витрати на її виробництво. Розрахунок точки беззбитковості проводиться за формулою:

$$T_6 = \frac{C}{P - V} = \frac{1}{12 - 3} = 0,1,$$

де C – постійні витрати на весь обсяг продукції (ті, які не залежать від обсягу виробництва продукції – загальногосподарські витрати та витрати на оплату праці, визначені в п. 7.4);

P – ціна одиниці продукції;

V – змінні витрати на одиницю продукції (ті, які пропорційно залежать від обсягу виробництва продукції – витрати на матеріальні ресурси, визначені в п. 7.4).

Даний проект зможе досягти рівня безбитковості через 3 роки.

6.11 Розрахунок індексу рентабельності інвестицій в проект

Таблиця 6.11 - План робіт та партнери проекту [54]

№	Бізнес-процес проекту	Термін виконання початок – закінчення (місяць, рік)	Виконавець, співвиконавці	Результат
1.	Тендер	2017	ТОВ "Енергомашпроект"	Виграний
2.	Проведення досліджень	1.01.2018	<u>ОАО «Сатер»</u>	Виконані
3.	Розроблення тех.документації	1.02-1.03.2018	ТОВ "Енергомашпроект"	Виконана
4.	Виготовлення деталей	1.04.-1.06.2018	<u>БМЗ"Прогресс"</u> ПАО «Харківський котельно-механічний завод»	У процесі виготовлення
5.	Монтаж КА	1.07-1.10.2018	<u>БМЗ"Прогресс"</u>	Не виконано
6.	Налагодження ПК	1.11.2018	ТОВ "Енергомашпроект"	Не виконано
7.	Запуск КА	1.12.2018	ТОВ "Енергомашпроект"	Не виконано

Якщо інвестиція здійснюється одноразово: $ROI = \sum_T D_t / I$, де:

D_t – надходження у відповідному періоді,

I – разова інвестиція,

I_t – інвестиція у відповідному періоді.

$$D_t / I = 12 / 12 = 1$$

$ROI = 1$ – проект не принесе ні прибутків, ні збитків, при цьому $NPV = 0$.

Висновки

1. Критерій оцінки енергетичної ефективності технологічних плазмотронів посередньої дії може бути використаний як параметр оптимізації при розробці нових генераторів плазми і модернізації існуючих.
2. Згаданий критерій дозволяє проводити кількісну оцінку альтернативних варіантів плазмових пристроїв із вибором найбільш досконалих.
3. Запропонований критерій енергетичної ефективності має значний потенціал вдосконалення за рахунок введення нових компонентів, які враховують додаткові фактори, що можуть впливати на функціональні можливості плазмового генератора.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Бабаевский А. Н. ВЧИ-плазмотроны с пористыми разрядными камерами и их использование для напыления покрытий / А. Н. Бабаевский, И. И. Канторович, В. А. Кудин // Тепло- и массообмен в плазмохимических процессах. – Минск: Из-во ИТМО им. А. В. Лыкова АН БССР, 1982. – Ч. 2. – С. 18–24.
2. Houben I. M. Some remarks on Plasma spraying powder injection techniques/ 8th Int. Therm/ spreay Conf. – Miami-Biach, 1976. – P. 68–77.
3. Трехдуговая плазменная установка для напыления: Проспект. – Новосибирск: Институт теплофизики СО АН СССР, 1980. – 4 с.
4. Pat 959472 GB, IC C23C 7/00. Improvements in/or relative to plasma jet torches. Publ. 03.06.64.
5. Pat 3989512 USA, IC² C21C 5/52. Plasma heat treatment means and method / J. G. Sayce. – 02.11.76.
6. Коротеев А. С. Генераторы низкотемпературной плазмы / А. С. Коротеев, А. М. Костылев, В. В. Коба и др. – М.: Наука, 1969. – 128 с.
7. Клубникин В. С. Классификация дуговых плазмотронов для напыления / В. С. Клубникин, Э. Г. Пухов // Тез. докл. IV Всесоюз. совещ. "Теория и практика газотермического нанесения покрытий", 1976 г. – Москва: Б.и., 1976. – С. 116–124.
8. Курочкин Ю. В. Аппаратура плазменного напыления / Ю. В. Курочкин, Г. А. Строганов, А. М. Гонопольский, Р. А. Васильев. – М.: Научно-исследовательский институт машиностроения. – Сер. С.6-3. Технология металлообрабатывающего производства, 1984. – 56 с.
9. Донской А. В. Электрические, тепловые и газодинамические характеристики плазмотрона УМП-5-68 / А. В. Донской, В. С. Клубникин, В. Э. Рогинский // Мат. VII Всесоюз. конф. по генераторам низкот. плазмы, 1977 г. – Алма-Ата: Б. и., 1977. – Т. I. – С. 35–38.
10. Жуков М. Ф. Прикладная динамика термической плазмы / М. Ф. Жуков, А. С. Коротеев, Б. А. Урюков. – Новосибирск: Наука, 1975. – 298 с.

11. Донской А. В. Электроплазменные процессы и установки в машиностроении / А. В. Донской, В. С. Клубникин. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1979. – 221 с.
12. Новоселов А. В. Влияние положения анодного пятна дуги на технологические характеристики процесса напыления / А. В. Новоселов, А. Ф. Пузряков // Тез. докл. VII Всесоюз. совещ. "Теория и практика газотермического нанесения покрытий", 1978 г. – Дмитров: Б. и., 1978. – С. 47–51.
13. Донской А. В. Исследование плазмотронов для напыления с фиксированной и самоустанавливающейся длиной дуги / А. В. Донской, В. С. Клубникин, В. Э. Рогинский // Тез. докл. VII Всесоюз. совещ. "Теория и практика газотермического нанесения покрытий", 1978 г. – Дмитров: Б. и., 1978. – С. 34–38.
14. Горшков Б. Н. Энергетические характеристики плазмотрона М8-27 / Б. Н. Горшков, С. Х. Ильясова, В. С. Клубникин, Ю. П. Кудрявцев // Тез. докл. VI Всесоюз. совещ. "Теория и практика газотермического нанесения покрытий", 1978 г. – Дмитров: Б. и., 1978. – С. 43–46.
15. Пузряков А. Ф. Проблемы и перспективы создания высокостабильного оборудования для плазменного напыления / А. Ф. Пузряков // Тез. докл. VII Всесоюз. совещ. "Теория и практика газотермического нанесения покрытий", 1978 г. – Дмитров: Б. и., 1978. – С. 15–23.
16. Васильев Р. А. Обобщение характеристик аппаратуры для плазменного напыления / Р. А. Васильев, А. М. Гонопольский, Е. И. Скидан // Аппаратура и технология газотермических покрытий и резки: Труды ВНИИАвтогенмаш. – Москва: ВНИИАвтогенмаш, 1982. – С. 10–13.
17. Жуков М. Ф. Электродуговые нагреватели газа (плазмотроны) / М. Ф. Жуков, В. Я. Смоляков, Б. А. Урюков. – М.: Наука, 1973. – 232 с.
18. Клубникин В. С. Плазменные устройства для нанесения покрытий / В. С. Клубникин // Изв. Сибирского отделения АН СССР. Сер. техн. Наук, 1983. – Вып. 3. – № 13. – С. 82–92.

19. Белащенко В. Е., О перспективах развития электродуговых плазмотронов для напыления / В. Е. Белащенко, В. А. Вахалин, А. М. Гонопольский, Е. И. Скидан // Процессы и оборудования плазменной обработки материалов: Труды ВНИИавтогенмаш. – Москва: ВНИИавтогенмаш, 1980. – С. 72–81.
20. Лясников В. Н. Плазменное напыление покрытий в производстве изделий электронной техники / В. Н. Лясников, В. С. Украинский, Г. Ф. Богатырев. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1985. – 200 с.
21. Даутов Г. Ю. Напряженность электрического поля в стабилизированной вихрем дуге / Г. Ю. Даутов, М. И. Сазонов // ПМТФ. – 1967. – № 4. – С. 127–31.
22. Аньшаков А. С. Исследование плазмотрона с восходящими вольтамперными характеристиками дуги / А. С. Аньшаков, М. Ф. Жуков, М. И. Сазонов, А. Н. Тимошевский // Изв. Сибирского отделения АН СССР. Сер. техн. наук. – 1970. – Вып. 2. – № 8. – С. 3–11.
23. Karp I. N. Plasma spraying in the Gas-air mixtures/ I. N. Karp, E. P. Martsevoj, V.N. Paschenko // 11 th Int. therm. Sprey. Conf., Montreal, 1986. – P. 405–413.
24. Карп И. Н. Исследования плазменного напыления высокоэнтальпийной газовой смесью / И. Н. Карп, Н. Н. Гринченко, С. В. Петров и др. // Тез. докл. VII Всесоюз. совещ. "Теория и практика газотермического нанесения покрытий", 1978 г. – Дмитров: Б. и., 1978. – С. 226–228.
25. Карп И.Н. Некоторые особенности напыления покрытий плазмой продуктов сгорания природного газа / И. Н. Карп, Н. Н. Гринченко, С. В. Петров // Тез. докл. VIII Всесоюз. совещ. "Теория и практика газотермического нанесения покрытий", 1980 г. – Рига: Зинатне, 1980. – С. 152–157.
26. Борисов Ю. С. Газотермические покрытия из порошковых материалов. Справочник / Ю. С. Борисов, Ю. А. Харламов, С. Л. Сидоренко, Е. Н. Ардатовская. – Киев: Наук, думка, 1987. – 544 с.
27. Пустогаров А. В. Линейный плазмотрон с пористым охлаждением межэлектродной вставки / А. В. Пустогаров, Ю. В. Курочкин, Г. Н. Мельников, М. Н.

Супроненко // Мат. VI Всесоюз. конф. по генераторам низкот. плазмы. – Фрунзе: Илим, 1974. – С. 90–93.

28. Жуков М. Ф. Электродуговые генераторы с межэлектродными вставками/ М. Ф. Жуков, А. С. Аньшаков, И. М. Засыпкин и др. – Новосибирск: Наука, 1981.–224с.

29. Даутов Г. Ю. Плазмотроны со стабилизированными электрическими дугами / Г. Ю. Даутов, В. Л. Дзюба, И. Н. Карп. – Киев: Наук, думка, 1984. – 168 с.

30. Жуков М. Ф. Исследование теплообмена турбулентной дуги со стенкой при наличии газовой завесы / М. Ф. Жуков, И. М. Засыпкин, И. И. Мишне, М. И. Сазонов // Мат. VI Всесоюз. конф. по генераторам низкот. плазмы. – Фрунзе: Илим, 1974. – С. 74–77.

31. Аньшаков А. С. Напряженность электрического поля дуги и тепловые потоки в плазмотроне с межсекционным вдувом газа/ А. С. Аньшаков, С. В. Гинал., Я. Келбинский // Мат. VI Всесоюз. конф. по генераторам низкот. плазмы. – Фрунзе: Илим, 1974. – С. 86–89.

32. . Порошковая металлургия и напыленные покрытия. Учебник для вузов / Под ред. Б. С. Митина. – М.: Металлургия, 1987. – 792 с.

33. Кулагин И. Д. Шунтирование столба сжатого дугового разряда корпусом электропроводного сопла / И. Д. Кулагин, В. В. Кудинов // Электротермия. – 1964. – Вып. 32. – С. 23– 25.

34. Тихомирнов С. И. Особенности работы плазменного генератора с вихревой стабилизацией дуги при низких давлениях / С. И. Тихомирнов, Н. А. Кошелев, Ю. Г. Яременко. – М.: Препр. Ин-т радиоэлектроники и электроники АН СССР, 1972. – № 107. -- 25 с.

35. Кудинов В. В.. Установки сверхзвукового распыления материалов в разреженных средах / В. В. Кудинов, М. Х. Шоршоров, П. Ю. Пекшев, А. О. Наумкин // Перспективные методы получения покрытий и модифицирования поверхностей. – Киев: Наук, думка, 1984. – С. 28–29.

36. Кудинов В. В. Использование активных газовых добавок при плазменном напылении в разряженной атмосфере / В. В. Кудинов, М. Б. Колточников, А. О. Наумкин, П. Ю. Пекшев // Многофазные потоки в плазменной технологии. Проблемы моделирования. – Барнаул: Б. и., 1984. – Ч. I. – С. 91–93.

37. Кудинов В. В. Сверхзвуковое распыление дисперсных материалов в разряженную среду / В. В. Кудинов, П. Ю. Пекшев., А. А. Владиславлев // Исследование и разработка теоретических проблем в области порошковой металлургии и защитных покрытий. – Минск: Б. и., 1984. – Ч. I. – С. 68–77.

38. Пекшев П. Ю. Назначение и перспективы установок газотермического напыления либо распыления материалов в разряженной контролируемой атмосфере / П. Ю. Пекшев., Б. С. Митин, В. В. Кудинов и др. // Тез. докл. X Всесоюз. совещ. "Теория и практика газотермического нанесения покрытий", 1985 г. – Дмитров: Б. и., 1985. – Т. I. – С. 111–114.

39. Thalmann G. The development of high power plasma spraying equipment: the 200 kW liquid stabilized plasma gun / G. Thalmann, A Wahl, K. Widmar // 8 th Int. Therm/sprey Conf. – Miami-Biach, 1976. – P. 51–58.

40. Установка УН108.УХЛ.4 для плазменного напыления. Информ. письмо № 19 (1422). – Ин-та электросварки им. Е.О.Патона, 1984. – 3.

41. Бякин П. И.. Агрегат плазменного напыления на базе установки "Аквацентр" / П. И.. Бякин., А. И. Малошенко, Ужанов А. Я. и др. // Опыт и перспективы применения газотермических способов нанесения покрытий для упрочнения и восстановления деталей. – М.: ЦНИИЭИТЯЖМАШ, 10–83–15, 1983. – С. 12–14.

42. Жеенбаев Ж. Ж... Двухструнный плазмотрон / Ж. Ж.. Жеенбаев., В. С. Энгельшт. – Фрунзе: Илим, 1983. – 202 с.

43. Жеенбаев Ж. Ж.. Электрическая структура и взаимодействие струй плазмы двухструйного плазмотрона / Ж. Ж.. Жеенбаев., В. С. Энгельшт. // Тез. докл. VIII

Всесоюз. конф. по генераторам низкотемпературной плазмы. – Новосибирск, 1977. – Т. 1. – С. 138–41.

44. Гонопольский А. М.. Характеристики процесса и аппаратуры плазменного напыления покрытий из прутковых материалов / А. М. Гонопольский, Ю. Н. Кобелев, Е. И. Скидан // Тез. докл. X Всесоюз. совещ. "Теория и практика газотермического нанесения покрытий", 1985 г. – Дмитров: Б. и., 1985. – Т. I. – С. 159–161.

45. Губченко В. В. Плазменный распылитель с коаксиальной подачей порошка / В. В. Губченко, А. Ф. Пузряков, Ю. П. Плотников и др. // Тез. докл. IX Всесоюз. совещ. "Теория и практика газотермического нанесения покрытий", 1983 г. – Дмитров: Б. и., 1983. – С. 44–48.

46. Петров А. В. Использование ламинарного потока плазмы для нанесения покрытий / А. В. Петров, Ю. Т. Никитин, А. М. Малахов // Тез. докл. VIII Всесоюз. совещ. "Теория и практика газотермического нанесения покрытий", 1980 г. – Рига: Зинатне, 1980. – Т. 1. – С. 132–134.

47. Петров С. В. Плазменное газоздушное напыление [Текст] моногр. / С. В. Петров, И. Н. Карп. – К.: Наук. думка, 1993. – 494 с.

48. Пащенко В. М. Генерування потоків плазми та керування їх енергетично-просторовими параметрами: моногр./ В.М. Пащенко. – Київ: Гнозіс, 2014. – 283с.

49. Pashchenko V. Research into the energy conversion processes in hybrid plasma devices for applying the coatings / V. Pashchenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies – 2017. – # 2 (86). – P. 47-54.

50. Пащенко В. М. Обладнання для газотермічного нанесення покриття [Текст]: навч. посіб. / В. М. Пащенко. – К.: ІВЦ "Політехніка", 2001. – 416 с.

51. Пащенко В. М. Дугові генератори в технологіях інженерії поверхні [Текст]: моногр. / В. М. Пащенко. – Харків: Мачулін, 2018. – 288 с.

52. <http://opcb.kpi.ua/?p=1433&lang=RU>

53. <https://plasmainfo.ru/technology/416/>

54. <https://postupi.online/professiya/mentor-startapov/programmi-magistr/>