

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ І УКРАЇНИ  
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ  
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ  
КАФЕДРА МАШИНОБУДУВАННЯ

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

другого (магістерського) рівня вищої освіти

на тему «Обґрунтування параметрів та розроблення оснастки до  
портативної системи EX-TRASK для плазмового різання труб»

Виконав: студент VI курсу, групи Маш-62

Спеціальності 133 Галузеве машинобудування  
(шифр і назва)

Олег ХМІЛЕВСЬКИЙ  
(Ім'я та прізвище)

Керівник: к.т.н., доцент Олексій ШВЕЦЬ  
(Ім'я та прізвище)

Дубляни 2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ І УКРАЇНИ  
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ  
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ  
КАФЕДРА МАШИНОБУДУВАННЯ

Рівень вищої освіти – другий магістерський  
Спеціальність 133 - Галузеве машинобудування  
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри  
Машинобудування  
(назва кафедри)

\_\_\_\_\_

(підпис)

професор Віталій ВЛАСОВЕЦЬ  
(прізвище та ініціали)

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ року

## З А В Д А Н Н Я

на кваліфікаційну роботу студенту

\_\_\_\_\_

Хмільевському Олегу Андрійовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Обґрунтування параметрів та розроблення оснастки до портативної системи EX-TRACK для плазмового різання труб»

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
к.т.н., доцент Швець Олексій Петрович  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ЛНУП від 28 квітня 2023 року №133/к-с

2. Строк подання студентом роботи до 19. 01. 2024 року

3. Вихідні дані до работ: довідкова література за темою роботи, технічні характеристики установок для автоматичного плазмового різання металу, каталоги робочого обладнання плазморізів та їх витратних матеріалів, методики розрахунку приводів, робочої оснастки та рамних конструкцій, методики розрахунку режимів роботи плазморізів, інструкції з охорони праці, довідкові дані про сортамент сталевих труб. Методики визначення собівартості використання технологічного обладнання.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

4.1. Аналіз стану питання в теорії і практиці; 4.2. Технологічні особливості та вибір параметрів режиму плазмового різання; 4.3. Проектування оснастки для плазмового різання труб; 4.4. Охорона праці; 4.5. Техніко-економічне обґрунтування використання установок для повітряно-плазмового різання труб.

5. Перелік графічного матеріалу:

Графічні матеріали до роботи виконати у вигляді презентації в середовищі PowerPoint обсягом 10-12 листів.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата		Відмітка про виконання
		Завдання видав	завдання прийняв	
1, 2, 3, 5	Швець О.П. доц. каф. машинобудування			
4	Городецький І.М. доц. каф. УПБВ			

7. Дата видачі завдання 28. 04. 2023 року

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Відмітка про виконання
1	Аналіз стану питання в теорії і практиці	02.06.23	
2	Технологічні особливості та вибір параметрів режиму плазмового різання	25.08.23	
3	Проектування оснастки для плазмового різання труб	29.09.23	
4	Охорона праці	27.10.23	
5	Техніко-економічне обґрунтування використання установок для повітряно-плазмового різання труб	24.11.23	
6	Оформлення пояснювальної записки	29.12.23	
7	Оформлення графічної частини	19.01.24	

Студент \_\_\_\_\_ Олег ХМІЛЕВСЬКИЙ  
( підпис )

Керівник роботи \_\_\_\_\_ Олексій ШВЕЦЬ  
( підпис )

## УДК 621.791

Обґрунтування параметрів та розроблення оснастки до портативної системи EX-TRACK для плазмового різання труб. Хмілевський О.А. Кваліфікаційна робота. – Дубляни, Львівський національний університет природокористування, 2024 р.

67 с. текст. част., 26 рис.; 9 табл.; 34 джерела інформації.

Проведено аналіз існуючих технологій плазмового різання. Проаналізовано існуючі конструкції обладнання для плазмового різання труб.

Розглянуто основні конструктивні, експлуатаційні та технологічні параметри роботи установки для плазмового різання металу та їх вплив на продуктивність виконання операції. Отримано залежності необхідної напруги живлення плазмотрона та максимальної швидкості різання від товщини розрізуваного металу.

Розроблено конструкцію та спроектовано додаткове оснащення портативної системи EX-TRACK для плазмового різання труб. Розраховано параметри приводу обертально-кріпильного механізму та опорних роликів.

Розглянуто питання охорони праці під час виконання операцій плазмового різання труб.

Визначено собівартість технологічного процесу плазмового різання труб на портативній системі EX-TRACK.

## ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ В ТЕОРІЇ І ПРАКТИЦІ	7
1.1 Загальні відомості про процес плазмового різання	7
1.2 Аналіз конструкцій плазмотронів	10
1.3 Технологічні особливості процесу плазмового різання металів	15
1.4 Аналіз існуючого обладнання для різання труб	22
1.5 Аналіз конструкції портативної системи EX-TRACK для різання металу	26
Висновки за розділом	
2 ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ТА ВИБІР ПАРАМЕТРІВ РЕЖИМУ ПЛАЗМОВОГО РІЗАННЯ	30
2.1 Вибір параметрів режиму різання	30
2.2 Обґрунтування параметрів режиму повітряно-плазмового різання	35
Висновки за розділом	
3 ПРОЕКТУВАННЯ ОСНАСТКИ ДЛЯ ПЛАЗМОВОГО РІЗАННЯ ТРУБ	41
3.1 Опис конструкції установки для плазмового різання труб	41
3.2 Розрахунок одностоякового обертача з горизонтальним шпинделем	44
3.3 Розрахунок зубчастої пасової передачі	47
3.4 Розрахунок роликів опор	50
Висновки за розділом	52
4 ОХОРОНА ПРАЦІ	53
4.1 Аналіз чинників і факторів, які можуть призвести до виникнення небезпечних чи аварійних ситуацій під час роботи на установці для плазмового різання металу	53
4.2 Моделювання процесу формування і виникнення травмонебезпечної ситуації під час плазмового різання труб	54

4.3	Заходи щодо запобігання виробничого травматизму під час роботи на плазмових установках	55
	Висновки за розділом	59
5	ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ УСТАНОВОК ДЛЯ ПОВІТРЯНО-ПЛАЗМОВОГО РІЗАННЯ ТРУБ	60
5.1	Вихідні дані розрахунку	60
5.2	Розрахунок собівартості плазмового різання	60
	Висновки за розділом	62
	ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ	63
	БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК	64

## ВСТУП

Плазмове різання металів - напрямок, що успішно розвивається в галузі машинобудування. На сьогоднішній день це найбільш ефективний спосіб різання листового металу у порівнянні з газокисневим, лазерним та гідроабразивним різанням при товщинах металу від 3 до 50 мм. Застосування технологічних процесів плазмового різання обумовлює високі швидкості різання і високу якість поверхні різку кольорових металів, вуглецевих і легованих сталей. Так, за допомогою лазерного різання можливе різання листів товщиною до 8-10 мм. У порівнянні з лазерним різанням перевагою плазмового різання це можливість обробки значно ширшого по товщині діапазону товщин металу (до 200 мм) при хорошій якості різку. При малих і середніх товщинах металу газокисневе різання також значно поступається плазмовому.

Вагомою перевагою плазмового різання є можливість виготовлення деталей складної геометричної форми. В даному випадку продуктивність різання в кілька десятків разів перевищує продуктивність фрезерування. При цьому точність розмірів і форми вирізаних виробів може бути досить високою, що для деяких деталей виключає необхідність їх додаткової механічної обробки. Також є можливість різання деталей під кутом шляхом відповідної установки сопла, що здійснюється досить ефективно.

Плазмове різання відноситься до способів термічного різання металів і характеризується складними явищами перетворення електричної енергії джерела струму в теплову енергію плазмової дуги, інтенсивним стисненням її стовпа в формуючій камері плазмотрона і наскрізним проплавленням плазмовою дугою, що розрізає з видуванням розплавлений метал з порожнини різку. Після завершення різання метал охолоджується. Фактично відбувається локальна термообробка металів в зоні впливу. Відповідно змінюються структура і механічні властивості металу.

Дана робота присвячена опису досліджень, присвячених обґрунтуванню параметрів додаткового обладнання до автоматичної плазмової установки EX-TRACK, яке забезпечить можливість різання труб.

# 1 АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ В ТЕОРІЇ І ПРАКТИЦІ

## 1.1 Загальні відомості про процес плазмового різання

Низькотемпературна плазма являє собою нагрітий до  $10000...50000$  °С електропровідний газ, що складається з позитивно і негативно заряджених газових частинок, що містяться в рівних кількостях. Низькотемпературну плазму для різання отримують зазвичай в електричній дутті, створюваної в спеціальному інструменті - плазмотроні, пропускаючи через нього технічні гази [1, 7, 23].

Розроблено дві схеми плазмово-дугового розряду: плазмова дуга (рис. 1.1, а), яка збуджується між катодом плазмотроні оброблюваним металом (дуга прямої дії), і плазмовий струмінь (рис. 1.1, б), який збуджується між незалежними від оброблюваного матеріалу електродами (незалежна дуга).

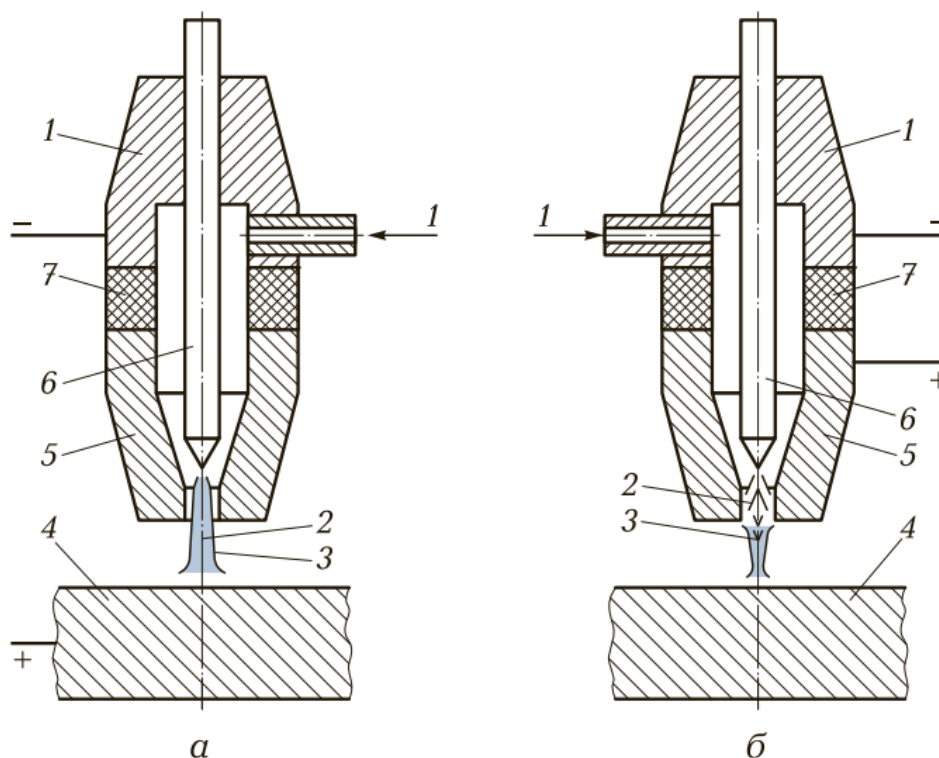


Рисунок 1.1 – Схеми утворення плазми

а – плазмова дуга; б – плазмовий струмінь; 1 – газ; 2 – дуга; 3 – струмінь плазми; 4 – заготовка; 5 – наконечник; 6 – катод; 7 – ізолятор



В обох схемах дуговий розряд порушується у вузьких каналах плазмотронів, які дозволяють при відносно невеликих витратах плазмоутворюючого середовища отримувати значні швидкості потоків плазми.

Сутність процесу плазово-дугового різання полягає в розплавленні високотемпературним потоком газів металу в обмеженому об'ємі з подальшим видаленням розплаву з порожнини різання струменем.

Товщина металу, що розрізається, залежить від потужності дуги і, насамперед, від напруги на дузі. На глибину прорізування являються характеристики джерела струму, розміри каналів ріжучих сопл, склад та витрата газів. Сила струму задається такою, щоб забезпечити виділення у стовпі дуги електричної потужності, при якій інтенсивність розплавлення металу відповідає заданій швидкості різання.

Порівняння енергетичних параметрів різання плазовим струменем та плазовою дугою показало, що ефективна потужність нагріву зростає зі збільшенням сили струму, витрати плазмоутворюючих газів (до певної межі), причому у плазовій дузі вона значно вища. Питомий тепловий потік у центрі полум'я нагрівання при різанні плазовою дугою і становить  $10^8 \dots 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>, що на порядок вище, ніж при різанні плазовим струменем. Тепловий ККД плазової дуги при оптимальних режимах різання становить 70...80%, що на 10...30% вище ККД нагрівання металу плазовим струменем, тому схема різання плазовим струменем застосовується лише при різанні неметалічних матеріалів і в ряді випадків при різанні тонкого металу.

Найбільшого поширення набула плазово-дугове різання. При плазово-дуговому способі різ утворюється трьома різними ділянками плазової дуги: стовпом, анодною плямою та факелом (рис. 1.2), які мають різну ефективність нагрівання металу, причому найменша - у факела. Наявність у стовпі дуги трьох різних ділянок з різною ефективною тепловою потужністю впливає на конусність різів при плазово-дуговому різанні значно більше, ніж при кисневому різанні [1, 5, 7].

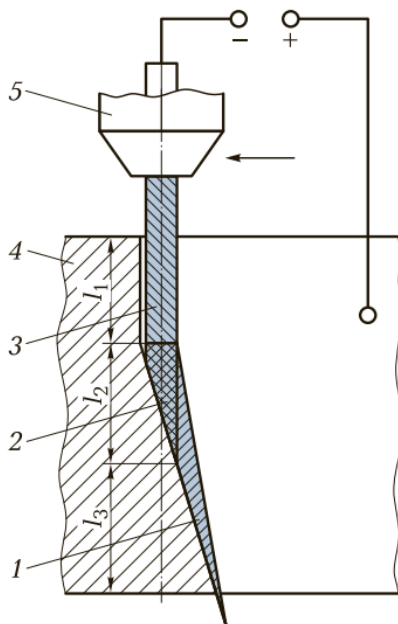


Рисунок 1.2 – Схема будови плазмово-дугового розряду прямої дії

1 – факел дуги; 2 – анодна пляма; 3 – стовп дугового розряду; 4 – розрізуваний метал; 5 – плазмотрон;  $I_1$  – зона теплопередачі стовпа;  $I_2$  – зона ковзання плям;  $I_3$  – зона теплопередачі факела

Як плазмоутворююче середовище при плазмово-дуговому різанні використовують різні технічні гази, які за своїм впливом на катод поділяються на неактивні (аргон, азот, водень) і активні (повітря, кисень). Плазмоутворюючі середовища повинні забезпечувати надійне запалювання дуги і хорошу стабілізацію дуги, ефективне перетворення електричної енергії в теплову і найбільш рівномірну передачу енергії по товщині розрізуваного металу, відсутність несприятливого впливу на електрод і поверхню металу.

Процес повітряно-дугового різання з використанням в якості плазмоутворюючого середовища стиснутого повітря широко застосовується при різанні конструкційних та високолегованих сталей. Для підвищення продуктивності різання застосовують також плазмоутворюючі середовища з більш високим вмістом кисню, ніж у повітрі, або чисто кисневу суміш. Однак у цьому випадку доводиться здійснювати захист електрода неактивним газом (аргоном, азотом). Загальною закономірністю є використання активних газових сумішей переважно для різання чорних металів, а неактивних газів та їх сумішей - для різання кольорових металів та їх сплавів.

## 1.2 Аналіз конструкцій плазмотронів

Конструкції різальних плазмотронів містять два основних блоки: електродний та сопловий. Вони електрично ізольовані один від одного і містять вузли для подачі плазмоутворюючих газів, основного та допоміжного струму, кріплення електрода, а також систему охолодження електрода та сопла (рис. 1.3). Електродний та сопловий вузли утворюють дугову камеру, в якій збуджується дуговий розряд при подачі плазмоутворюючих газів.

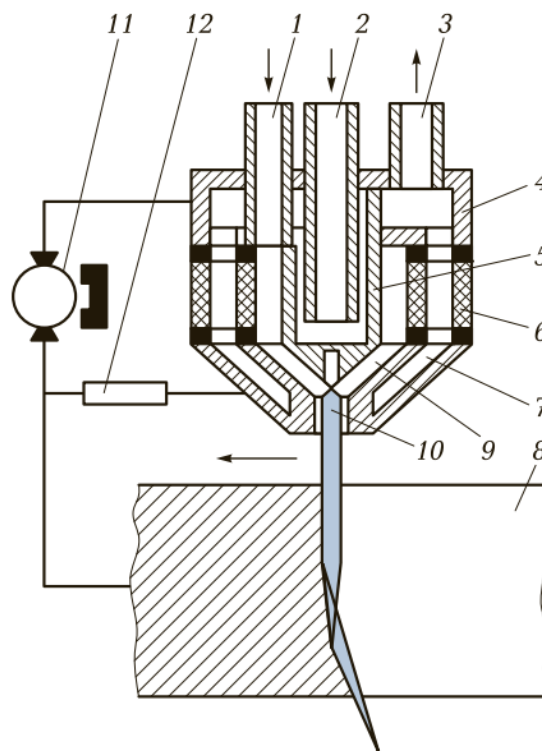


Рисунок 1.3 – Схема плазмотрона

1 – штуцер подачі плазмоутворюючого газу; 2 – штуцер подачі охолоджуючої води; 3 – штуцер зливання води; 4 – катодний блок; 5 – катодна вставка; 6 – ізолююча втулка; 7 – сопло; 8 – розрізуваний матеріал; 9 – дугова камера; 10 – плазмова дуга; 11 – джерело живлення; 12 – баластний опір

Залежно від способу плазмово-дугового різання в якості електродів застосовують вольфрамовий лантанований стрижень (при використанні аргону, азоту, водню) або мідний водоохолоджуваний електрод з цирконієвою або гафнієвою вставкою (при використанні в якості робочого газу окисних

середовищ; ). Цирконій і гафній при дії високої температури дугового розряду утворюють на поверхні тугоплавку оксидну плівку, надалі оберігає електрод від ерозії в процесі різання. Однак стійкість цих електродів через вплив дуже високих температур невисока і час роботи не перевищує 2...4 год [1, 7].

Залежно від способу подачі плазмоутворюючих газів у дугову камеру розрізняють осьовий та вихровий способи стабілізації дуги. У першому випадку плазмоутворююче середовище подається в дугову камеру потоком, паралельним осі електрода (рис. 1.4, а), в іншому - по тангенційних каналах, що забезпечує закручування потоку (рис. 4.4, б).

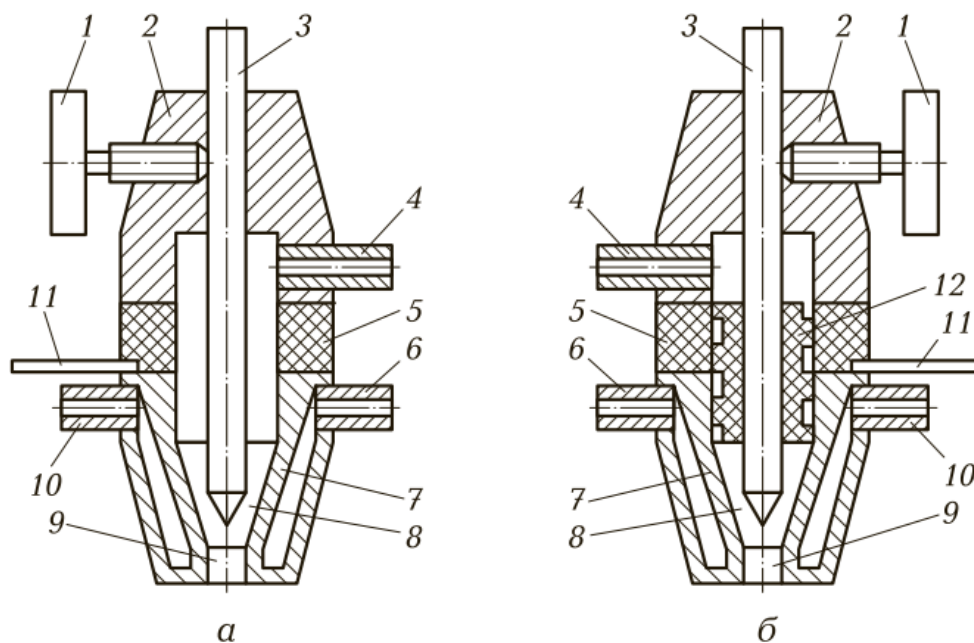


Рисунок 1.4 – Схеми ріжучих плазмотронів з осьовою (а) та завихреною стабілізацією дугового розряду

1 – кріплення катода; 2 – катодний вузол; 3 – катод; 4 – подача газу; 5 – ізолятор; 6, 10 – система охолодження; 7 – вузол сопла; 8 – дугова камера; 9 – формувальне сопло; 11 – кріплення плазмотрона; 12 – завихрювач

У плазмотронах з осьовою стабілізацією стрижневий катод заточують під кутом 20...30° при вершині, що дозволяє створити чітку фіксацію катодної плями на осі стовпа дуги співвісно з вихідним отвором сопла. Як регульовані катоди використовують лантановані вольфрамові стрижні діаметром 2...6 мм і

довжиною 100...150 мм. Стійкість стрижневого катода залежить головним чином щільності струму; найменша витрата катодів досягається при виборі їх діаметра відповідно до табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Орієнтовні діаметри вольфрамових електродів і формувальних сопел в залежності від сили струму

Сила струму, А	Діаметр електрода, мм	Діаметр формувального сопла, мм
150	2	1,2...1,6
300	2,5	2...3
400	3,2	3...4
500	4	4...6
600	4,5	5...7

Незважаючи на відносно високу електропровідність вольфрам сильно розігрівається робочим струмом, тому виліт електрода має бути мінімальним. Стрижневі катоди забезпечують тривалий термін служби при багаторазовому регулюванні вильоту електрода, тому вони набули широкого поширення в ручних плазмотронах.

У плазмотронах для механізованого різання використовують переважно гільзові мідні водоохолоджувані катоди з цирконієвою або гафнієвою вставкою. При осьовій стабілізації дуги вставка повинна бути загострена, при вихровій стабілізації можна застосовувати плоский катод. В останньому випадку фіксація катодної плями в центрі вставки забезпечується стабілізацією осі потоку внаслідок його закручування.

Гільзові катоди працюють при високих щільності струму і тому потребують інтенсивного охолодження. Для цього зовнішні поверхні гільзи омиваються проточною водою, а вставки щільно запресовуються в гільзу. Останнім часом установки для плазмово-дугового різання стали оснащувати блоками автономного охолодження, в яких охолодна вода циркулює в замкнутому обсязі, а її охолодження в процесі роботи здійснюється в радіаторах. Взимку замість води систему можна заповнювати незамерзаючими рідинами.

Основним елементом соплового вузла є формує наконечник. Форма та розміри соплового каналу у значно визначають параметри ріжучого струменя. Чим менший переріз вихідного отвору сопла і чим більша його довжина, тим більш вище за інших однакових умов щільність енергії, а отже, швидкість потоку плазми та продуктивність різання.

Однак найменший діаметр вихідного отвору обмежується виникненням подвійних дуг, так званих дугових розрядів, одночасно з основною дугою - між катодом і соплом, соплом і металом, що розрізається. Подвійна дуга виникає, якщо сума анодного падіння напруги на дузі катод - сопло і катодного падіння напруги на дузі сопло - метал, що розрізається, буде менше падіння напруги в стовпі дуги на ділянці формує сопла наконечника. Це може бути пов'язано з неправильною роботою джерела живлення або недоліком витрати плазмоутворюючого газу. Найчастіше подвійне дугоутворення (рис. 1.5) виникає у момент збудження ріжучої дуги [5, 11].

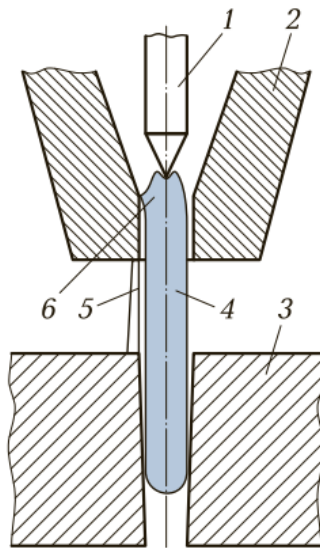


Рисунок 1.5 – Схема подвійної дуги  
1 – катод; 2 – сопло; 3 – метал;  
4 – стовп дуги; 5, 6 – стовп подвійної  
дуги на ділянках наконечник-метал і  
катод-наконечник

У сучасних установках різальну дугу збуджують за допомогою високочастотного допоміжного розряду (рис. 1.6). Спочатку збуджується допоміжна дуга невеликої потужності (при струмі 15...40 А) між електродом та наконечником; вона не призводить до руйнування наконечника чи катода. Потім при торканні потоку плазми, що витікає з сопла поверхні металу, що розрізається, плазмова дуга замикає робочий ланцюг джерела струму, внаслідок чого виникає ріжуча дуга. Якщо при збудженні різальної дуги плазмовий стовп допоміжної дуги був сформований недостатньо чітким, то анодна пляма

ріжучої дуги може перейти на наконечник, що призведе до розплавлення стінок сопла та виходу різака з ладу. Після включення різальної плазмової дуги напруга між електродом і наконечником знижується, і допоміжна дуга гасне.

Подвійне дугоутворення може статися в процесі різання у таких випадках:

- при пробиванні початкового отвору в листі через бризки розплавленого металу, що летять на різак;
- випадковому торканні наконечником поверхні металу;
- погана робота системи стабілізації положення різака над металом;
- стрибках струму в мережі або випадковому зменшенні витрати плазмоутворюючого газу.

Джерела струму, що використовуються в даний час, мають пристрої (струмові реле) для відключення апарата від мережі у разі подвійного дугоутворення та зростання сили струму в ланцюзі [1, 2].

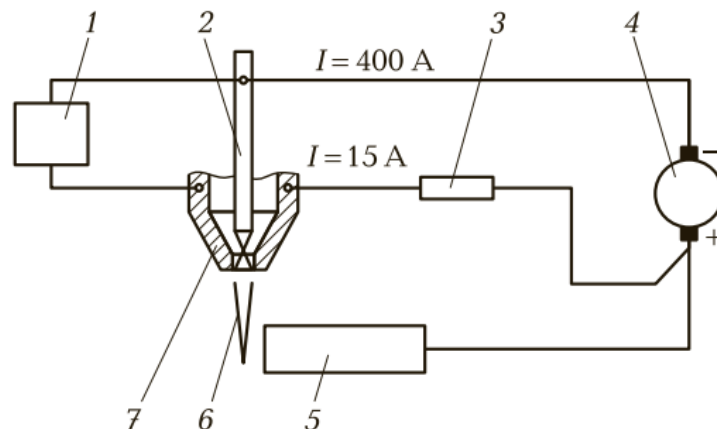


Рисунок 1.6 – Високочастотне збудження дуги допоміжним розрядом  
 1 – осцилятор; 2 – катод; 3 – баластний опір; 4 – джерело живлення; 5 – метал;  
 6 – факел дуги; 7 – наконечник

Наконечники плазмотронів зазвичай виготовляють з міді-металу, що володіє високою теплопровідністю, що необхідне для хорошого охолодження наконечника. Однак, незважаючи на інтенсивне охолодження водою мідних сопел, що формують, знос їх через високу температуру газів у стовпі дуги великий.

Для забезпечення стабільності горіння дуги та зменшення можливості подвійного дугоутворення діаметр сопла вихідного отвору повинен бути більшим (або дорівнює) діаметру катода; довжина сопла повинна бути меншою за його діаметр. Діаметр катода визначається струмом дуги. Зношування сопла істотно зменшується при вихровій стабілізації сопла, проте термін його служби не перевищує, як правило, 7...8 год. Внаслідок цього для підвищення ресурсу плазмотронів у наконечнику закріплюють спеціальні змінні соплові вставки.

### 1.3 Технологічні особливості процесу плазмового різання металів

Швидкість плазмово-дугового різання зростає зі збільшенням потужності дуги. Швидкість зростає більшою мірою при збільшенні напруги на дузі і в меншій мірі при зростанні робочого струму дуги, підвищення якого призводить до збільшення ширини різання. Величина напруги на дузі характеризує ступінь проникнення дуги в метал, що розрізається, тому зі збільшенням товщини металу, що розрізається, необхідно підвищувати напругу на дузі. Найбільш вигідно різати метал «жорсткими» дугами (з високою напругою ріжучої дуги), що забезпечує великі швидкості різання та якість поверхні різі.

Більш легкі метали з меншою теплоємністю металу та меншою теплопровідністю розрізаються з більшими швидкостями. При прямолінійному розділювальному плазмово-дуговому різанні швидкість різання може бути вищою на 20...30 %, ніж при вирізанні фігурні деталі з листової сталі.

При оптимальних режимах плазмово-дугового різання якість поверхні різі не поступається якості поверхні при кисневого різання металів, за винятком неперпендикулярності [2].

Відповідно до ГОСТ 14792-80 якість плазмово-дугового різання оцінюють такими основними показниками: розмірний допуск, неперпендикулярність різі, шорсткість поверхні, глибина ЗТВ. Для кожного показника в залежності від товщини металу, що розрізається, встановлюються три нормованих показниках якості та точності, що визначають призначення та умови використання різів. Клас 1 висуває найвищі вимоги до якості поверхні



плазмово-дугового різання; клас 2 відповідає вимогам, що реально досягаються у виробничих умовах; клас 3 пред'являє мінімальні вимоги до граничних значень показників забезпечення високої якості різання і продуктивного різання необхідно ретельне проведення підготовчих операцій, які починаються з транспортування металу до місця різання. При транспортуванні повинні бути вжиті заходи, що унеможливають деформацію листового металу та пошкодження його поверхні. Це особливо стосується тонкого м'якого листового металу, наприклад алюмінію та деяких його сплавів, міді та ін. Такий метал доцільно транспортувати на спеціальних візках; при транспортуванні краном слід застосовувати пневматичні присоси, що рівномірно розміщуються по поверхні металу.

Перед різкою для зменшення димоутворення та підвищення якості різку поверхню листового металу очищають від бумату та консервуючого мастила; при ремонтних чи демонтажних роботах поверхню металу перед різкою можна очищати.

У місці початку різку необхідно видалити фарбу, а також іржу з метою забезпечення електричного контакту факела дуги з цією ділянкою.

Метал, що обробляється, повинен надійно контактувати з позитивним (заземлюючим) проводом. Якщо не можна гарантувати надійний контакт, доцільно підводити позитивний провід до контактної струбцини, що зміцнюється на виробі, що розрізається, ручного або напівавтоматичного різання деталі розмічають прокресленням і керненням контуру з кроком між точками 10...20 мм. Крейдяна розмітка не забезпечує точного відтворення контуру та з поверхні деяких металів легко стирається (зливається). При розмітці деталей враховують припуски на різання в залежності від призначення деталей, що вирізуються.

У більшості випадків при машинному розділювальному різанні підготовчу операцію розмітки замінюють копіювання або програмним контурним керуванням.

При збудженні ріжучої дуги важливо встановити плазмотрон над початковою кромкою металу, що розрізається, або підвести його до кромки з

палаючим факелом допоміжної дуги таким чином, щоб, з одного боку, забезпечити збудження ріжучої дуги нижчого розряду без утворення подвійної дуги, а з іншого боку, виключити можливість неповного прорізування початкової кромки.

Для цього плазмотрон встановлюють над початковою кромкою таким чином, щоб вісь формуючого сопла була від неї на відстані 3...5 мм. При значному збільшенні цієї відстані факел допоміжної дуги може не забезпечити електронного контакту з металом, що розрізається. Якщо при цьому і відбудеться контакт, то стовп ріжучої дуги може відхилитися в бік кромки настільки, що виникне подвійна дуга. При затримці різача якийсь час біля кромки дуга встигне її проплавити; при цьому утворюється напівциліндрична канавка великої ширини, тому після збудження різальної дуги не слід затримувати різак у початковій кромці більш ніж на 2...5 с (залежно від товщини металу). При врізанні плазмотроном, що рухається, необхідно стежити за тим, щоб різальний плазмотрон почав рухатися тільки тоді, коли ріжуча дуга проплавить метал по всій кромці. Недотримання цієї вимоги може призвести до початкового непрорізу та труднощів із відділенням вирізаної деталі від обрізу, а також викликати утворення подвійної дуги.

При вирізанні внутрішнього контуру фланця необхідно пробити початковий отвір. При різанні листового металу середньої або малої товщини початковий отвір можна отримати проживання плазмотроном; для цього запалюють допоміжну дугу плазмотрон повинен бути піднятий над точкою пробивання отвору на відстань, що виключає збудження ріжучої дуги (зазор між торцем плазмотрону і металом, що розрізається, становить близько 50 мм). Потім плазмотрон поступово опускають до виникнення ріжучої дуги, знову піднімають на 4...6 мм і переміщують у напрямку контуру різки (або контуру) або включають робочий хід ріжучої машини. При цьому потік металу, що виплавляється, викидається в бік, протилежну напрямку різання. Після пробивання металу плазмотрон опускають на 3...10 мм поверхню виробу. Таким чином вдається пробивати отвори в металі товщиною до 40...50 мм, при цьому не виключена можливість пошкодження наконечника металом, що

викидається. Отвори в листовому металі можна пробивати за описаним методом, але із застосуванням ручного різачка з одним із старих сопел, що не використовуються для різання по контуру при великій товщині листового металу, у випадках коли неможливо пробивати отвори за допомогою плазмотрона, початковий отвір засвердлюють. Щоб початковий отвір не збільшував ширини різку, діаметр його повинен бути менше ширини різку, що намічається. При збудженні дуги плазмотрон трохи зміщують від осі отвору.

У процесі різання необхідно підтримувати постійну відстань між торцем наконечника плазмотрону та поверхнею металу, що розрізається. Ця відстань має бути мінімальною, тому що з її збільшенням зростає неперпендикулярність кромки різку в його верхній частині. Однак при дуже малій відстані сопло може вийти з ладу від випадкових замикань з великими бризками металу, шлаком, що приварився, і т.п. Зазвичай зазначена відстань має становити 3...10 мм. При машинному різанні рекомендується використовувати системи вертикального стеження (плавання) різального плазмотрона.

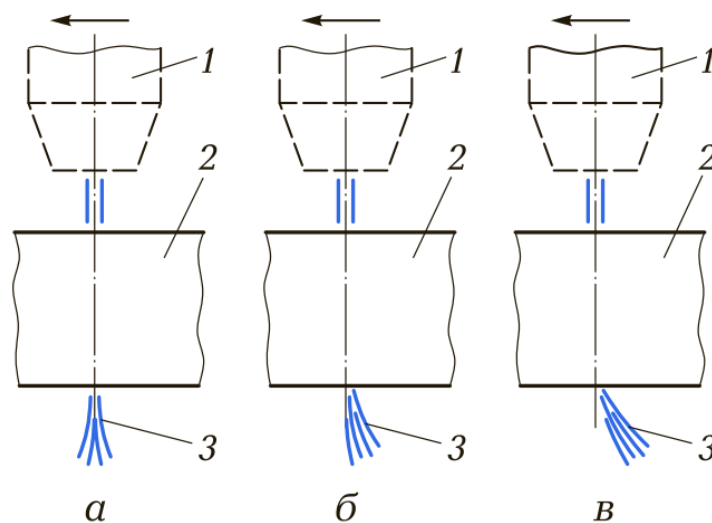


Рисунок 1.7 – Контроль якості різання за факелом дуги

а – мала швидкість; б – оптимальна швидкість; в – висока швидкість;

1 – плазмотрон; 2 – метал; 3 – факел дуги (стрілка вказує напрямок різання)

У процесі різання про правильність призначеного режиму можна судити по потоку іскор, що викидаються з порожнини різку (рис.1.7). Якщо потік іскор, що викидається, перпендикулярний поверхні листового металу, то поверхні

кромки, що утворюються близькі до паралельних (рис. 1.7, а); якщо цей потік відхиляється у бік, протилежний руху різачка, то неперпендикулярність різку, що утворюється, не перевищує вимог для класу 3 (рис. 1.7, б). Значне відхилення потоку іскор від перпендикуляра до поверхні різку та стікання виплавленого металу у вигляді великих крапель вказують на те, що швидкість різання близька до максимально можливої і може виникнути неповне прорізання (рис. 1.7, в). В цьому випадку бризки металу викидаються вгору або у бік різку.

При вирізці контуру, в якому прямолінійні ділянки сполучаються під кутом, у місці сполучення швидкість різання повинна бути зменшена до такої величини, при якій утворюється різ з паралельними кромками. Це ж стосується різання деталей з криволінійними контурами середньої та великої кривизни.

При недотриманні цієї вимоги розміри вирізаної деталі (по нижній та верхній площинах) будуть значно відрізнятися від розмірів, заданих внаслідок більшого відставання. Зазвичай при криволінійному різанні швидкість зменшують на 25...30%. При прямолінійному різанні швидкість також зменшують при завершенні різку, тому що в іншому випадку можливе неповне прорізання по товщині металу [11].

При призначенні режимів необхідно враховувати особливості різання різних металів: алюмінію та його сплавів, них і низьковуглецевих сталей, міді та її сплавів, титану, нікелю та двошарових сталей.

Алюміній та його сплави схильні до утворення тугоплавких оксидів. Необхідно забезпечити видалення окисленого металу із порожнини різку, його захист від окислення, а також вибрати умови, що сприяють утворенню оплавленої плівки мінімальної товщини. Алюміній у розплавленому стані активно поглинає водень, тому дуже важливо, щоб литий ділянку на кромці різку алюмінію був мінімальних розмірів.

Алюмінієві сплави товщиною 5...20 мм можна різати в азоті або повітрі. Якість різання погіршується при обробці алюмінієвих сплавів завтовшки 60 мм і більше. Алюміній товщиною 30...160 мм доцільніше різати в азотно-водневих сумішах.

Для отримання поверхонь різів із мінімальною шорсткістю алюміній різуть в аргоноводневих сумішах. Якість поверхні різів залежить від вмісту водню в суміші. При малому вмісті водню поверхня виходить шорсткою і в нижній кромці накопичується стікаючий метал. Висока якість поверхні забезпечується при використанні аргонової суміші, що містить 35...50% водню. Якість поверхонь по всій товщині різання практично рівноцінна. Напливи на нижніх краях різів зменшуються. При вмісті у суміші понад 60% водню на поверхнях різів з'являються глибокі штрихи. У верхній кромці різів спостерігається оксидна плівка, що затікає з поверхні листового металу; у нижній кромці знову з'являються напливи металу.

В оплавленому шарі алюмінієво-магнієвих сплавів спостерігається рівномірне за товщиною різання вигорання магнію. Зовнішня ознака вигорання – інтенсивне виділення білого диму. При різанні цих сплавів необхідне точне дотримання режимів різання. Різи високої якості можуть бути отримані при максимально можливій швидкості різання та вмісті аргонової суміші 50% водню. Для різання алюмінієво-марганцевих сплавів і сплавів типу дуралюмінію використовують суміші з меншим вмістом водню, а також азот та його суміші та повітря.

Плазмово-дугове різання раціонально використовувати для легованих сталей завтовшки менше 100 мм. Робочим газом для плазмово-дугового різання корозійно-стійкої сталі товщиною до 50...60 мм є кисневмісні гази – стиснуте повітря чи суміш азоту з киснем. Найменша шорсткість поверхні різів корозійно-стійкої сталі завтовшки 16...40 мм досягається при різанні в азотоводневих сумішах. При різанні сталі невеликої товщини витрачається велика кількість азоту, що попереджає утворення напливів на нижній кромці; сталь товщиною понад 50...60 мм різуть в азотних сумішах, що містять кисень або водень.

Робочим газом при швидкісному безгратовому плазмово-дуговому різанні корозійно-стійких сталей є суміш кисню, містить 20...25% азоту. Різи хромонікелевих сталей, виконані одним із зазначених способів, можна після зачистки металевою щіткою зварювати без додаткової механічної обробки.

Якщо кромки різу працюватимуть в особливо агресивних середовищах або при підвищених температурах, що інтенсифікують корозію, а також якщо в цих умовах передбачається використання зварних сполук, виконаних за кромками, підготовленими плазмово-дуговою різкою, краще застосування аргоноводневих сумішей.

Як робочі гази при плазмово-дуговому різанні низьковуглецевих сталей товщиною до 50 мм застосовують стиснене повітря, кисень або кисневмісні суміші. Сталі можна також різати в азоті або азотно-водневих сумішах. При використанні водневмісних плазмоутворювальних сумішей плазмово-дугове різання низьковуглецевих сталей практично не відрізняється від різання корозійностійких сталей, проте при цьому швидкості різання зменшуються приблизно на 20%. При різанні сталей товщиною менше 20 мм в азоті та азотно-водневих сумішах якість поверхонь різів низька [15].

При різанні мідних листів і смуг потужність дуги має бути вищою, ніж при різанні сталей. Як плазмоутворюючий газів цьому випадку застосовують стиснене повітря і азотні суміші з високим вмістом водню. Якість поверхонь різу при різанні в цих середовищах однакова. Помічено, що за повітряно-плазмовому різанні міді на поверхні різу утворюється легко видаляється крихкий склоподібний грат. Для різання міді невеликих і середніх товщин краще повітряно-плазмове різання при силі струму 350...400 А. Кромки різу мідних листів зачищають на глибину 0,8...1,5 мм.

При різанні латуні використовують самі робочі гази, як і при різанні міді; швидкість різання може бути збільшена в порівнянні зі швидкістю різання міді на 25...30%. При різанні на оптимальних режимах кромки різу мають рівні та гладкі поверхні, не потребують здебільшого механічної обробки. В особливо відповідальних випадках, а також після повітряно-плазмового різання кромки зачищають на глибину до 0,5...1,0 мм.

Після плазмово-дугового різання титану, що рекомендується тільки як заготівельна, необхідна механічна обробка. Найбільша продуктивність досягається при застосуванні азотно-повітряної суміші та чистого азоту. Кромки різу виходять рівними, чистими, без грата та напливів. У металі, що

прилягає до кромки, на глибині 0,1...0,2 мм спостерігається підвищений вміст газів у порівнянні з вмістом в основному металі: в 1,5 рази кисню; в 7-10 разів азоту; в 4 - 8 разів водню. Оплавлений шар потрібно знімати на глибину 0,3...0,8 мм.

#### 1.4 Аналіз існуючого обладнання для різання труб

Плазмова технологія широко використовується на металургійних підприємствах для різання металу. Її принцип полягає в утворенні плазми за рахунок виникнення електричної дуги в газовому середовищі. Плазмове різання труб застосовують для [24, 31]:

- Фігурного розкрою труб;
- Вибірка сідловин тобто вузлів сполучень;
- Вирізання нестандартних отворів;
- Поздовжня різка.

Переваги плазмового різання труб :

- Дозволяє працювати з широким спектром матеріалів;
- Швидкість виконання технологічної операції;
- Мінімальна деформація виробу через низьку температуру нагріву;
- Безпека використовуваного обладнання;
- Висока якість різки з високою чистотою поверхні;
- Можливість виконувати складного розрізу різних геометричних форм;
- Швидка окупність технології;
- Низька вартість виконання робіт.

Основні недоліки технології:

- Імовірність оплавлення країв при роботі з кольоровими металами;
- Незначне прожарювання країв;
- Формування альфа-шару при роботі з титаном.

Але, незважаючи на наявні недоліки, процес машинного різання є одним з найбільш високопродуктивних способів заготівельного виробництва.



Рисунок 1.8 - Приклади установок для машинного різання труб

В будь-яке сучасне обладнання має числове програмне пристрій і встановлене програмне забезпечення. Завдяки цьому з'явилася можливість розрізати товсті труби по будь-якій траєкторії, що значно підвищує продуктивність праці.

Розглянемо деякі варіанти установок для автоматичного різання труб.



Рисунок 1.9 - Машина для профільної різання труб Promotech PPCM з ЧПК



Машина для профільної різання труб Promotech PPCM з числовим програмним управлінням [4] призначена для кисневої або плазмового різання. Різання здійснюється з високою швидкістю і ідеальною якістю завдяки першокласній двигуну, сучасної конструкції, високоточним лінійних напрямних і CNC контролеру (керуюча програма). Головна перевага цієї моделі - виняткова простота в управлінні, що дозволяє оператору максимально ефективно управляти машиною після короткого навчання.

Новітня система управління дозволяє швидко запрограмувати потрібну форму, а вбудована бібліотека шаблонів передбачає параметричне визначення типових елементів. Зрозумілий інтерфейс допомагає оператору вводити лише найнеобхіднішу інформацію. Також машина приймає програми у форматі G-CODE, перенесені оператором із зовнішнього комп'ютера через USB порт.

Верстат РСМ-РЗ.1-27 призначений для повітряно-плазмового або киснево-плазмового різання складних деталей з круглих труб [18].



Рисунок 1.10 - Верстат РСМ-РЗ.1-27 для повітряно-плазмового різання труб

Верстат використовується для плазмового різання чорних, легованих і кольорових металів. Верстати плазмової різки широко використовується в багатьох сферах, таких як машинобудівна, сільськогосподарська, інженерно-технічна та інші. Програмне забезпечення Mach3 – мабуть найпопулярніша програма для керування верстатами з ЧПУ через свою багатofункціональність

та простоту в користуванні. Конструкція робочого столу дає можливість обробляти заготовки масою до 300 кг.

Портативні переносні труборізи типу CG2-11G, CG2-11D, CG2-11S, CG2-11B, CG2-11 призначені для точного різання труб і зняття фаски під зварювання як в польових умовах при будівництві трубопроводів, так і в цеху. Дане обладнання є аналогом машин для газового різання труб «Орбіта - БМ» («Орбіта - РЗ», МРТ) [24].



Рисунок 1.11 - Портативні переносні труборізи типу CG2-11B,

При роботі машини переміщається по спеціальній широкій розбірній ланцюга, яка одягається на трубу. У стандартну поставку включається ланцюг довжиною 2,4 м, якої достатньо для різання труб до 600 мм. (За аналогічною схемою працює труборіз Сателіт). Напрямні бандажі для моделей CG2-11G, CG2-11D, CG2-11B, CG2-11B не передбачені.

Відмінною особливістю моделі CG2-11S є широка здвоєна ланцюг, широка розстановка коліс, збільшена колісна база з можливістю перестановки коліс в залежності від діаметра труби. Ці особливості дозволяють значно підвищити точність різки при роботі з трубами великого діаметру.

Модель CG2-11 утримується на трубі за допомогою магнітних коліс. Для забезпечення точності її переміщення використовується сталевий бандаж, який закріплюється на трубі, і комплект рейок і напрямних роликів, закріплених на машині. (Бандаж не входить в стандартну поставку).

Машини випускаються з ручним або електричним (220V / 50 Hz) приводом. Для забезпечення точної установки на трубі машини з ланцюгом оснащуються муфтою зчеплення.

У моделі CG2-11В для різання труб застосовується плазмовий різак.

Регулювання положення пальника: вертикальна і горизонтальна за допомогою спеціальних рейок.

Для підвищення точності різку при використанні машин термічного різання моделей CG2-11В, CG2-11D і CG2-11G пропонуємо напрямні бандажі для труб діаметром до 1420 мм. Існують бандажі двох конструкцій

### 1.5 Аналіз конструкції портативної системи EX-TRACK для різання металу

Портативна система для різання металу EX-TRACK з числовим програмним керуванням (ЧПК) є модернізованим, високоточним обладнанням із цифровим керуванням, призначеним для роботи на виробничих підприємствах та робочих майданчиках. За своєю функціональністю є універсальною, і може використовуватися з газовим або плазмовим різакком. Це дозволяє виготовляти прості та складні деталі.



Рисунок 1.12 – Портативна система для різання металу EX-TRACK

Дана система може застосовуватись в різних сферах виробництва: в автомобільній промисловості, суднобудуванні, будівельній техніці, в обладнанні для легкої промисловості та багатьох інших галузях [26].

Вона має характеристики, однакові з порталним великогабаритним обладнанням з програмним керуванням і забезпечує можливість різання деталей будь-якої складності. Вона може застосовуватися як для кисневого, так і для газового різання, а також для плазмового різання металу. Функція ЧПУ дозволяє вирізати деталі різної складності з максимальною точністю, а функція ручного різання в більшій мірі призначена для більш простих операцій.

Таблиця 1.2 - Технічні характеристики системи EX-TRACK

Зона різання (мм)	1500×3000
Напруга мережі живлення	АС110Вт/230Вт - 50Гц
Різак	1
Швидкість різання (мм/хв)	50-3000
Максимальна швидкість (мм/хв)	3000
Вертикальне переміщення (мм)	100 (4 дюйми)
Діапазон газокисневого різання (мм)	до 100 (4 дюйми)
Діапазон плазмового різання (мм)	До 35 (1 <sup>3</sup> / <sub>8</sub> дюйми)
Габарити (довжина x висота x шир) (мм)	3500 × 370 × 2200
Вага (кг)	134

Загальна компоновка системи EX-TRACK показана на рис. 1.13.

Моторизований підймальний механізм входить до стандартної комплектації та може оснащуватись з газовим або плазмовим різакком. Система контролю висоти плазмової дуги (AVC) автоматично підтримує постійну висоту плазмового різачка в процесі різання. Функція Tip-touch IHS визначає розташування поверхні листа і встановлює правильну висоту пропалювання під час автоматизованого процесу плазмового різання. Ця функція дозволяє виявити поломки різачка, зчитуючи лист під час різання та активуючи автоматичне вимкнення для захисту плазмової системи.

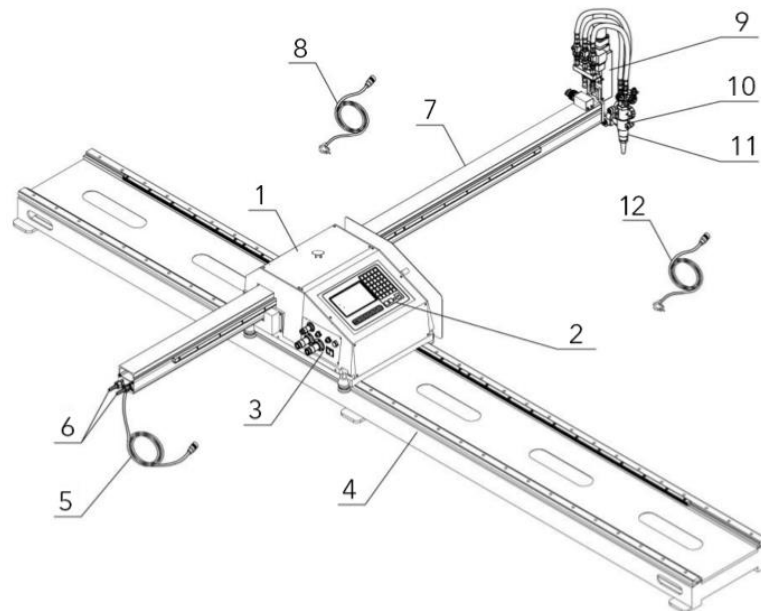


Рисунок 1.13 – Комплектація системи EX-TRACK

1 – системний блок; 2 – панель керування з ЧПК; 3 – щиток під'єднання;  
 4 – поздовжня рейкова направляюча; 5 – кабель підйимального механізму;  
 6\* – ніпелі підведення газу; 7 – горизонтальна рейкова направляюча; 8 – кабель живлення;  
 9 – механізм підйому/опускання різачка; 10 – тримач різачка;  
 11 – різачка; 12 – з'єднувальний кабель з ЧПК

\* Ніпелі підведення газу 6 мають позначення: OX – подача кисню; FG – подача газу.

Електромагнітний клапан Cutting Oxygen забезпечує автоматичне різання при використанні газового різачка.

Систему EX-TRACK можна легко обладнати додатковим пакетом плазмового різання THERMACUT EX-TRAFIRE. Використовуючи джерела для плазмового різання серії EX-TRAFIRE, система EX-TRACK може швидко різати низьковуглецеву сталь та алюміній завтовшки до 35 мм або нержавіючу сталь завтовшки до 25 мм (прошивка). Дана система придатна до розрізання листів металу розміром до 3050×1525 мм (10×5FT) зі швидкістю позиціонування до 3000 мм/хв [33].

На лівій стороні основного блока розташована панель з роземами для підключення системи до мережі живлення, раземів з'єднання систем ЧПК з джерелом живлення плазми, а також вмикач живлення та кнопка керування редуктором переміщення основного блоку (рис. 1.14).



Рисунок 1.14 – Роз'єми на лівій стороні основного блока системи EX-TRACK

В положенні OFF LINE (ВИКЛ.) живлення редукторів відключене, тому систему можна встановити вручну по будь якій осі. В положенні ON (ВКЛ.) приводи вмикаються для роботи в звичайному режимі.

Система EX-TRACK проста та зручна у використанні, оснащена 5,7” дюймовим рідкокристалічним екраном з високою роздільною здатністю. Вона легко програмується. Потрібну програму можна вручну задати за допомогою програмного забезпечення, яке йде в комплекті з системою. Необхідні програми можна завантажити автономно через порт USB. Деталізоване креслення деталей, виконане у графічних редакторах (наприклад SOLIDWORKS) зберігається у форматі DXF.

Система розпізнає базове програмування M- та G-коду. Бібліотека з 50 стандартних форм зводить до мінімуму час програмування та налаштування системи. Розміри деталей можна легко редагувати, а форми користувача створювати без програмування.

#### Висновки за розділом

Проведений аналіз технологій та засобів плазмового різання свідчить про можливість їх застосування для різання сталевих труб. Існуюча система EX-TRACK не має оснастки для виконання даної операції. Тому для ефективнішого її використання доцільним є розробка такого обладнання.

## 2 ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ТА ВИБІР ПАРАМЕТРІВ РЕЖИМУ ПЛАЗМОВОГО РІЗАННЯ

### 2.1 Вибір параметрів режиму різання

Технологічний процес плазмового різання включає такі операції:

- врізання (з кромки деталі або з пробиванням вихідного отвору);
- різання прямолінійних і криволінійних ділянок заданого контуру;
- завершення різку.

Основною операцією є прямолінійне різання заготовок з вертикальними кромками.

Серед основних режимів та умов різання вказують робоче плазмоутворююче середовище, робочий струм, діаметр і довжину сопла, витрату робочого середовища (газу), відстань від робочого торця плазмотрона до поверхні металу, а також робочу напругу дуги та швидкість різання.

Струм  $I$ , напруга  $U$ , теплової к. к. д. дуги  $\eta$ , питома вага  $\gamma$ , товщина  $\delta$ , ентальпія плавлення металу  $S$  та ширина різку  $b$  визначають швидкість різання:

$$W = 0,24 \cdot I \cdot U \cdot \eta / \gamma \cdot b \cdot \delta \cdot S. \quad (2.1)$$

Так, при різанні сталі товщиною  $\delta=1$  см з питомою вагою  $\gamma = 7,8$  г/см<sup>3</sup>, ентальпією  $S= 13,06$  кДж/г на струмі  $I=300$  А при напрузі  $U = 180$  В з к. к. д. дуги  $\eta = 0,3$  і ширині різку  $b=0,4$  см швидкість різання становитиме  $W= 4$  см/с, або 2,4 м/хв [10].

Під час різання в окисних середовищах реакція окиснення підвищує швидкість різання. При заданому режимі зміна швидкості різання може впливати на форму та якість різку (рис. 2.1).

Максимально можлива швидкість різання на прямолінійних ділянках обмежується рівнем, вище якого не буде відбуватися наскрізне прорізання металу (рис. 2.1 а). Зі швидкістю нижче цього рівня метал буде прорізатися повністю (рис. 2.1 б), але якість різання буде характеризуватися значною неперпендикулярністю кромки, шорсткістю їх поверхонь, великою глибиною литої ділянки зони термічного впливу тощо.

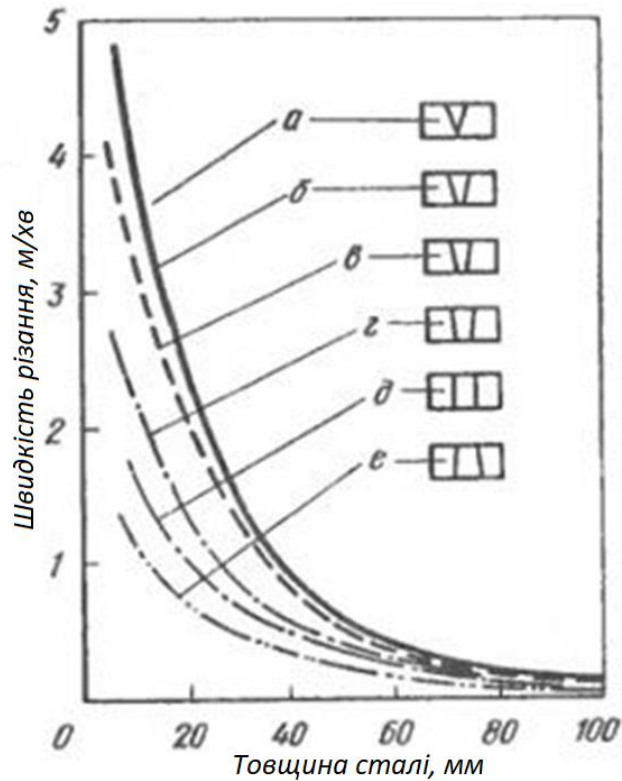


Рисунок 2.1 – Криві залежності впливу швидкості повітряно-плазмового різання маловуглецевої сталі на форму перетину різаних країв

$$(I = 300 \text{ А, } q = 90 \dots 120 \text{ л/хв; } d = 3 \text{ мм})$$

а – зона непрорізання; б – гранична швидкість наскрізного прорізання (нестійкий різ, кромки сходяться); в – висока швидкість різання (непаралельні кромки); г – обмежена швидкість різання (кромки різаних країв близькі до паралельних); швидкість різання між ділянками г і д забезпечує майже паралельні кромки; е – швидкість, за якої різ має неоднакову форму, а його краї розходяться (нижче даної зони процес різання нестійкий)

З обмеженням швидкості різання (рис. 2.1, в, г) якість різаних заготовок підвищується, хоча витрати енергії та матеріалів зростають, а продуктивність різання знижується. При швидкостях різання нижчих від максимальних в 1,5...2,5 рази (рис. 2.1, д) кромки різаних країв стають паралельними і перпендикулярними до поверхні листа, шорсткість стає мінімальною. Заготовки, вирізані на таких швидкостях, часто можуть бути використані без додаткової механічної обробки.



При подальшому зниженні швидкості різання (рис. 2.1, е) процес різання стає нестабільним, а якість розрізання заготовок різко знижується.

Плазмовий потік формується під впливом різних плазмоутворюючих середовищ (плазмоутворюючих газів). Робочі плазмоутворюючі середовища повинні забезпечувати:

- ефективного формування ріжучої дуги;
- отримання високоякісних кромek різy;
- ефективну передачу на розрізуваний метал теплової енергії, сконцентрованої в стовпі дуги;
- тривалу роботу формуючих елементів плазмотрона;
- отримання додаткової енергії для різання за рахунок екзотермічних реакцій;
- економічність та безпеку роботи.

Як робоче середовище найбільш широко використовуються технічні гази: азот, аргон, водень, кисень, стиснуте повітря та інші.

Робоче середовище вибирають з урахуванням його властивостей (табл. 2.1) та властивостей оброблюваного матеріалу [11, 33].

Таблиця 2.1 – Фізико-хімічні властивості плазмоутворюючих середовищ

Середовище	M	$\gamma$ , кг/м <sup>3</sup>	c, Дж/(кг·°C)	$\eta$ , мкПа·с	$\lambda$ , Вт/(м·K)	$\sigma$ , См/см	q, кДж/г·моль	u, В	
								перший	другий
N <sub>2</sub>	28,002	1,2505	1,05	231	1,23	30	714,84	14,51	29,41
Ar	39,94	1,783	0,53	280	0,702	30	-	15,7	27,64
H <sub>2</sub> O (вода, пара при 373 K)	18,016	0,598	2,02	-	-	-	485,52	-	-
H <sub>2</sub>	2,016	0,084	14,3	91,4	3,58	65	435,96	13,54	-
Повітря	-	1,293	1,01	260	2,60	30	-	-	-
O <sub>2</sub>	32,0	1,43	0,92	266	0,750	25	496,44	13,57	34,75

**Примітка:** M – атомна або молекулярна маса;  $\gamma$  – питома вага при 273 K та 101 кПа; c – теплоємність при 10·10<sup>2</sup> K та 101 кПа;  $\eta$  – в'язкість при 10·10<sup>2</sup> K та 101 кПа;  $\lambda$  – теплопровідність при 10·10<sup>2</sup> K та 101 кПа;  $\sigma$  – питома електрична проникність при 10·10<sup>2</sup> K та 101 кПа; q – енергія дисоціації; u – потенціал іонізації.

Інертні гази забезпечують отримання найчистіших поверхонь різку, що особливо важливо для різання кольорових металів. Двохатомні гази покращують передачу енергії дуги до металу, який розрізається, за рахунок механізму дисоціації - рекомбінації. Кисневмісні середовища підвищують енергетичну ефективність різання металів, екзотермічно реагують з киснем, що забезпечує для них найбільш високу продуктивність різання.

Найбільше застосування отримало різання на основі використання плазми кисневмісного стиснутого повітря (повітряно-плазмове різання). Сфери раціонального використання середовищ зазначені у табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Сфери застосування робочих середовищ для плазмового різання

Основне робоче середовище	Добавки	Сфера застосування
Стиснуте повітря	-	Машинне і ручне різання вуглецевих, низьковуглецевих, корозійностійких сталей, чорнове різання кольорових металів
	Кисень	Високопродуктивне машинне різання сталей
	Вода	Машинне різання сталей з меншим ступенем газонасичення кромки
	Пропан-бутан з водою або без	Високопродуктивне машинне різання міді та різання сталі з покращеними властивостями кромки
Кисень	-	Машинне різання сталей з меншим ступенем газонасичення кромки
Аргон	Водень	Чистове різання кольорових металів
Азот	Без добавок, з водою або воднем	Чистове машинне різання міді, ручне різання кольорових металів до 80 мм

Перспективним є використання інтенсифікуючих плазмоутворюючих середовищ. При повітряно-плазмовому різанні збагачення повітря киснем забезпечує підвищення продуктивності різання сталей без збільшення витрат

енергії та сприяє покращенню якості металу на кромках. Подача води в плазмову дугу також покращує якість сталевих заготовок та сприяє підвищенню швидкості різання. Якщо до плазмоутворюючого повітря додавати вуглеводні, то помітно зростає швидкість різання міді та її сплавів і суттєво покращується якість отриманих заготовок.

Орієнтовні режими та умови різання (для машинного прямолінійного різання) наведено в табл. 2.3, 2.4 [1, 2].

Таблиця 2.3 – Орієнтовні режими повітряно-плазмового різання

Товщина металу, мм	Діаметр сопла, мм	Довжина сопла, мм	Струм, А	Витрата повітря, л/хв	Швидкість різання, м/хв		
					сталі	алюміній	мідь
5	2,5-2,8	3-4	200-260	80-100	4-6	4,5-5,0	1,7-3,0
10	2,5-2,8	3-4	250-290	80-100	1,9-3,6	2,4-4,2	1,1-2,0
15	2,5-2,8	3-4	250-325	80-110	1,2-3,0	1,6-3,5	0,65-1,6
20	2,8-3,0	3-4	270-325	80-110	1,0-2,3	1,3-3,0	0,45-1,2
40	2,8-3,7	4-7	300-400	100-120	0,6-0,9	0,9-1,2	0,3-0,6
60	3,0-3,7	4-7	350-400	100-135	0,3-0,4	0,4-0,6	0,1-0,3
100	4	6-8	400-450	135-140	0,1	0,2	-

Таблиця 2.4 – Орієнтовні режими аргано-водневого різання

Товщина металу, мм	Струм, А	Витрата аргону, л/хв	Витрата водню, л/хв	Швидкість різання, м/хв	
				легована сталь	алюміній
5	50	12	8	1,0	1,5
5	100	12	8	1,8	2,5
10	100	12	8	0,8	1,2
20	100	12	8	0,4	0,6
20	250	15	12	0,8	-
40	250	15	12	0,3	0,5
60	250	15	12	0,15	-
85	250	15	12	-	0,15

Для того, щоб уникнути спотворення форми кромки в результаті відставання ріжучого струменя швидкість різання на криволінійних ділянках (з малими радіусами кривизни) слід знижувати на 30...50 %, Також необхідно знижувати швидкість різання при завершенні різі з метою наскрізного прорізання металу на кінцевій різі.

Якщо різання починають на поверхні листа, початковий отвір у металі пробивають поза контуром деталі (на відході). При механізованому різанні пробивку слід виконувати в процесі руху машини з підніманням і подальшим опусканням плазмотрона. Пробивка проводиться на швидкості руху машини, меншій за швидкість різання в 1,5...2 рази.

Врізання з кромки металу або початкового отвору при товщині металу 20-30 мм не потребує спеціальних прийомів та регулювання швидкості.

Контроль за повнотою прорізання можна вести, спостерігаючи за відхиленням від вертикалі стовпа ріжучого струменя на виході з листа. Спочатку врізання вісь і передня межа факела відхиляються в бік, протилежний напрямку різання, але при правильно встановленій швидкості передня межа факела незабаром займає вертикальне положення або близьке до нього. Таке положення у процесі різання свідчить про раціонально підібрану швидкість. За дуже малої швидкості весь факел орієнтується по вертикалі, а його передня межа нестійка і відхиляється у бік руху різача.

## 2.2 Обґрунтування параметрів режиму повітряно-плазмового різання

Всі параметри і режими процесу плазмового різання труб залежать від товщини металу її стінки. Залежність між товщиною розрізуваного металу і напругою плазмової дуги аналітично виражається співвідношенням:

$$U_d = \frac{A}{\sqrt{b}} + H \cdot \lg b, \text{ В} \quad (2.2)$$

де  $b$  – товщина металу стінки труби, мм;

$A$  і  $H$  – коефіцієнти, який залежать від виду плазмоутворюючого газу і його витрати, а також режиму стабілізації дуги).

Апарати для плазмового різання можуть працювати в двох режимах, для яких параметри  $A$  і  $H$  будуть різними [10]:

- для нормальних режимів  $A = 50$ ;  $H = 80$ ;
- для жорстких режимів  $A = 60$ ;  $H = 100$ .

Для товщини стінки труби 5 мм напруга плазмової дуги становитиме:

- для нормального режиму роботи обладнання:

$$U_d = \frac{50}{\sqrt{5}} + 80 \cdot \lg 5 = 55,92 \text{ В}$$

- для жорсткого режиму роботи обладнання:

$$- U_d = \frac{60}{\sqrt{5}} + 100 \cdot \lg 5 = 80,5 \text{ В}$$

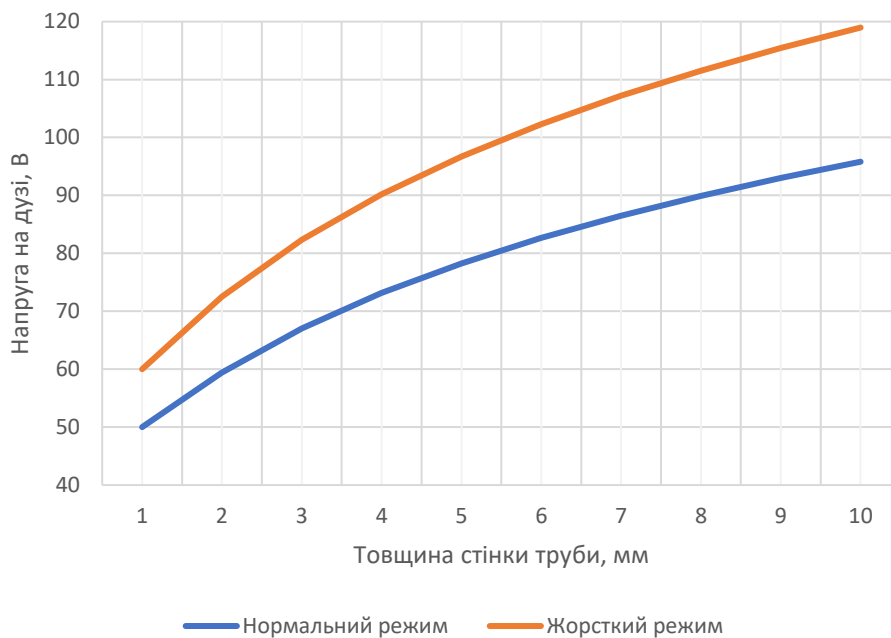


Рисунок 2.2 – Залежність напруги на дузі від товщини стінки труби

Жорсткий режим стабілізації електричної дуги, для яких характерне використання сопел меншого діаметру за підвищеної витрати плазмоутворюючого газу, здебільшого використовують для виконання різів малої ширини і з незначною величиною відставання. При такому режимі напругу на дузі встановлюють на 20...30 % вищою, ніж для нормального режиму різання. Під час різання на жорстких режимах спостерігається підвищена витрата енергії і плазмоутворюючого газу.

Для розрізання деталей різної товщини рекомендовані діаметри формуючих отворів сопел плазмотрона для повітряно-плазмового різання наведені в таблиці 2.5 [33].

Таблиця 2.5- Діаметри отворів сопел для повітряно-плазмового різання металів

Товщина стінки труби, мм	Діаметр отвору сопла, мм
< 15	2
16-30	2,5
31-50	3
51-70	3,5

Залежність величини сили струму для живлення плазмової дуги від діаметра формуючого отвору сопла для повітряно-плазмового різання можна визначити зі співвідношення:

$$I = 100D_c, A \quad (2.3)$$

де  $D_c$  – діаметр отвору сопла, мм.

Для розрізання труб з товщиною стінки менше 10 мм діаметр отвору сопла плазмотрона має становити 2 мм. Тоді:

$$I = 100 \cdot 2,0 = 200 A$$

Залежність сили струму живлення плазмової дуги від діаметра сопла представлена на рис. .

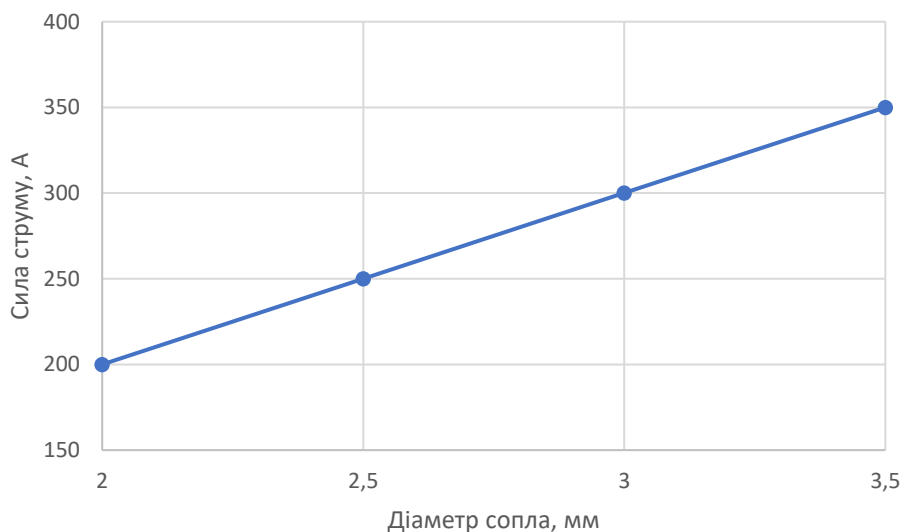


Рисунок 2.3 - Залежність сили струму живлення плазмової дуги від товщини металу

Витрати плазмоутворюючого газу залежать від діаметра отвору сопла плазмотрона та режиму стабілізації дуги.

Для нормального режиму стабілізації витрата газу визначається за формулою:

$$V_{\Pi} = 5,5^2 D_c \text{ л/хв} \quad (2.4)$$

$$V_{\Pi} = 5,5^2 \cdot 2,0 = 65,9 \text{ л/хв}$$

При жорсткому режимі стабілізації дуги витрата плазмоутворюючого газу збільшується на 25...30 %. Тоді вираз для її визначення матиме вигляд:

$$V_{\Pi} = 7^2 D_c \text{ л/хв} \quad (2.5)$$

$$V_{\Pi} = 7^2 \cdot 2,0 = 98 \text{ л/хв}$$

За витратою плазмоутворюючого газу для процесу повітряно-плазмової різки труб підбираємо компресор, з мінімальною витратою 100 л/хв.

Максимальну швидкість повітряно-плазмового різання визначають за формулою:

$$W_{max} = \frac{9 \cdot I \cdot U_d}{D_c \cdot b \cdot q \cdot H_p}, \text{ см/с} \quad (2.6)$$

де  $U_d$  - напруга на дузі, В;

$b$  – товщина стінки труби, мм;

$q$  – питома вага металу, г/см;

$H_p$  – ентальпія нагрівання і плавлення металу труби, кал/г.

Рекомендовані значення питомої ваги та ентальпії для різних типів металевих матеріалів, які піддаються повітряно-плазмовому різанню приведені в таблиці 2.6 [2].

Таблиця 2.6 – Значення ентальпії і питомої ваги конструкційних матеріалів

Матеріал	q, г/см	H <sub>p</sub> , кал/г
Вуглецеві і низько вуглецеві сталі	7,8	320
Середньо- і високо вуглецеві сталі	7,7	310
Мідь	8,6	330
Алюміній і його сплави	2,7	290

Отже, вибравши з табл. 3.2 параметри для низьковуглецевої сталі визначимо максимально-допустиму швидкість різання труб з цього металу:

- для нормального режиму роботи обладнання:

$$W_{max} = \frac{9 \cdot 200 \cdot 55,92}{2 \cdot 5 \cdot 7,8 \cdot 320} = 4,03 \text{ см/с}$$

- для жорсткого режиму роботи обладнання:

$$W_{max} = \frac{9 \cdot 200 \cdot 55,92}{2 \cdot 5 \cdot 7,8 \cdot 320} = 5,81 \text{ см/с}$$

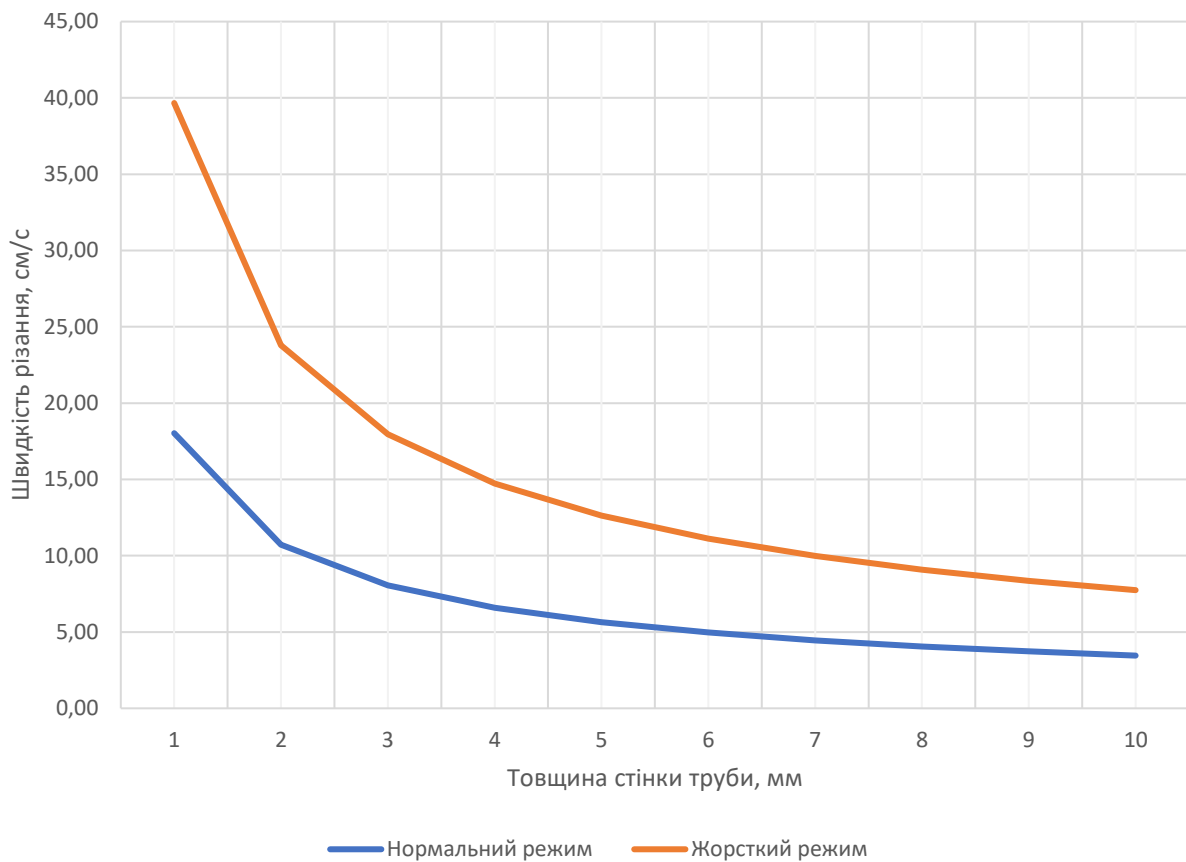


Рисунок 2.4 – Залежність швидкості різання від товщини стінки труби

Для отримання зрізів на трубі з високою якістю фактичні величини швидкості різання ( $W_{різ}$ ) рекомендується встановлювати меншими за розрахункові максимально можливі, дотримуючись співвідношень, наведених у табл. 2.7.



Таблиця 2.7 - Співвідношення між фактичною і максимальною розрахунковою швидкостями для різноманітних умов плазмового різання

Умови різання	$(W_{\text{різ}}) / (W_{\text{max}})$
Заготівельне різання труб	0,9
Чистове різання труб	0,75
Заготівельне (чорнове) фігурне різання труб	0,8
Чистове фігурне різання труб	0,6

Тоді, фактична швидкість різання для чистового розрізання труб з товщиною стінки 5 мм становитиме:

- для нормального режиму роботи обладнання:

$$W_{\text{різ}} = W_{\text{max}} \cdot 0,75 = 4,03 \cdot 0,75 = 3,02 \text{ см/с}$$

- для жорсткого режиму роботи обладнання:

$$W_{\text{різ}} = W_{\text{max}} \cdot 0,75 = 5,81 \cdot 0,75 = 4,36 \text{ см/с}$$

Для остаточного використання розрахункові значення порівнюються з рекомендованими і вибирається їх оптимальне значення. Кінцеві значення параметрів процесу різання встановлюють після виконання пробних різів.

#### Висновки за розділом

За результатами теоретичного аналізу процесу плазмового різання встановлені основні експлуатаційні та технологічні параметри роботи обладнання, від яких залежить ефективність та якість різання металу. Отримані теоретичні залежності струму живлення плазмотрона та максимальної швидкості різання від товщини розрізуваних матеріалів. Ці результати стали вихідними даними для проектування обладнання для забезпечення процесу плазмового різання труб.

## 3 ПРОЕКТУВАННЯ ОСНАСТКИ ДЛЯ ПЛАЗМОВОГО РІЗАННЯ ТРУБ

### 3.1 Опис конструкції установки для плазмового різання труб

Установка для плазмового різання труб розробляється для портативної системи для різання металу EX-TRACK з числовим програмним керуванням (ЧПК). За прототип розробки приймалась установка ST-1 для різання труб (рис. 3.1) [30].

Дана установка призначена для порізки круглих або квадратних труб а також криволінійного різання за креслениками. Діаметр труб, які може розрізати дана установка становить 60...426 мм. Товщина різки труби газовим різанням – 6...50 мм, плазмовим різанням – 3...30 мм. Максимальна довжина труби – 6000 мм. Труба фіксується методом затискання в патроні з межами затискання 60...500 мм.



Рисунок 3.1 – Установка ST-1 для автоматичного різання труб

Системою керує 3-осьовий контролер з бібліотекою програмних макросів.

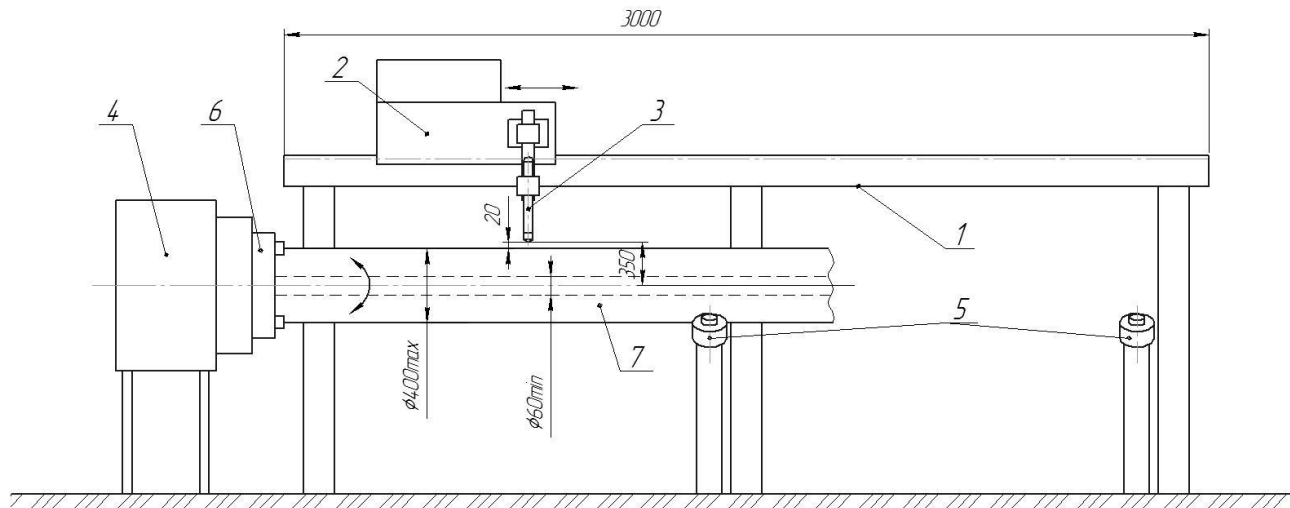


Рисунок 3.2 – Схема установки для різання труб

1 – портативна система для різання металу EX-TRACK; 2 – пульт керування; 3 – плазмотрон; 4 – привід; 5 – роликові опори; 6 – патрон; 7 – труба

Встановлення заготовки (труби) здійснюється за допомогою патрона 6, змонтованого на шпинделі приводу 4.

Привід 4 (рис. 3.2) складається з крокового двигуна 3 (рис. 3.3), з'єднаного через зубчасту пасову передачу 4 з шпинделем 1 кулачкового патрона, який встановлений на підшипниках кочення 2.

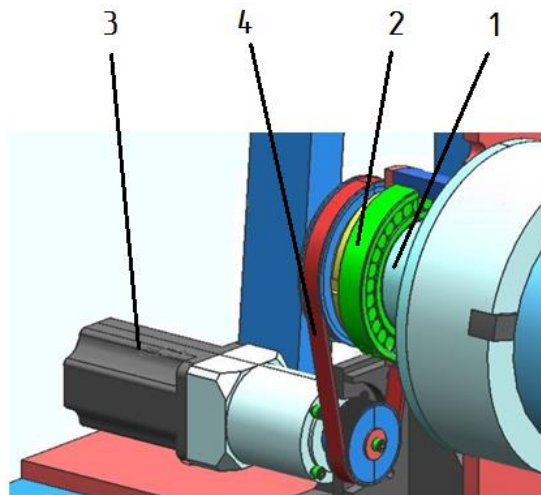


Рисунок 3.3 – Схема приводу патрона механізму обертання труби

Для різання труба 7 встановлюється в патроні 5 механізму приводу. При довжині труби більше 0,8 м її рекомендується встановлювати на додаткові роликові упори 6. В залежності від діаметра труби положення пальника регулюється шляхом зміни його кріплення на поперечній штанзі.

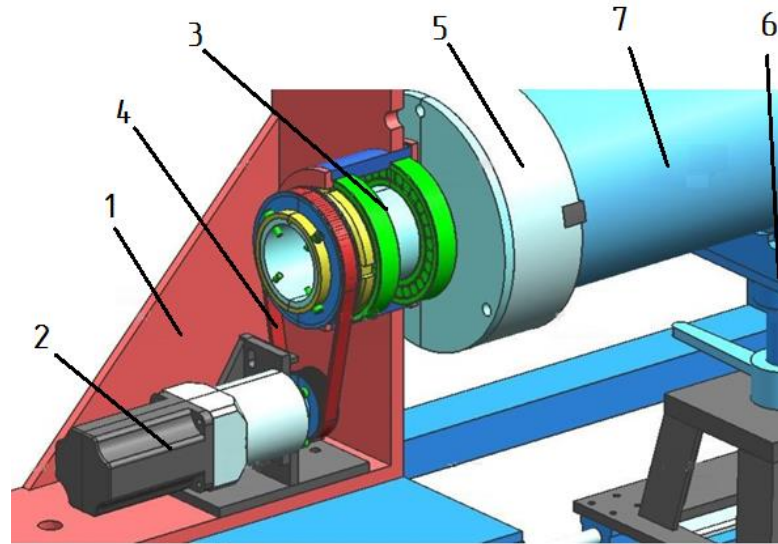


Рисунок 3.4 – Система установки труби

Установка може працювати з трубами круглого перерізу діаметром від 50 до 400 мм.

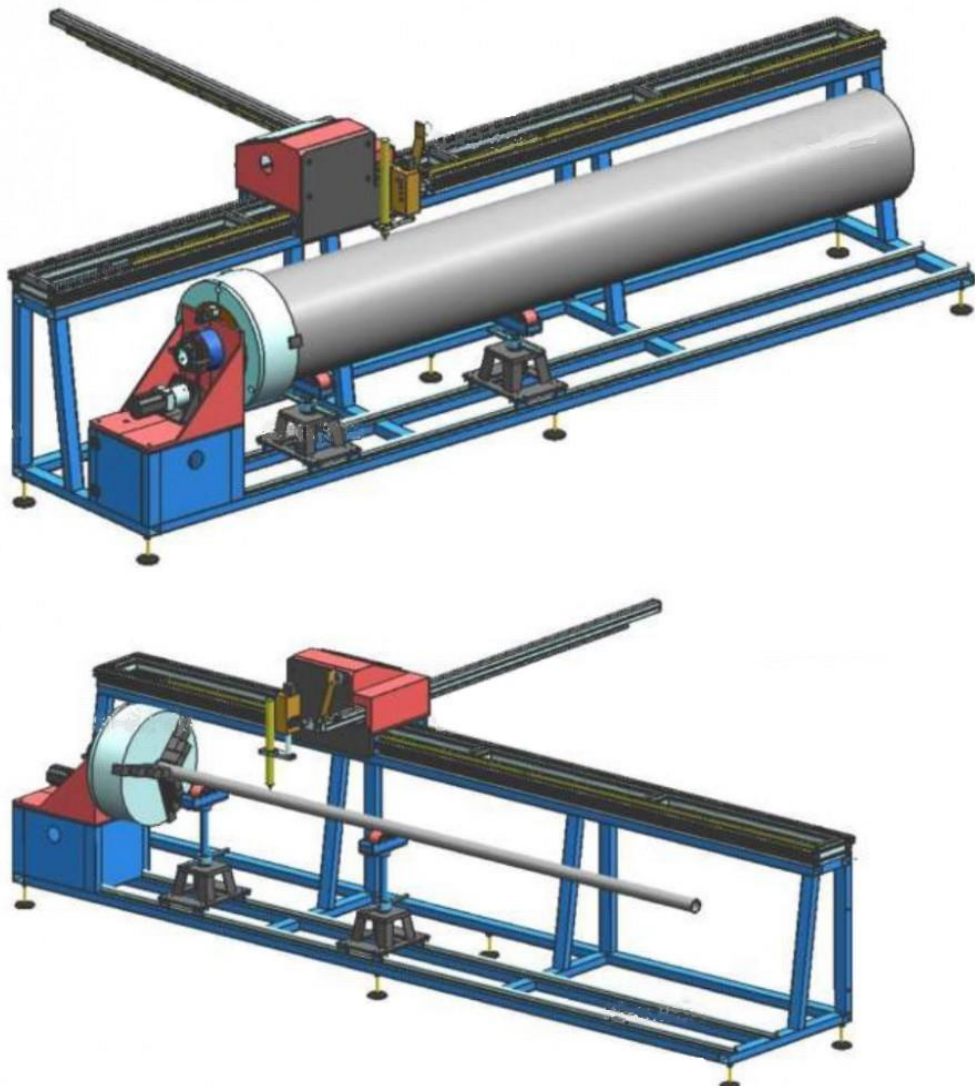


Рисунок 3.5 – Графічна модель установки для плазмового різання труб

Висота розташування роликів опор 6 (рис. 3.4) визначається діаметром розрізаних труб і регулюється шляхом зміни положення плазмотрона 3 (рис. 3.2) в кріпленні на поперечній планці механізму автоматичного переміщення плазмотрона (пульта керування ) 2.

### 3.2 Розрахунок одностоякового обертача з горизонтальним шпинделем

Для приводу затискного патрона установки застосовується схема, схожа на схему одностоякового обертача з горизонтальним шпинделем. Тому для його проектування використаємо методику розрахунку [12, 20, 21].

Вихідні дані для розрахунку:

- попередньо вибрана конструктивна такінематична схеми з розташуванням приводу по одну сторону від опори;

- довжина труби  $L_T = 3000$  мм;

- діаметр труби  $D_T = 150$  мм (6 дюймів);

- вага труби виробу  $G = 53,4$  кг (17,8 кг/м);

- положення центра ваги  $h = 1800$  мм.

Розрахунок проводиться з метою визначення максимальних згинальних та крутних моментів, а також навантаження в опорах для визначення діаметра шпинделя в небезпечних перерізах, підбору підшипників та потужності приводу.

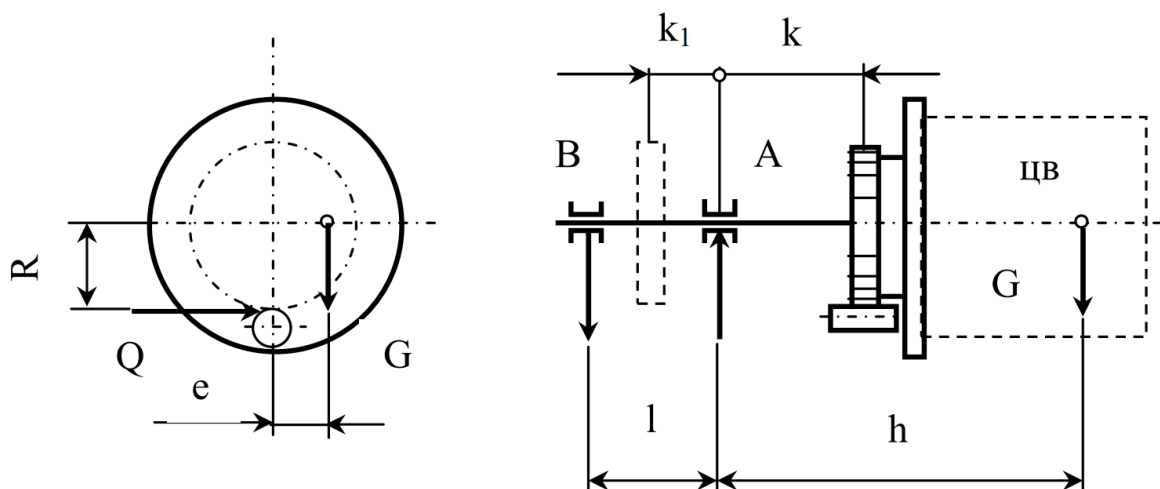


Рисунок 3.6 – Розрахункова схема одно стоякового обертача з горизонтальним шпинделем

Якщо привідний шків закріплений на шпинделі між опорами А та В, то шпиндель повністю сприйматиме не тільки згинальний момент під дією ваги труби, але й крутний момент (рис. 3.6).

Згинальний момент та вантажний крутний момент визначаються з виразів:

$$M_{зг} = G \cdot h; \quad (3.1)$$

$$M_{зг} = 534 \cdot 1,8 = 961,2 \text{ Нм.}$$

$$M_{г.к} = G \cdot e; \quad (3.2)$$

де  $e$  - відстань від центра ваги до осі труби (приймаємо  $e = 75$  мм).

$$M_{кр} = 534 \cdot 0,075 = 40,05 \text{ Н}$$

Отже, згинальний момент в опорі А визначається за формулою (3.1)

Вертикальні реакції опор будуть рівні:

$$A_г = G \cdot \frac{l+h}{l} \quad (3.3)$$

де  $l$  - відстань між підшипниками (приймаємо  $l = 150$  мм).

$$A_г = 534 \cdot \frac{0,15+1,8}{0,15} = 6492 \text{ Н}$$

$$B_г = G \cdot \frac{h}{l} = 534 \cdot \frac{1,8}{0,15} = 6408 \text{ Н} \quad (3.4)$$

Горизонтальні реакції визначимо з рівняння моментів сил:

$$A_2 \cdot l - Q \cdot (l - k_1) = 0 \quad (3.5)$$

де  $k_1$  - відстань від підшипника до шківа (приймаємо  $k_1 = 100$  мм).

Звідки

$$A_2 = Q \cdot \frac{l - k_1}{l} = 40,05 \cdot \frac{150 - 100}{150} = 13,35 \text{ Н}$$

$$B_2 \cdot l - Q \cdot k_1 = 0 \quad (3.6)$$

Звідки

$$B_2 = Q \cdot \frac{k_1}{l} = 40,05 \cdot \frac{100}{150} = 26,7 \text{ Н}$$

де  $Q = \frac{M_{кр}}{R}$  - колова сила, Н [17].

Результуючі реакції опор (сили в підшипниках) становитимуть:

$$A = \sqrt{A_г^2 + A_2^2} = \sqrt{\left(G \cdot \frac{l+h}{l}\right)^2 + \left(Q \cdot \frac{l-k_1}{l}\right)^2}, \quad (3.7)$$

$$A = \sqrt{6492^2 + 13,35^2} = 6492 \text{ Н}$$

$$B = \sqrt{B_6^2 + B_8^2} = \sqrt{\left(G \cdot \frac{h}{l}\right)^2 + \left(Q \cdot \frac{k_1}{l}\right)^2}, \quad (3.8)$$

$$B = \sqrt{6408^2 + 26,7^2} = 6408,1 \text{ Н}$$

Діаметр шпинделя в опорі А, виходячи із сумісної дії згинального  $M_{зг}$  та крутного  $M_{кр}$  моменів визначимо за формулою;

$$d_A = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot \sqrt{M_{зг}^2 + M_{кр}^2}}{[\sigma]}}, \quad (3.9)$$

де  $[\sigma]$  – допустиме напруження згину для матеріалу шпинделя, МПа.

Якщо шпиндель монтується на підшипниках кочення, то моментом сили тертя  $M_{тр}$  можна знехтувати, і вираз (3.10) набуває вигляду:

$$d_A = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot M_{зг}}{[\sigma]}}, \quad (3.10)$$

Для прийнятої конструктивної схеми:

$$d_A = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot \sqrt{M_{зг}^2 + M_{кр}^2}}{[\sigma]}}, \quad (3.11)$$

$$d_A = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot \sqrt{961,2^2 + 40,05^2}}{350}} = 30,2 \text{ мм}$$

Оскільки установка може використовуватись для розрізання труб діаметром до 400 мм, то прийемо  $d_A = 40$  мм.

Підшипники розраховують за відомими методиками за визначеними реакціями опор А та В.

Потужність приводного електродвигуна розраховуємо за формулою:

$$N = \frac{M_{кр} \cdot \omega}{\eta_0}, \quad (3.12)$$

де  $\eta_0 = \eta_{пас} \cdot \eta_{під}$  - загальний ККД привода;

$\eta_{пас} = 0,95$  - ККД зубчастої пасової передачі;

$\eta_{під} = 0,99$  - ККД пари підшипників;

$$\eta_0 = 0,95 \cdot 0,99 = 0,94$$

$\omega$  - кутова швидкість планшайби, 1/с;

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}, \text{ рад/с}; \quad (3.13)$$

$\text{деп} = \frac{v_p}{\pi \cdot D}$  - частота обертання шпинделя, об/хв

де  $v_p$  - швидкість різання ( $v_p = 3,02$  м/хв );

$D$  - діаметр труби, м.

$$n = \frac{3,02}{3,14 \cdot 0,015} = 64,1 \text{ об/хв}$$

$$\omega = \frac{3,14 \cdot 64,1}{30} = 6,71 \text{ рад/с}$$

Тоді

$$N = \frac{40,05 \cdot 6,71}{0,94} = 285,9 \text{ Вт.}$$

При швидкість різання  $v_p = 15$  м/хв:

$$N = \frac{40,05 \cdot 33,33}{0,94} = 1420,2 \text{ Вт.}$$

Для приводу приймаємо двигун з потужність 1,5 кВт.

### 3.3 Розрахунок зубчастої пасової передачі

Для приводу кулачкового патрона обертача використовується зубчаста пасова передача, яка бере привід від крокового двигуна SZGH-08150CC.

Зубчасто-пасові передачі належать до групи передач, які працюють у зачепленні і забезпечують постійність передатного числа, оскільки в них відсутності проковзування паса як у плоско- чи клинопасових. Уникнення проковзування досягається завдяки спеціальним модульним зубцям на внутрішній поверхні паса та на робочій поверхні шківів.

Модуль клинового паса визначають з умови втомної міцності на зсув за формулою;

$$m' = 35 \cdot \sqrt[3]{\frac{P_1}{n_1}}, \text{ мм}, \quad (3.14)$$

де  $P_1$  - потужність на ведучому валу передачі, кВт;

$n_1$  - частота обертання ведучого вала, об/хв.



$$m' = 35 \cdot \sqrt[3]{\frac{1,5}{320}} = 5,86 \text{ мм}$$

Кінцево модуль приймають  $m = 5$  мм [29, 34].

Ширина паса розраховується з виразу:

$$b' = \Psi_p \cdot m \text{ мм}, \quad (3.15)$$

де  $\Psi_p = 6 \dots 9$  - коефіцієнт ширини паса;

$m$  - модуль паса, мм.

$$b' = 6 \cdot 5 = 30 \text{ мм.}$$

Кінцево ширину паса приймаємо  $b = 33$  мм.

Залежно від модуля  $m$  та частоти обертів ведучого вала  $n$  вибирають число зубців ведучого шківів  $z_1 = 16$ .

Число зубців веденого шківів:

$$z_2' = z_1 \cdot u, \quad (3.16)$$

де  $z_1$  - число зубців ведучого шківів;

$u$  - передаточне число передачі ( $u = 2$ ).

$$z_2' = 16 \cdot 2 = 32$$

Мінімальна та максимальна міжосьові відстані визначається за формулами:

$$a_{min} = 0,5 \cdot m \cdot (z_1 + z_2) + 2 \cdot m \text{ мм}; \quad (3.17)$$

$$a_{min} = 0,5 \cdot 5 \cdot (16 + 32) + 2 \cdot 5 = 130 \text{ мм};$$

$$a_{max} = 2 \cdot m \cdot (z_1 + z_2), \text{ мм}, \quad (3.18)$$

$$a_{max} = 2 \cdot 5 \cdot (16 + 32) = 480 \text{ мм}$$

де  $m$  - модуль паса, мм;

$z_1, z_2$  - число зубців ведучого та веденого шківів.

Приймаємо міжосьову відстань  $a' = 300$  мм.

Число зубців паса становитиме:

$$z_p = \frac{2 \cdot a'}{p} + \frac{z_1 + z_2}{2} + \frac{(z_2 - z_1)^2 \cdot p}{40 \cdot a'}, \quad (3.19)$$

де  $a'$  - міжосьова відстань, мм;

$p$  - крок паса, ( $p = 15,71$  мм) [29, 34];

$z_1, z_2$  - число зубців ведучого та веденого шківів.

$$z_p = \frac{2 \cdot 300}{15,71} + \frac{16 + 32}{2} + \frac{(32 - 16)^2 \cdot 15,7}{40 \cdot 300} = 62,53$$

Кінцево кількість зубців паса приймаємо  $z_p = 63$ .

Довжину паса визначаємо за формулою:

$$L = z_p \cdot p = 63 \cdot 15,71 = 989,73 \text{ мм}, \quad (3.20)$$

де  $z_p$ - кількість зубців паса;

$p$  - крок паса, мм.

Ділильні діаметри ведучого та веденого шківів:

$$d_1 = m \cdot z_1 = 5 \cdot 16 = 80 \text{ мм};$$

$$d_2 = m \cdot z_2 = 5 \cdot 32 = 160 \text{ мм}, \quad (3.21)$$

де  $m$  - модуль паса, мм;

$z_1, z_2$  - число зубців ведучого та веденого шківів.

Дійсна міжосьова відстань пасової передачі становитиме:

$$a = 0,25 \cdot \left[ (L - X) + \sqrt{(L - X)^2 - 2 \cdot Y} \right] \text{ мм}, \quad (3.22)$$

де  $L$  - довжина паса, мм;

$X = 0,5 \cdot \pi \cdot (d_1 + d_2)$  - проміжний розрахунок;

$Y = (d_2 - d_1)^2$  - проміжний розрахунок;

$d_1, d_2$  - діаметри ведучого та веденого шківів, мм.

$$X = 0,5 \cdot 3,14 \cdot (16 + 32) = 75,36$$

$$Y = (32 - 16)^2 = 256$$

Тоді

$$a = 0,25 \cdot \left[ (989,73 - 75,36) + \sqrt{(989,73 - 75,36)^2 - 2 \cdot 256} \right] = 457,11 \text{ мм.}$$

Кут обхвату ведучого шківа пасом рівний:

$$\alpha_1 = 180^\circ - \frac{d_2 - d_1}{a} \cdot 57^\circ, \text{ град}, \quad (3.23)$$

де  $d_1, d_2$  - діаметри ведучого та веденого шківів, мм;

$a$  - міжосьова відстань, мм.

$$\alpha_1 = 180^\circ - \frac{160 - 80}{457,11} \cdot 57^\circ = 170,02 \text{ град.}$$

Число зубців паса у зачепленні:

$$z_0 = z_1 \cdot \frac{\alpha_1}{360^\circ} \geq [z]_0, \quad (3.24)$$

де  $\alpha_1$  - кут охоплення ведучого шківa пасом, град.;

$z_1$  - число зубців ведучого шківa;

$[z]_0 \geq 6$  - допустиме число зубців у зачепленні [29].

$$z_0 = 16 \cdot \frac{170,02}{360^\circ} = 7,56 \geq 6$$

Отже передача є роботоздатною, оскільки умови  $\alpha_1 = 170,02 > 120$  град., та  $z_0 = 7,56 > [z]_0 = 6$  виконуються.

### 3.4 Розрахунок роликoвих опор

З метою вибору необхідних параметрів роликoвих опор установки для плазмового різання труб, проведемо їх розрахунок. Розрахунок проводимо згідно [21], який включає в себе: визначення навантаження на роликoві опори, розрахунок діаметра осей роликів за схемою, наведеною на рис. 3.7.

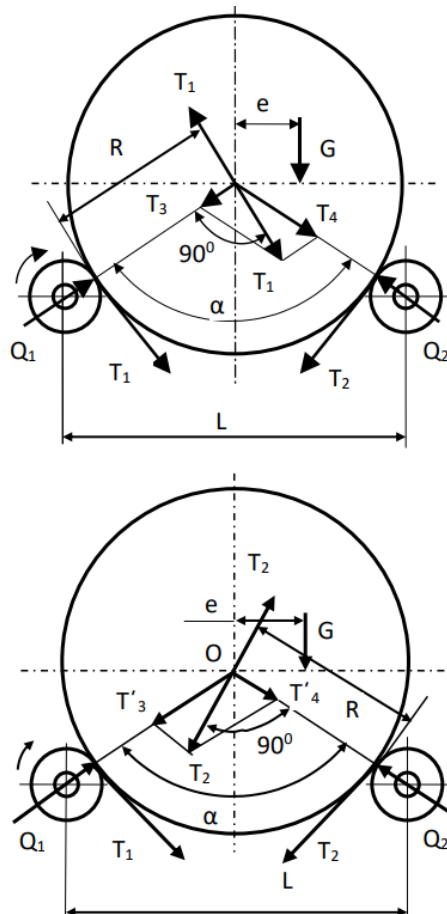


Рисунок 3.7 – Розрахункова схема роликoвих опор

Для розрахунків приймемо наступні вихідні дані:

- діаметр труби  $D = 400$  мм, довжина труби  $l = 3000$  мм, вага  $G = 484,2$  кг, незбалансованість  $e = 0,02R$ , частота обертання  $n = 64,1$  об/хв.

Приймаємо конструкцію роликового стенда з центральним кутом  $\alpha = 500$  та діаметром роликових опор  $D_p = 180$  мм [3].

Визначаємо відстань  $L$  між роликовими опорами, прийнявши за максимальний діаметр труби  $D = 400$  мм.

$$D = \frac{L}{\sin \frac{\alpha}{2}} - D_p, \quad (3.25)$$

звідки

$$L = \sin \frac{\alpha}{2} (D + D_p) = \sin \frac{50}{2} (0,4 + 0,18) = 0,44 \text{ м}$$

Приймаємо відстань між роликовими опорами  $L = 0,7$  м'.

Критичне значення ексцентриситету, за якого забезпечується статична стійкість барабана на роликовому стенді при наявності дисбалансу  $e = 0,02R = 0,008$  м

$$e_{кр} = R \sin \frac{\alpha}{2} = 0,7 \sin \frac{50}{2} = 0,3. \quad (3.26)$$

Стійкість барабана забезпечується, оскільки  $e < e_{кр}$ .

Опорні реакції роликових опор в статичному стані без урахування дисбалансу

$$Q = Q_1 = Q_2 = \frac{G}{2 \cos \frac{\alpha}{2}} = \frac{484,2}{2 \cos \frac{50}{2}} = 267,13 \text{ кг}. \quad (3.27)$$

Попередньо визначаємо діаметр осі роликових опор від реакції  $Q$ , якщо прийнята відстань між осями підшипників  $l = 200$  мм.

Згинальний момент в осі ролика визначаємо як для двохопорної шарнірно закріпленої балки, яка навантажена посередині

$$M_z = \frac{Q \cdot l}{4} = \frac{267,11 \cdot 0,2}{4} = 13,35 \text{ кг} \cdot \text{м} = 133,5 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad (3.28)$$

Діаметр осі роликової опори зі сталі 35 для якої  $[\sigma] = 60$  МПа [27] становитиме:

$$d_o = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot M_{3z}}{[\sigma]}}, \quad (3.29)$$

$$d_o = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot 133,5}{60 \cdot 10^6}} = 0,028 \text{ м}.$$

Для встановлення підшипників приймаємо діаметр вала  $d_{\text{п}} = 30$  мм. Всі інші ділянки шпиндельного вала приймаємо згідно правил конструювання валів та їх опор.

### Висновки за розділом

Для портативної системи автоматичного плазмового різання металу EX-TRACK запропоновано конструкцію додаткового обладнання, яке дозволяє застосовувати її для різання труб діаметром від 50 до 400 мм. Суть розробки полягає у обладнанні установки додатковим обертально-кріпильним пристроєм з керованим приводом та системою опор для підтримки труб. Дане обладнання пропонується монтувати замість стола для розрізання листового матеріалу.

Для запропонованої конструкції розроблено схему приводу, вибрано двигун та зубчасту пасову передачу, а також розраховано та спроектовано опорні підтримуючі ролики. Роботоздатність запропонованої конструкції підтверджена перевіркою умов міцності.

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ

### 4.1 Аналіз чинників і факторів, які можуть призвести до виникнення небезпечних чи аварійних ситуацій під час роботи на установці для плазмового різання металу

Під час виконання робіт на плазмових установках оператор повинен дотримуватись інструкції з охорони праці та виконувати тільки ту роботу, яка йому доручена.

Оператор плазмових установок повинен знати [16]:

- загальну будову та призначення окремих частин установки для плазмового різання;
- порядок пуску і зупинки устаткування, на якому він працює;
- режими різання, принцип роботи обладнання і правила налагодження;
- технологічні особливості різання сталей і кольорових металів;
- прийоми надання першої допомоги постраждалим.

Експлуатація плазмової установки в режимі різання супроводжується шумом, що перевищує допустимі рівні, тому при організації робочого місця слід вживати заходів щодо зниження рівня шуму.

При експлуатації плазмової установки необхідно обладнати на робочому місці утворюється значна кількість шкідливих газів, які необхідно видаляти за допомогою штучної вентиляції.

В процесі роботи на оператора плазмових установок можливий вплив наступних небезпечних і шкідливих виробничих факторів:

- рухомі частини виробничого обладнання;
- пересувні вироби, заготовки, матеріали;
- підвищена температура поверхонь, обладнання, матеріалів;
- підвищений рівень шуму на робочому місці;
- підвищене значення напруги в електричній мережі, замикання якої може статися через тіло людини;
- підвищений рівень статичної електрики;

- недостатня освітленість робочої зони;
- підвищена яскравість світла;
- гострі кромки, задирки і шорсткість на поверхні заготовок;
- підвищена загазованість повітря робочої зони;
- статичні і динамічні фізичні перевантаження.

#### 4.2 Моделювання процесу формування і виникнення травмонебезпечної ситуації під час плазмового різання труб

Одним із основних способів моделювання небезпечних ситуацій є метод графічно окресленого логічного моделювання потенційних аварій, травм і катастроф. Цей метод базується на побудові схем, відмов і помилок працівників (операторів) різних систем. Потрібно вести математичну обробку даних, з метою одержання ймовірності виникнення травматичних випадкових подій. Розрахунки спрямовані на зниження нещасних випадків на виробництві.

Вивчаючи модель процесів формування та можливого виникнення травмонебезпечних та аварійних ситуацій, з якої починається небезпечний процес і до виникнення небезпечних наслідків. Якщо провести дослідження то обов'язково можна знайти подію (явище), що є причиною травмонебезпечних та аварійних ситуацій.

Розглянемо випадок виробничого травматизму під час плазмової різки труб. У даному випадку відбувається травма працівника, внаслідок ураження електричним струмом чи отримання опіку. Головну подію розміщують у верхній частині аркуша паперу і зверху донизу розміщують інші події. У побудованій моделі базові події мають форму круга. Нерозкриті базові події зображують у вигляді ромба, прямокутник подія, що виникає як результат дії фактора.

Математичну обробку побудованої моделі починають з крайньої лівої гілки, події якої пронумеровані знизу у вверх починаючи з базових подій і закінчуючи головною. Значення подій вказуємо безпосередньо на символи зображення події. Ймовірності виробничих подій визначаємо за даними

виробництва. Наприклад, базова подія “охорона праці”. Для визначення ймовірності ми повинні встановити наскільки (%) від ідеального рівня здійснюється відповідний контроль на об’єкт. Якщо буде встановлено, що такий рівень контролю становить 20 або 30%, то ймовірність відповідно становить 0,2 і 0,3. При відсутності контролю ймовірність “не здійснення контролю” становитиме 1, якщо контроль ідеальний, то відповідна ймовірність дорівнює 0. Для виконання математичних обчислень ймовірностей випадкових подій логіко-імітаційної моделі застосовують складені формули відповідно до положень [6].

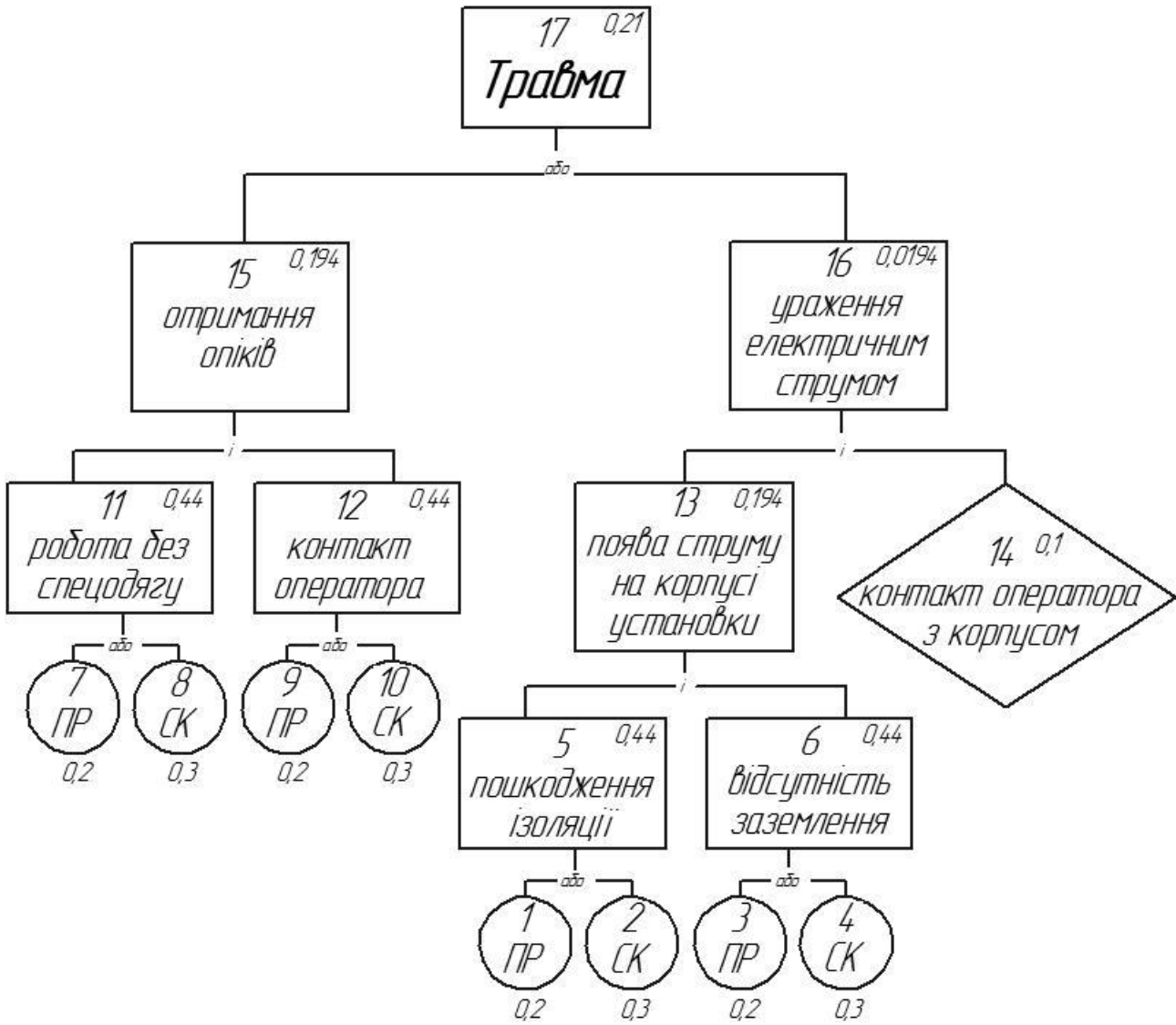


Рисунок 4.1. Модель процесу формування та виникнення травми



На даній схемі графічно відображено математичну обробку даних на виробництві про нещасні випадки.

Ймовірність події  $P_5$  визначаємо наступним чином

$$P_5 = P_1 + P_2 - P_1 \cdot P_2 = 0,2 + 0,3 - 0,2 \cdot 0,3 = 0,44 \quad (4.1)$$

Ймовірність подій  $P_6, P_{11}, P_{12}$  буде рівною події  $P_5$ , оскільки базові події для них є однаковими.

Ймовірність події  $P_{13}$

$$P_{13} = P_5 \cdot P_6 = 0,44 \cdot 0,44 = 0,194 \quad (4.2)$$

Ймовірність події  $P_{16}$

$$P_{16} = P_{13} \cdot P_{14} = 0,194 \cdot 0,1 = 0,0194 \quad (4.3)$$

Ймовірності подій  $P_{15}$  буде рівною події  $P_{13}$ , оскільки події  $P_5, P_6, P_{11}, P_{12}$  рівні між собою.

Ймовірність події  $P_{24}$

$$P_{17} = P_{15} + P_{16} - P_{15} \cdot P_{16} \quad (4.4)$$

$$P_{24} = 0,194 + 0,0194 - 0,194 \cdot 0,0194 = 0,21$$

Таким чином, на робочому місті під час плазмового різання труб на установці плазмового різання за наявності і можливості виникнення існуючих небезпек та небезпечних діяч на 100 робочих місць ймовірність виникнення травмонебезпечної ситуації становить 0,21 (21 %).

Такий високий показник пояснюється великою кількістю небезпечних факторів та високими вимогами щодо кваліфікації працівників, якості виконання технологічного процесу та умов безпеки праці.

#### 4.3 Заходи щодо запобігання виробничого травматизму під час роботи на плазмових установках

До роботи оператором плазмових установок допускати осіб, які досягли 18-річного віку, навчені і атестовані на II кваліфікаційну групу з електробезпеки, пройшли медичний огляд, вступний і первинний на робочому місці інструктажі з охорони праці, які вже оволоділи безпечними методами виконання робіт і пройшли перевірку знань вимог охорони праці.

Оператор плазмових установок повинен бути забезпечений необхідними засобами індивідуального захисту відповідно до типових норм.

Перебуваючи в цеху, необхідно:

- звертати увагу на сигнали, що подаються з вантажопідіймальних кранів і транспорту, що рухається;

- не стояти і не проходити під вантажем, піднятим краном, а також між верстатами, колонами, огорожами, стінами будівлі і ін., близько розташованими до пересувного вантажу;

- при русі по цеху користуватися тільки встановленими проходами, що не перелазити через конвеєри, рольганги і т.п.

Перед початком роботи обов'язково слід одягти спецодяг, перевірити справність обладнання, електропроводки, наявність і справність заземлення.

Витяжна вентиляція повинна бути встановлена над столом для різання і зі зворотного боку розрізаного листа.

Про всі помічені недоліки, несправності в обладнанні і про виниклі небезпеки повідомити майстру. До роботи можна приступати тільки після усунення всіх несправностей і дозволу майстра.

Не слід дивитися на дугу, що утворюється при різанні, незахищеними очима. Необхідно користуватися захисною маскою зі світлофільтром.

Забороняється під час роботи на установці залишати відкритими шафу електроживлення і пульт управління.

Забороняється залишати без нагляду установку з підключеними стисненим повітрям, водою і включеним напругою.

Під час роботи забороняється тримати шланги під пахвою, на плечах або затискати ногами. Забороняється допускати зіткнення шлангів з струмопровідними проводами.

При перегрів різачка робота повинна бути зупинена до повного його охолодження.

Не допускати попадання на шланги іскор, вогню або важких предметів, а також впливу високих температур.

Забороняється приєднання до шлангів вилок, трійників і т.п. для живлення декількох ризиків.

Не допускати проведення ремонту апаратури, різаків і т.д. У разі несправності негайно припинити роботу і повідомити майстру.

При щоденному обслуговуванні необхідно перевіряти справність підвідних проводів; справність контактних затискачів і роз'ємів на панелі з зажимами; заземлення джерела живлення; заземлення розрізаного виробу або столу для різання.

Справність захисних засобів слід перевіряти перед кожним застосуванням. Захисні засоби, у яких закінчився термін чергового випробування, застосовувати забороняється.

Для запобігання виникненню пожеж необхідно дотримуватися таких вимог:

- не захаращувати доступи і проходи до протипожежного інвентарю, вогнегасників, гідрантів;
- зберігати горючі та легкозаймисті речовини в спеціально відведених місцях з дотриманням заходів пожежної безпеки;
- палити тільки в спеціально відведених місцях, забезпечених протипожежним інвентарем і урнами;
- використаний обтиральний матеріал зберігати в металевому ящику з щільно закривається кришкою;
- не проходити з відкритим вогнем для шлангів;
- не чистити і не прати робочий одяг бензином і іншими легкозаймистими рідинами.

При виникненні ситуацій, які можуть привести до аварій і нещасних випадків (наприклад, при пробі ізоляції в ланцюзі, течі шлангів, несправному водоохолодженні або припинення подачі води), необхідно припинити роботу, відключити подачу електроенергії, вивести з небезпечної зони людей і повідомити про виниклу ситуацію керівнику робіт.

При виникненні аварії негайно вжити заходів з надання потерпілим першої допомоги, викликати машину швидкої допомоги.

При виявленні пожежі негайно повідомити в пожежну охорону по телефону 101, сповістити керівництво і до прибуття пожежних приступити до ліквідації вогнища пожежі наявними засобами в залежності від загорівся матеріалу.

При нещасному випадку надати потерпілому першу долікарську допомогу, повідомити про подію керівництву. По можливості зупинити обстановку, якщо це не призведе до аварії або травмування інших людей. При необхідності викликати бригаду швидкої допомоги по телефону 103 або допомогти доставити потерпілого в медичний заклад.

### Висновки за розділом

Аналіз чинників і факторів, які можуть призвести до виникнення небезпечних чи аварійних ситуацій під час роботи на установці для плазмового різання металу дозволив отримати вихідні дані для моделювання можливості виникнення небезпечної ситуації, ймовірність якої становить 21 %. Виконання заходів щодо запобігання виробничого травматизму під час роботи на плазмових установках дозволить суттєво знизити цей показник та покращити безпеку праці.

## 5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ УСТАНОВОК ДЛЯ ПОВІТРЯНО-ПЛАЗМОВОГО РІЗАННЯ ТРУБ

### 5.1 Вихідні дані розрахунку

Установка для плазмової різки труб з робочим ходом пальника 3000 мм, призначений для повітряно-плазмового різання труб. В ньому використовуватись джерело плазми EX-TRAFIRE 55SD.

- вартість електроенергії 2,64 грн./КВт · год;
- товщина розрізуваного металу -  $h = 5$  мм;
- напруга мережі живлення - стабільно, 380 В;
- розрізаємий матеріал - вуглецева сталь;
- режим роботи - однозмінний (8 годин).

### 5.2. Розрахунок собівартості плазмового різання

Приймаємо швидкість різання  $V$  згідно (2.6) становить 4,03 м/хв.

Довжина різку одним катодом при товщині розрізуваного металу 5 мм  $L$  приблизно дорівнює 12,7 метра.

В результаті витрати на один метр розрізування складають [9]:

$$S_{\text{затр}} = \frac{S_{\text{кат}}}{L} + \frac{S_{\text{сопл}}}{L} + S_{\text{аморт.м}} + S_{\text{плазм.м}} + S_{\text{ел.м}} \quad (5.1)$$

де  $S_{\text{кат}}$  - вартість катода,

$S_{\text{сопл}}$  - вартість сопла,

$S_{\text{аморт.м}}$  - амортизація апарата, приведена до одного метра різку (грн/м),

$S_{\text{плазм.м}}$  - амортизація плазмотрона приведена до одного метру різку (грн/м),

$S_{\text{ел.м}}$  - вартість електроенергії приведена до одного метру різку (грн/м).

Амортизація апарата за годину при однозмінній 8-ми годинний роботі буде дорівнювати:

$$A_{\text{аморт}} = \frac{S_{\text{апар}}}{P \cdot N \cdot T} \quad (5.2)$$

де  $S_{\text{апар}}$  - ціна системи EX-TRACK,

$P$  - ресурс апарату в роках,

$N$  - кількість робочих днів у році,

$T$  - кількість робочих годин в день.

$$A_{\text{аморт}} = \frac{213000}{10 \cdot 250 \cdot 8} = 10,65 \text{ грн/год}$$

$l_{\text{прив}}$  - приведена довжина різку за 1 годину при швидкості різання  $v = 67,2 \text{ мм/с} = 4,03 \text{ м/год}$  і коефіцієнті використання робочого часу оператором  $Q = 70\%$  становить:

$$l_{\text{прив}} = v \cdot Q = 4,03 \cdot 0,7 = 2,82 \text{ м/год} \quad (5.3)$$

Коефіцієнт використання робочого часу оператором узятий для розрахунку, як чистий час різання труби. Решта (30% робочого часу) відведено на переходи, вантажно-розвантажувальні роботи і допоміжні операції.

Отже, амортизація установки, приведена до одного метру різку становить:

$$S_{\text{ам.ап}} = \frac{A_{\text{апар}}}{l_{\text{прив}}} = \frac{10,65}{2,82} = 3,78 \text{ грн/м} \quad (5.4)$$

Час гарантованої роботи пальника становить 1360 годин безперервної роботи (час горіння дуги), вартість плазмотрона - 21000 грн.

Отже, амортизація плазмотрона на годину складе:

$$A_{\text{плазм}} = \frac{21000}{1360} = 15,44 \text{ грн/год}$$

Амортизація плазмотрона, приведена до одного метру різку складе:

$$S_{\text{ам.пл}} = \frac{A_{\text{плазм}}}{l_{\text{прив}}} = \frac{15,44}{2,82} = 5,48 \text{ грн/м} \quad (5.5)$$

Максимальна споживана потужність апарату EX-TRACK, з компресором – 16,2 кВт. Регулювання по потужності передбачена, але розрахунок зробимо з максимальної потужності:

$$S_{\text{ел.м}} = \frac{30 \cdot A_{\text{ел}} \cdot h}{l_{\text{прив}}} \quad (5.6)$$

де  $A_{\text{ел}}$  - вартість електроенергії, грн./кВт·год.;

$h$  - коефіцієнт використання електроенергії.

Вартість одного кВт·год електроенергії  $A_{\text{ел}}$  прийнята рівною 264 копійок за 1 кВт·год.

Апарат працює 30% часу на повній потужності в 16,2 кВт, в час, що залишився він працює на холостому ході, коли практично нічого не споживає.

Тому додаємо 5% до часу роботи установки на повній потужності і коефіцієнт використання електроенергії становитиме  $30 + 5 = 35\%$ .

$$S_{\text{ел.м}} = \frac{16,2 \cdot 2,64 \cdot 0,35}{2,82} = 5,31 \text{ грн/м}$$

Разом собівартість 1 метра плазмового різання становить:

$$S_{\text{затр}} = \frac{82}{12,7} + \frac{90}{12,7} + 3,78 + 2,48 + 5,31 = 25,11 \text{ грн/м}$$

де  $S_{\text{кат}}$  - вартість катода,

$S_{\text{сопл}}$  - вартість сопла,

$L$  - довжина різу одним катодом (12,7 метрів).

При грамотній організації виробництва можна збільшити коефіцієнт використання робочого часу, що дозволить збільшити продуктивність і значно знизить витрати.

#### Висновки за розділом

В даному розділі визначено основні складові, які формують економічну ефективність плазмового різання металу. Визначено основні статті затрат на роботу установки та собівартість виконання одиниці роботи (одного метру різу). Ринкова вартість плазмового різання металу товщиною від 1,5 до 20 мм становить від 9 до 48 грн/м різу відповідно. Отже, отримані результати свідчать про економічну ефективність процесу різання труб на пропонованій установці для плазмового різання.

## ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ

1. Проведений аналіз технологій та засобів плазмового різання свідчить про можливість та ефективність їх застосування для різання сталевих труб, тому розробка додаткового обладнання до портативної системи EX-TRACK для плазмового різання циліндричних труб дозволить підвищити технологічність та функціональність даної установки.

2. За результатами теоретичного аналізу процесу плазмового різання встановлено, що продуктивність (швидкість різання) та залежить від напруги на дузі та товщини розрізуваних матеріалів.

3. В роботі пропонується обладнати портативну систему EX-TRACK додатковим обертально-кріпильним пристроєм з керованим приводом та системою опор для підтримки труб. Дане обладнання пропонується монтувати замість стола для розрізання листового матеріалу. Завдяки такому удосконаленню на даній установці можна буде виконувати операції розрізання труб діаметром від 50 до 400 мм.

4. Для приводу обертально-кріпильного механізму спроектований привід у складі крокового двигуна SZGH-08150CC з частотою обертання 0-1500 об/хв та потужністю 1,5 кВт та зубчастої пасової передачі. Конструкція опорних підтримуючих роликів дозволяє встановлювати на них трубу довжиною 3 м масою до 500 кг.

5. Моделювання процесу виникнення небезпечної ситуації показало її ймовірність на рівні 21 %. Виконання запропонованих заходів по запобіганню виробничого травматизму під час роботи на плазмових установках дозволить суттєво знизити цей показник та покращити безпеку праці.

6. Питома собівартість виконання роботи (одного метру різу) на установці EX-TRACK склала 25,11 грн/м. Ринкова вартість плазмового різання металу товщиною від 1,5 до 20 мм становить від 9 до 48 грн/м різу відповідно. Отже, отримані результати свідчать про економічну ефективність процесу різання труб.



## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Биковський О.Г. Зварювання, різання й контроль якості під час виробництва металоконструкцій: довідковий підручник. Київ: Основа, 2021. 400 с.
2. Биковський О.Г. Зварювання та різання кольорових металів: підручник. Київ: Основа, 2011. 392 с.
3. Бойко В.С., Буденко С.Ф., Ф.Ю. Розрахунки і конструювання робочих елементів машин з оболонками, що повільно обертаються. Методичні вказівки для студентів, що навчаються за напрямом підготовки 6.050503 „Машинобудування“ ОКР Бакалавр - Таврійський державний агротехнологічний університет, 2016 - 14 с.
4. Верстат для профільної різання труб Promotech PPCM. Джерело: <https://hydromarket.com.ua/ua/p857994148-standok-dlya-profilnoj.html>
5. Геворкян Е.С., Тимофеева Л.А., Нерубацький В.П. та ін. Інтегровані технології обробки матеріалів: підручник/Харків: УкрДУЗТ, 2016. 238 с., ISBN 978-617-654-060-1
6. Городецький І. В, О. Тимочко. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях: методичні рекомендації до виконання розділу у роботах ОКР ”Магістр” студентами факультету механіки та енергетики. Львів: Львівський НАУ, 2011. 16 с.
7. Гуменюк І.В. Іваськів О.В., Гуменюк О.В. Технологія електродугового зварювання: Підручник. Київ: Грамота, 2006. 512 с.
8. 7. ДСТУ 8943:2019 - Труби сталеві електрозварні. Джерело: [https://uscc.ua/uploads/page/images/normativnye%20dokumenty/dstu/dstu\\_8943\\_2019.pdf](https://uscc.ua/uploads/page/images/normativnye%20dokumenty/dstu/dstu_8943_2019.pdf)
9. Іванова О. А., Пеліхов Є. Ф., Сумець О. М. Економіка сучасного виробництва : навч. посіб. Харків : Вид-во НУА, 2017. 312 с
10. Капустян О.Є., Бережний С.П. Методичні вказівки д.о лабораторної роботи № 4 «Розрахунково-експериментальне визначення режиму плазмового різання металів з використанням ПЕОМ» з дисципліни «Термічне різання

металів» для студентів освітньої програми «Технології та устаткування зварювання» всіх форм навчання. Запоріжжя: ЗНТУ, 2016. 18 с.

11. Капустян О.Є., Костюк. М.О. Методичні вказівки до лабораторної роботи №11 з дисципліни «Газополуменева обробка матеріалів» для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка» усіх форм навчання. Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2019. 18 с.

12. Карпенко А.С. Технологічна оснастка у зварювальному виробництві: Навчальний посібник. Київ: Арістей, 2005. 268 с.

13. КАТАЛОГ Верстатів. Обладнання для обробки листового металу. Джерело: <https://liagtechnik.com.ua/>

14. Комплекс для плазмового різання труб з ЧПК PipeCut jasic PipeCut-150. Джерело: <https://king-tools.com.ua/catalog/plazmorizi/kompleks-dlya-plazmovogo-rizannya-trub-z-chpk-pipecut-jasic-pipecut-150/>

15. Кущій Г., Гавриш П., Кассов В. Дослідження впливу параметрів режиму повітряно-дугового різання на технологічні показники процесу. Вісник ТНТУ № 4, Том 16. 2011. С.125-131.

16. Левченко О. Г. Охорона праці у зварювальному виробництві Навчальний посібник. Київ: Основа, 2010. 240 с.

17. Лисак В.В. Складально-зварювальне оснащення-2. Проєктування складально-зварювальної оснастки. Курсовий проєкт: рекомендації до виконання: навчальний посібник для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка», спеціалізації «Технології та інжиніринг у зварюванні». Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 67 с.

18. Машина для різання труб - механізація обробки металевих труб. Джерело: <https://www.i-e.com.ua/ua/catalog/svarochnoe-oborudovanie-huawei/oborudovaniye-rezki-trub.html>

19. НПАОП 28.5-1.02-07. Правила охорони праці при термічній обробці металів.

20. Осіпов М.Ю., Капустян О.Є. Методичні вказівки до виконання курсового проєкту з дисципліни "Допоміжне обладнання для зварювання та інженерії поверхонь" для студентів спеціальності 131 "Прикладна механіка"

освітньої програми «Відновлення та підвищення зносостійкості деталей і конструкцій» усіх форм навчання. Запоріжжя: ЗНТУ, 2018. 58 с.

21. Петров О. В., Сухоруков С.І. Технологічна оснастка: навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2018. 123 с.

22. Писаренко Г.С. та ін. Опір матеріалів: Підручник. Київ: Вища школа, 2004. 655 с.

23. Плазмове різання. Джерело: <https://uk.wikipedia.org/wiki>

24. Пристосування для різання труб великого діаметру на ланцюговому приводі. Джерело: <https://www.i-e.com.ua/ua/machini-cepnim-privodom.html>.

24. Проць Я. І., Савків В. Б., Шкодзінський О. К., Ляшук О. Л. Автоматизація виробничих процесів: навч. посіб. для технічних спеціальностей вищих навчальних закладів. 2011. 344 с.

26. Портативні CNC ріжучі системи EX-TraCK. Джерело: <https://www.thermacut.ua/products/oryhinalna-prduktsiya.html>

27. Сологуб М. О., Рожнецький І.О. та ін. Технологія конструкційних матеріалів. Київ: Вища школа. 2002. 369 с.

28. Сталеві труби безшовні гарячедеформовані ГОСТ 8732-78. Розміри, вага. Джерело: <https://sbk.ltd.ua/uk/sortament-vaga-metaloprokatu/194-stalnye-truby-besshovnye-gorjachedeformirovannye-gost-8732-78-razmery-i-ves.html>

29. Токарський Ю., Янків В., Сірик З., Гошко М., Косенко І. Розрахунок механічних передач на електронно–обчислювальних машинах: Навчальний посібник. – Львів: Львівський державний аграрний університет, 2003. – 160 с.

30. Установа для автоматичного різання труб з ЧПУ ST-1. Джерело: <https://st-e.info/obladnannya-dlya-plazmowoi-rizky/ustanovka-dlya-rizky-trub/>

31. Хмілевський О.А. Аналіз верстатів для автоматичного плазмового різання металу. Перші наукові кроки – 2023: збірник наукових праць Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів та молодих науковців (14 квітня 2023 р., м. Кам'янець-Подільський). – Кам'янець-Подільський, 2023. – 190 с.

32. Хмілевський О.А. Особливості вибору обладнання для плазмового різання. Студентська молодь і науковий прогрес: тези доп. Міжнар. студ. наук. форуму, 4 – 6 жовт. 2023 р. [Електронний ресурс]. Львів, 2023. 598 с.

33. Швець О.П., Шеремета Р.Б. Технології та обладнання зварювання металів і пластмас Методичні рекомендації до виконання лабораторної роботи на тему «Обладнання для плазмового різання металів» студентами ОС «Бакалавр» спеціальностей 133 «Галузеве машинобудування», 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», 208 «Агроінженерія», 274 «Автомобільний транспорт». Львів: ЛНУП, 2022. 14 с.

34. Шевченко В.В., Осадчий О.В., Симута М.О. Технологія приладобудування: навчальний посібник для студентів напрямку підготовки 6.051003 «Приладобудування», 7.090902 «Наукові, аналітичні та екологічні прилади та системи» приладобудівного ф-ту. Київ: НТУУ «КПІ», 2010. 128 с.