

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ВЕТЕРИНАРНОЇ МЕДИЦИНИ
ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМЕНІ С.З. ГИЖИЦЬКОГО
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА МАШИНОБУДУВАННЯ**

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

другого (магістерського) рівня вищої освіти

**на тему: «Дослідження впливу тиску
плазмоутворювального газу на якість та стабільність
процесу плазмового різання металів»**

Виконав: студент групи Маш-62

Спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»
(шифр і назва)

Фішер Андрій Миколайович
(Прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., доц. Шеремета Р.Б.
(Прізвище та ініціали)

ДУБЛЯНИ-2025

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

Другий (магістерського) рівень вищої освіти
Спеціальність 133 «Галузеве машинобудування»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Завідувач кафедри _____
(підпис)

д.т.н., професор Віталій ВЛАСОВЕЦЬ
« ____ » _____ 202_ р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу здобувачу

Фішеру Андрію Миколайовичу

1. Тема роботи: **«Дослідження впливу тиску плазмо-
утворювального газу на якість та стабільність процесу
плазмового різання металів»**

Керівник роботи к.т.н., доц. Шеремета Роман Богданович

Затверджена наказом по університету від 28.02.2025 року № 140/К-с

2. Строк здачі студентом закінченої роботи 05.12.2025 року

3. Вихідні дані до роботи: *технічні характеристики плазмової різки з числовим програмним керуванням та обладнання необхідного для її роботи; літературні джерела які стосуються автоматизації технологічних процесів.*

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

1. Аналіз стану проблеми плазмового різання металів.

2. Методика експериментальних досліджень.

3. Результати експериментальних досліджень та їх аналіз.

4. Охорона праці та безпека виробництва.

Висновки.

Бібліографічний список

5. Перелік графічно-ілюстраційного матеріалу:

Ілюстративний матеріал у вигляді презентації обсягом 10-15 слайдів.

6. Консультанти з розділів:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1, 2, 3	Шеремета Р. Б., в.о. доц. каф. машинобудування		
4	Городецький І. М. доц. каф. фізики, інженерної механіки та безпеки виробництва		

7. Дата видачі завдання

03.03.2025 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту	Термін виконання етапів роботи	Відмітка про виконання
1	<i>Написання першого розділу</i>	<i>01.08.2025-20.08.2025</i>	
2	<i>Написання другого розділу</i>	<i>21.08.2025-20.09.2025</i>	
3.	<i>Написання третього розділу</i>	<i>21.09.2025-31.10.2025</i>	
4.	<i>Написання четвертого розділу</i>	<i>01.11.2025-21.11.2025</i>	
6.	<i>Завершення оформлення розрахунково-пояснювальної записки. Завершення роботи в цілому</i>	<i>22.11.2025-05.12.2025</i>	

Здобувач _____.(Андрій ФІШЕР)
(підпис)

Керівник роботи _____ (Роман ШЕРЕМЕТА)
(підпис)

УДК: 621.791.92

Кваліфікаційна робота: с. 65 текст. част., 18 рис., 7 табл., 19 джерел.

Дослідження впливу тиску плазмо-утворювального газу на якість та стабільність процесу плазмового різання металів. – Дубляни, Львівський НУВМБ, 2025.

У кваліфікаційній роботі проведено комплексний аналіз впливу тиску повітря (в діапазоні 4–7 атм) на якість різання сталі товщиною 2 мм та 5 мм.

Об'єкт дослідження – технологічний процес повітряно-плазмового різання листових металів.

Предмет дослідження – вплив тиску плазмоутворювального газу на показники якості (геометричну точність, конусність та наявність грату) та стабільність процесу різання конструкційних сталей.

Мета роботи – підвищення якості та точності плазмового різання шляхом встановлення закономірностей впливу тиску робочого газу на формування різку та розробки рекомендацій щодо оптимізації технологічних режимів для різних товщин металу.

ЗМІСТ

1.	АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ ПЛАЗМОВОГО РІЗАННЯ МЕТАЛІВ	9
1.1	Теоретичні основи плазмового різання металів	9
1.2	Технологічні параметри процесу плазмового різання.....	11
1.3	Плазмоутворювальні гази та їх вплив на процес різання.....	13
1.4	Показники якості процесу плазмового різання	15
1.5	Стабільність процесу плазмового різання	18
1.6	Обладнання для плазмового різання	19
2.	МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	21
2.1	Програма експериментальних досліджень	21
2.2	Характеристика досліджуваних матеріалів	22
2.3	Обладнання та оснащення для проведення експериментів.....	23
	Таблиця 2.4. Характеристики давача тиску.....	32
2.4	Вимірювальне обладнання та методи контролю	33
2.5	Діапазони варіювання технологічних параметрів.....	34
2.6	Методика проведення експериментів.....	37
2.7	Методика вимірювання показників якості.....	38
3.	РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ	41
3.1	Аналіз отвору пробивки та ширини різу	43
3.2	Вплив зміни тиску на розміри деталі.....	46
3.3	Визначення конусності та наявності ґрату	49
4.	ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ВИРОБНИЦТВА	51
4.1	Загальні вимоги безпеки	51
4.2	Небезпечні та шкідливі виробничі фактори при плазмовому різанні.....	52

4.3 Організаційні та технічні заходи безпеки	61
ВИСНОВКИ ПРОПОЗИЦІЇ	63
БІБЛОГРАФІЧНИЙ СПИСОК	65

ВСТУП

Плазмове різання металів — один із найпоширеніших і найефективніших способів термічної обробки матеріалів у сучасному машинобудуванні. Ця технологія знайшла широке застосування в автомобільній промисловості, кораблебудуванні, аерокосмічній галузі та в інших секторах машинобудування завдяки своїм унікальним можливостям. Плазмове різання дозволяє розрізати практично будь-які метали та їх сплави — від м'яких кольорових металів до твердих легованих сталей — з значно вищою швидкістю порівняно з традиційними способами газополум'яного різання.

Сучасні вимоги до якості виробів у машинобудуванні постійно зростають. Важливим аспектом є не лише геометрична точність деталей, але й якість поверхні різу, яка безпосередньо впливає на подальшу механічну обробку, точність зварних з'єднань та довговічність готового виробу. Однак достатньо часто на практиці спостерігаються проблеми, пов'язані з нестабільністю процесу плазмового різання, що призводить до варіативності якості отриманих кромek, утворення грату (окислів) та відхилень від номінальних розмірів.

Одним із ключових факторів, що впливає на якість та стабільність процесу плазмового різання, є тиск плазмоутворювального газу. Цей параметр безпосередньо впливає на температуру та швидкість плазмового струменя, ефективність видалення розплавленого металу з зони різання, знос витратних матеріалів (сопел, електродів), а також на стабільність горіння дуги. Незважаючи на практичну важливість цього питання, в науковій літературі недостатньо систематизованих даних про закономірності впливу тиску газу на комплекс показників якості різання, особливо щодо оптимізації режимів для забезпечення максимальної стабільності процесу.

Дослідження, проведене на кафедрі машинобудування, показало, що неоптимальні режими плазмового різання призводять до збільшення часу на обробку, скорочення терміну служби витратних матеріалів та погіршення якості виробів. Це вказує на необхідність глибшого розуміння механізмів

впливу тиску плазмоутворювального газу на окремі аспекти процесу та розроблення науково обґрунтованих рекомендацій для практичного застосування.

Незважаючи на широке застосування плазмового різання у промисловості, питання оптимізації тиску плазмоутворювального газу для забезпечення високої якості та стабільності процесу залишається недостатньо вивченим. Розроблення науково обґрунтованих рекомендацій щодо вибору оптимального тиску газу матиме практичне значення для машинобудівних підприємств та сприятиме підвищенню якості та конкурентоспроможності вітчизняної промислової продукції.

1. АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ ПЛАЗМОВОГО РІЗАННЯ МЕТАЛІВ

1.1 Теоретичні основи плазмового різання металів

Концепція плазми та плазмового різання. Плазма — четвертий стан речовини, який утворюється при нагріванні газу до дуже високих температур з одночасною його іонізацією. На відміну від твердих тіл, рідин та газів, плазма являє собою суміш вільних електронів, іонів та нейтральних атомів газу, які мають вищу кінетичну енергію. При такому стані матеріалу газ набуває унікальних електричних провідних властивостей та реагує на електромагнітні поля.

Плазмове різання металів — один із сучасних способів термічної обробки матеріалів, при якому як різальний інструмент використовується струмінь іонізованого газу з температурою 5000-30000 °С і швидкістю 500-1500 м/с. Основний принцип роботи полягає в наступному: між електродом (катодом) і соплом апарату (або між електродом і матеріалом) запалюється електрична дуга, у результаті якої газ, що подається через сопло, нагрівається до надзвичайно високих температур і іонізується, перетворюючись на плазму [8].

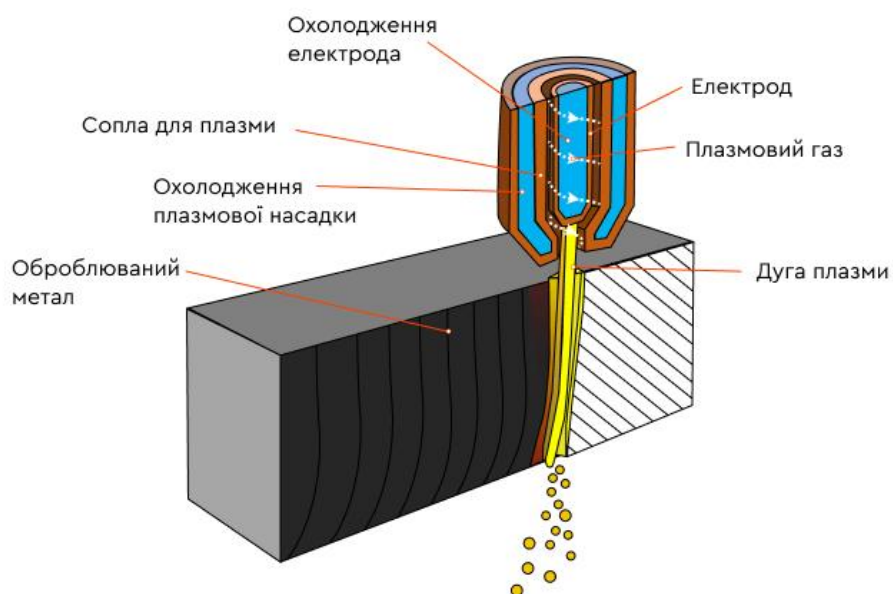


Рисунок 1.1 – Процес різки металу

Основні етапи процесу плазмового різання:

1. Запалювання дуги — між електродом та соплом (або матеріалом) створюється контакт, що приводить до виникнення початкової дуги за допомогою високовольтного імпульсу;
2. Нагрів та іонізація газу — газ, що подається через канал сопла, нагрівається дугою до температури 20000 °C та вище, при цьому відбувається іонізація молекул газу;
3. Формування плазмового струменя — іонізований газ під тиском видувається крізь вузьке сопло, формуючи високоенергійний, високошвидкісний плазмовий струмінь;
4. Проплавлення матеріалу — плазмовий струмінь дії плазмового струменя розплавляє метал в зоні різання;
5. Видалення розплаву — динамічний тиск плазмового потоку видаляє розплавлений метал з зони розрізу, утворюючи чистий розріз.

Плазмовий струмінь характеризується рядом унікальних фізичних параметрів, що визначають ефективність процесу різання:

Температура плазми: Середньомасова температура на зрізі сопла становить $(6-25) \times 10^3$ K (близько 6000-25000 °C) залежно від типу газу, сили струму та тиску газу. Ця надзвичайно висока температура забезпечує розплавлення практично будь-яких металів, включаючи жароміцні сплави та вольфрам.

Швидкість плазмового струменя: Становить 500-1500 м/с на виході з сопла, що еквівалентно швидкостям понад 2000 км/год. Така висока швидкість забезпечує інтенсивне видалення розплаву та точність різання.

Ентальпія: Плазмовий струмінь характеризується високою питомою ентальпією, що свідчить про високу енергетичну концентрацію і ефективність передачі тепла матеріалу.

Діаметр струменя: Типовий діаметр плазмового струменя становить 3-8 мм, що обумовлює вузьку зону термічного впливу порівняно з іншими способами термічної обробки.

Видалення металу при плазмовому різанні відбувається внаслідок комбінованого впливу декількох факторів [7, 9]:

1. Термічне плавлення — в результаті контакту з гарячим плазмовим струменем температура металу в зоні різання піднімається вище температури плавлення матеріалу;
2. Механічне видування — динамічний тиск плазмового потоку і газу видаляє розплавлений метал з зони різання, утворюючи щіль;
3. Випаровування — при дуже високих температурах деякі частини розплаву можуть випаровуватися, забезпечуючи додаткове видалення матеріалу;
4. Окислення — при використанні активних газів (повітря, кисень) відбувається хімічна реакція окислення розплавленого металу, що супроводжується виділенням додаткового тепла.

1.2 Технологічні параметри процесу плазмового різання

Якість та продуктивність процесу плазмового різання залежать від великої кількості технологічних параметрів, які можна класифікувати на декілька груп.

Параметри джерела енергії:

Сила струму (I) — один з найбільш важливих параметрів, що впливає на температуру плазми та її енергію. Більш висока сила струму приводить до підвищення температури плазми та, відповідно, вищої швидкості різання. Типові діапазони сили струму: 20-400 А залежно від типу плазмореza і товщини матеріалу.

Напруга дуги (U) — визначає потужність процесу та впливає на стабільність горіння дуги. При збільшенні напруги дуги підвищується енергія плазмового струменя.

Полярність струму — залежно від типу дуги (пряма чи непряма дія) використовується постійний струм прямої полярності або змінний струм. Постійний струм забезпечує більшу стабільність процесу.

Параметри плазмоутворювального газу. Тип газу — один із ключових параметрів, визначає характеристики плазмового струменя та якість різання. Розрізняють активні та неактивні гази.

Тиск газу (P) — визначає режим витікання газу з сопла та впливає на температуру і швидкість плазмового струменя. Типовий діапазон тиску: 5-8 атмосфер (0,5-0,8 МПа) для повітряно-плазмового різання. Збільшення тиску може як покращити, так і погіршити якість різання залежно від комбінації з іншими параметрами.

Витрата газу (G) — пов'язана з тиском, визначає обсяг газу, що проходить крізь сопло за одиницю часу. Вимірюється в л/хв або м³/год. Оптимальна витрата газу забезпечує найкращий баланс між якістю різання та енергетичною ефективністю.

Геометричні параметри апарату:

Діаметр сопла (d) — впливає на концентрацію плазми та діаметр струменя. Типові значення: 2-5 мм. Менші діаметри забезпечують більшу концентрацію енергії, але можуть призвести до швидшого зносу сопла.

Довжина каналу сопла (l) — впливає на профіль плазмового струменя та його стабільність.

Відстань від сопла до матеріалу (h) — називається висотою дуги або довжиною дуги. Оптимальна висота дуги для більшості систем становить 5-8 мм. При збільшенні цієї відстані погіршується якість різання.

Параметри процесу різання:

Швидкість різання (v) — швидкість переміщення сопла вздовж лінії розрізу, вимірюється в мм/хв або м/хв. Залежить від товщини матеріалу, типу газу та сили струму. Оптимальна швидкість забезпечує мінімальну шорсткість поверхні та максимальну продуктивність.

Товщина матеріалу (s) — визначає режим різання. Економічно доцільна товщина: до 50 мм для сталі, до 90 мм для чавуну, 100-120 мм для кольорових металів.

Кут нахилу сопла — для отримання перпендикулярного різку сопло повинно бути розташоване під кутом 90° до поверхні матеріалу.

1.3 Плазмоутворювальні гази та їх вплив на процес різання

Тип плазмоутворювального газу є одним із найважливіших факторів, що визначає характеристики та якість плазмового різання. Гази поділяються на дві основні категорії: активні та неактивні (інертні).

Активні гази — це повітря і кисень. Повітря — найдешевший та найпоширеніший плазмоутворювальний газ. Складається з азоту (78%) та кисню (21%). Повітря активно використовується для різання чорних металів (звичайної сталі).

Характеристики:

- Середня вартість газу та його подачі
- Задовільна якість різання для чорнових операцій
- Швидкість різання чорних металів середня
- Підходить для ручного та машинного різання
- Утворює певну кількість грату на нижній стороні деталі

Кисень (O_2) — використовується як допоміжний газ або як основний плазмоутворювальний газ для чистового різання сталі. При окисненні розплаву кисень вивільняє додаткове тепло, що дозволяє збільшити швидкість різання.

Характеристики:

- Вища вартість порівняно з повітрям
- Найкраща якість різання для сталей
- Мінімальна кількість грату
- Перпендикулярність різку краща, ніж при повітрі
- Підходить для професійних операцій та виготовлення критичних деталей

До неактивних (інертних) газів відносять азот і аргон.

Азот (N_2) — часто використовується для різання нержавіючих сталей та алюмінію. На відміну від кисню, азот не вступає в хімічну реакцію з розплавленим металом.

Характеристики:

- Висока вартість
- Хороша якість різання для кольорових металів
- Не утворює окисних шарів на поверхні різу
- Забезпечує гарну чистоту зрізу

Аргон (Ar) — інертний газ, використовується переважно для плазмового зварювання та напилення, рідше — для різання.

Характеристики:

- Найвища вартість серед інертних газів
- Ідеально підходить для розпалювання дуги
- Забезпечує дуже чисту роботу

В таблиці 1.1 відображено вплив типу плазмоутворювального газу на параметри якості різу.

Таблиця 1.1. Вплив типу газу на параметри якості

Параметр якості	Повітря	Кисень	Азот	Аргон
Швидкість різання	Середня	Висока	Висока	Низька
Шорсткість поверхні	Середня	Хороша	Хороша	Хороша
Грат (шлак)	Більший	Мінімальний	Мінімальний	Мінімальний
Вартість	Низька	Середня	Висока	Дуже висока
Матеріали	Чорні метали	Чорні метали	Нержавійка, кольорові	Спеціальні
Стабільність процесу	Добра	Дуже добра	Дуже добра	Найкраща

У професійних системах часто використовуються суміші газів для досягнення оптимального поєднання якості та продуктивності:

- Повітря + кисень — для різання сталей
- Азот + кисень — для універсального різання
- Аргон + азот — для різання спеціальних сплавів

Використання суміші газів дозволяє:

- Покращити якість різку порівняно з одним газом
- Забезпечити більш стабільне горіння дуги
- Розширити діапазон матеріалів, що можуть бути оброблені
- Оптимізувати швидкість різних операцій

1.4 Показники якості процесу плазмового різання

Якість продукції, отриманої при плазмовому різанні, оцінюється за низкою показників, які включають геометричні характеристики, якість поверхні та точність розмірів.

Шорсткість поверхні різку (R_a , R_z) — один із найбільш важливих показників якості, що впливає на подальшу механічну обробку та якість зварних з'єднань. При плазмовому різанні поверхня розрізу характеризується наявністю хвилястостей та мікронерівностей, утворених в результаті імпульсивного видалення розплаву [10-12].

Типові значення шорсткості R_a (в мікрометрах):

- Клас 1 (найвища якість): $R_a = 3,2-6,3$ мкм
- Клас 2 (висока якість): $R_a = 6,3-12,5$ мкм
- Клас 3 (середня якість): $R_a = 12,5-25$ мкм
- Клас 4 (чорнова обробка): $R_a > 25$ мкм

Шорсткість залежить від швидкості різання, сили струму, типу та тиску газу, висоти дуги та матеріалу та його товщини.

Перпендикулярність різку — характеризує дотримання прямого кута між площиною різку та верхньою поверхнею матеріалу. Невідповідність перпендикулярності призводить до конусності різку.

Норми перпендикулярності (за стандартами):

- Клас 1: $\pm 1^\circ$ (для тонких листів) до $\pm 1,5^\circ$ (для товстих)

- Клас 2: $\pm 2^\circ$
- Клас 3: $\pm 3^\circ$ та більше

Перпендикулярність погіршується при:

- Неоптимальній швидкості різання
- Недостатньому тиску газу
- Неправильному встановленні висоти дуги
- Зносі витратних матеріалів (сопла, електрода)

Утворення грату (окислів, шлаку) — це окислені залишки розплаву, що утворюються на нижній стороні деталі після різання. Утворення грату є однією з найбільш часто зустрічаємих проблем при плазмовому різанні.

Механізм утворення грату – при недостатньому динамічному тиску газу розплав не повністю видаляється з нижньої частини щілини, розплав охолоджується та затвердіває на краї деталі. Утворюється твердий адгезійний шар, що важко видаляється.

Фактори, що впливають на утворення грату:

- Тиск газу (недостатній тиск — причина утворення грату)
- Швидкість різання (занадто висока швидкість — збільшує грат)
- Висота дуги (неправильна висота — збільшує грат)
- Якість та чистота газу (забруднення газу)
- Знос витратних матеріалів

Методи зменшення утворення грату:

- Оптимізація тиску плазмоутворювального газу
- Правильний вибір швидкості різання
- Регулярна заміна витратних матеріалів
- Контроль висоти дуги за допомогою автоматичних систем
- Використання кисню як допоміжного газу для сталей

Точність розмірів — основний показник, що визначає можливість використання деталі без додаткової обробки. При плазмовому різанні можна досягти точності до $\pm 0,2-0,5$ мм для сталевих листів при оптимальних параметрах.

До основних джерел похибок розмірів при плазмовому різанні належить ширина різу, яка безпосередньо залежить від діаметра плазмового струменя і зазвичай становить 3–5 мм. Саме цей параметр визначає фактичне відхилення контуру деталі від заданих геометричних розмірів.

Ще одним важливим фактором є конусність різу, яка проявляється у вигляді різниці ширини пропилу у верхній та нижній частинах кромки. Це призводить до відхилення форми деталі від ідеально вертикальної та може впливати на точність з'єднання елементів у подальших операціях.

Окрему групу похибок становлять термічні деформації матеріалу, що виникають у процесі охолодження після різання. Нерівномірний розподіл температур і швидке охолодження викликають внутрішні напруження, які можуть призводити до викривлення заготовки та зміни її геометричних розмірів.

Зона термічного впливу (ЗТВ) — область матеріалу поблизу від лінії різу, структура якої змінилася в результаті нагрівання.

Глибина ЗТВ — зазвичай 0,5-2,0 мм залежно від параметрів процесу. Мікроструктура — може включати загартовану структуру, сегрегацію вуглецю, окислення поверхні

Вплив ЗТВ на властивості матеріалу:

- Збільшення твердості в ЗТВ (можна потребувати термообробки для деяких матеріалів)
- Зниження пластичності
- Можливість утворення тріщин при пакетному охолодженні
- Зниження корозійної стійкості при різанні нержавіючих сталей

Ширина різу — визначається діаметром плазмового струменя та геометрією сопла. Звичайно становить 3-8 мм.

Значення ширини різу впливає на точність розмірів (чим вже різ, тим вища точність) та на кількість відходів при розкрою. Ширина пов'язана з витратами на матеріал і залежить від тиску та типу газу

1.5 Стабільність процесу плазмового різання

Стабільність процесу — це здатність процесу плазмового різання зберігати стійкі параметри при повторних операціях та забезпечувати послідовно високу якість продукції. Вона є ключовою характеристикою ефективності технології та визначає надійність отриманих результатів [13-14].

Стабільність горіння дуги залежить від низки чинників, серед яких важливе значення мають якість джерела живлення, чистота та сухість газу, стабільність тиску газу, якість контакту між електродом та оброблюваним матеріалом, а також умови охолодження елементів пальника. Порушення будь-якого з цих факторів негативно впливає на рівномірність процесу різання.

Варіативність технологічних параметрів проявляється у коливаннях тиску газу, сили струму та швидкості переміщення різача, що, своєю чергою, призводить до нестабільності показників якості різання. Такі зміни ускладнюють забезпечення повторюваності результатів і знижують загальну ефективність процесу.

Знос витратних матеріалів з часом спричиняє деградацію робочих характеристик пальника. Сопло, електрод та інші елементи поступово втрачають свої початкові властивості, що призводить до зміни геометрії каналу сопла, підвищення опору гарячим газам, деформації профілю плазмового струменя, погіршення якості різання та зниження стабільності процесу.



Рисунок 1.2. – Зображення зношених сопла і електрода

Забруднення газу у вигляді вологи, пилу та масляних парів також негативно впливає на процес плазмового різання. Це може спричиняти нестабільне горіння дуги, утворення грату, передчасний знос витратних матеріалів і коливання якості різання.

Оцінка стабільності процесу здійснюється за рядом критеріїв, серед яких застосовуються коефіцієнт варіації показників якості, що характеризує розсіювання результатів при повторних вимірюваннях, середньоквадратичне відхилення від номінального значення параметра, а також повторюваність розмірів при послідовних операціях різання.

1.6 Обладнання для плазмового різання

Класифікація плазморізів здійснюється за кількома основними ознаками, що відображають особливості їх конструкції та способу експлуатації. За способом управління розрізняють ручні плазморізи, які керуються оператором безпосередньо під час різання, машинні плазморізи, встановлені на верстатах і механізованих установках, а також плазморізи з ЧПУ, робота яких здійснюється під керуванням комп'ютерної системи числового програмного керування [1-2].

За типом джерела живлення плазморізи поділяються на трансформаторні та інверторні. Трансформаторні апарати є традиційними, мають великі габарити та застосовуються переважно для різання товстих матеріалів товщиною до 80 мм. Інверторні моделі є сучаснішими, компактнішими та енергоефективнішими, вони розраховані на роботу з листовим металом товщиною до 30 мм.

За типом охолодження розрізняють плазморізи з повітряним та водяним охолодженням. Системи з повітряним охолодженням є простішими та дешевшими, проте менш надійними при тривалій безперервній роботі. Водяне охолодження забезпечує ефективніше розсіяння тепла, дозволяє працювати на вищих струмах і підвищує ресурс основних елементів обладнання.

До основних компонентів плазморіза належить джерело живлення, яке забезпечує постійний струм необхідної величини. Його номінальна напруга зазвичай становить 200–600 В, діапазон струму — 20–400 А, а характеристика навантаження сприяє стабільному горінню дуги. Головною робочою частиною апарата є плазмотрон (пальник), який містить вольфрамовий електрод, мідне або вольфрамове сопло, систему охолодження та газорозподільчу систему.

Система подачі газу забезпечує стабільну подачу газу під контрольованим тиском і включає газовий редуктор з манометром, фільтр для очищення газу, регулятор витрати та вологовідокремлювач. Система керування відповідає за регулювання параметрів процесу різання: у простих моделях це здійснюється вручну, тоді як у сучасних системах застосовується автоматичне управління, включаючи адаптивний контроль висоти дуги.

Сучасні технології плазмового різання передбачають використання різних методів захисту та підвищення якості різу. Плазмове різання із захисним газом використовує два газові потоки — основний плазмоутворювальний і захисний, який оточує струмінь та запобігає окисненню зони різання. При плазмовому різанні з водяним захистом замість додаткового газу застосовується вода, що одночасно охолоджує сопло та захищає область різання.

Окрему групу становить прецизійне плазмове різання, яке виконується на низьких струмах до 30 А та використовується для отримання особливо чистих і точних розрізів на тонких матеріалах. Системи з ЧПК, окрім високої точності, забезпечують програмне керування траєкторією різання, автоматичне регулювання висоти дуги, оптимізацію швидкості залежно від товщини матеріалу та можливість створення складних контурів, що значно розширює технологічні можливості плазмового різання.

2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Програма експериментальних досліджень

Експериментальна частина дипломної роботи спрямована на встановлення детальних закономірностей впливу тиску плазмоутворювального газу на показники якості та стабільності процесу плазмового різання металів. Програма досліджень розроблена з урахуванням поставлених завдань та методологічних вимог до проведення наукових експериментальних робіт, а також технічних можливостей наявного обладнання.

Основною метою експериментальних досліджень є отримання кількісних даних щодо впливу тиску плазмоутворювального газу на такі показники якості: шорсткість поверхні різу, перпендикулярність розрізу, утворення ґрату, точність розмірів та ширину зони термічного впливу. Крім того, планується дослідити вплив нестабільності тиску газу на повторюваність результатів та виявити допустимі діапазони коливання цього параметра для забезпечення надійної роботи процесу при різанні тонколистового матеріалу.

Програма експериментів складається з трьох основних етапів: підготовчого етапу, основних експериментальних досліджень та порівняльних випробувань. На підготовчому етапі проводиться налаштування обладнання, перевірка калібрування вимірювальних приладів та опробування методик контролю показників якості. Особлива увага приділяється налаштуванню системи подачі газу та перевірці стабільності тиску, оскільки навіть невеликі коливання цього параметра можуть суттєво впливати на якість різання тонколистового металу. На основному етапі здійснюються систематичні експерименти з варіюванням тиску газу в встановленому діапазоні при різних значеннях сили струму. На етапі порівняльних випробувань перевіряється повторюваність результатів та здійснюється статистична обробка експериментальних даних.

Експерименти планується проводити для двох різних товщин матеріалу (2 і 5 мм) з урахуванням варіювання тиску газу в діапазоні 4-7 атмосфер при двох значеннях сили струму (37, 45 А). Такий підхід дозволить отримати набір

даних для побудови залежностей, а також виявити оптимальні режими різання для кожної товщини матеріалу.

2.2 Характеристика досліджуваних матеріалів

Експериментальні дослідження проводяться на листовому матеріалі трьох стандартних товщин, які охоплюють діапазон тонколистового прокату та є найбільш поширеними у виробництві:

Матеріал товщиною $s = 2$ мм є найтоншим у діапазоні досліджуваних товщин та широко використовується для виготовлення кузовних деталей легкових автомобілів, облицювальних панелей, корпусів електронних приладів, декоративних елементів та інших виробів, де важливим є мінімальна маса конструкції. Різання дуже тонких листів висуває особливо високі вимоги до якості розрізу та точності налаштування параметрів процесу. При недостатньому або надмірному тиску газу можливе прорізання з відхиленням траєкторії, утворення значної кількості ґрату або деформація листа внаслідок термічного впливу. Саме тому дослідження впливу тиску газу на якість різання листів товщиною 2 мм має велике практичне значення для виробництва прецизійних деталей.

Матеріал товщиною $s = 5$ мм знаходиться на верхній межі діапазону тонколистового прокату та використовується для виготовлення більш навантажених конструкцій: елементів рам автомобілів та спецтехніки, підсилювальних елементів, днищ резервуарів, складських стелажів та інших виробів, які повинні витримувати значні механічні навантаження. Різання листів товщиною 5 мм потребує більшої енергії та ефективнішого видалення розплавленого металу з зони різання порівняно з тоншими матеріалами. При цій товщині вплив тиску газу на якість різання може бути найбільш виразним, оскільки для повного проплавлення та видалення розплаву необхідний достатній динамічний тиск плазмового струменя. Недостатній тиск газу може призвести до неповного проплавлення нижньої частини листа та утворення

значної кількості грату, тоді як надмірний тиск може викликати хвилястість країв розрізу та збільшення ширини різу.

Для проведення експериментів використовуються пластини розмірами приблизно 250×250 мм для кожної товщини. Такі розміри обрані з урахуванням необхідності виконання декількох паралельних розрізів на одному зразку при забезпеченні достатньої відстані між розрізами (не менше 10 мм) для запобігання взаємного термічного впливу. Перед розрізанням поверхня листового матеріалу ретельно очищається від окалини, іржі та забруднень за допомогою металевої щітки або шліфувальної машинки з абразивним кругом. Після механічної очистки поверхня обезжирюється розчинником (ацетон або уайт-спірит) для видалення залишків мастильних матеріалів та інших органічних забруднень. Така ретельна підготовка необхідна для забезпечення стабільного процесу різання та отримання коректних результатів вимірювань, оскільки забруднення поверхні може призводити до нестабільного запалювання дуги та утворення додаткових дефектів на поверхні різу.

2.3 Обладнання та оснащення для проведення експериментів

Експериментальні дослідження проводяться на повітряно-плазмовому різачу з джерелом живлення EX-TRAFIRE 55SD у комплексі з портативною системою EX-TRACK з числовим програмним керуванням. Цей комплекс обладнання представляє собою сучасну інверторну систему плазмового різання, спеціально розроблену для високоякісного різання тонколистового та середньотовстого металу з можливістю автоматизації процесу та програмування складних траєкторій розрізу [4-6].



Рисунок 2.1 – Портативна система для різання металу EX-TRACK з ЧПК

Джерело живлення EX-TRAFIRE 55SD — основні технічні характеристики:

Джерело живлення EX-TRAFIRE 55SD є інверторним апаратом постійного струму, призначеним для повітряно-плазмового різання металів товщиною до 15 мм. Апарат використовує сучасну технологію IGBT-інверторів, що забезпечує високу стабільність струму дуги, швидкодію регулювання та низькі пульсації вихідного струму. Характеристики наведені в таблиці 2.1.

THERMACUT®



Рисунок 2.2 – Джерело живлення EX-TRAFIRE 55SD

Джерело живлення обладнане цифровою панеллю управління з світлодіодним або рідкокристалічним дисплеєм, на якому відображаються поточні значення встановленої та фактичної сили струму, напруги дуги, тиску газу (при наявності відповідного датчика), часу роботи та коди можливих помилок. Регулювання сили струму здійснюється за допомогою поворотного енкадера або кнопок на передній панелі з кроком 1 А, що забезпечує достатню точність налаштування для проведення експериментальних досліджень.

Апарат оснащений багаторівневою системою захисту: термозахистом з автоматичним вимкненням при перегріві силових елементів, захистом від перевантаження по струму, захистом від перенапруги та пониженої напруги в мережі живлення, захистом від короткого замикання на виході. При спрацюванні будь-якого з захистів на дисплеї відображається відповідне повідомлення, а робота апарату блокується до усунення причини. Така система захисту забезпечує високу надійність роботи обладнання та запобігає його пошкодженню при нештатних ситуаціях.

Інверторна технологія, реалізована в EX-TRAFIRE 55SD, забезпечує ряд переваг порівняно з традиційними трансформаторними джерелами живлення: значно менші габарити та масу (майже в 3-4 рази), вищий ККД (близько 85-90% проти 60-70% у трансформаторних), кращу стабільність параметрів дуги, швидший відгук на зміну умов горіння дуги, можливість точного цифрового регулювання параметрів, характеристики подані в таблиці 2.1. Низький рівень пульсацій вихідного струму (менше 5%) особливо важливий для забезпечення стабільності плазмового струменя та високої якості різання тонколистових матеріалів.

Джерело живлення з'єднується з пальником та масовим затиском за допомогою кабель-шлангового пакету довжиною 6 метрів, який включає силовий кабель для проходження струму до електрода пальника, шланг для подачі стисненого повітря та контрольні провідники для передачі сигналів керування. Кабель-шланговий пакет має гнучку конструкцію та надійну ізоляцію, розраховану на робочу напругу до 400 В.

Таблиця 2.1. Характеристики Джерела живлення EX-TRAFIRE 55SD

Параметр	Значення
Максимальна сила струму	55 А з можливістю плавного регулювання від 20 до 55 А
Робочий діапазон сили струму для експериментів	30–55 А
Напруга живлення	220 В, 50 Гц
Споживана потужність	Не більше 7,5 кВт
Вихідна напруга дуги	100–200 В залежно від сили струму та довжини дуги
Вихідна напруга холостого ходу	280–320 В (для надійного запалювання дуги)
Тип вихідного струму	Постійний, з пульсаціями не більше 3–5%
Діапазон тиску плазмоутворювального газу	0,4–0,9 МПа (4–9 атмосфер)
Максимальна рекомендована товщина різання сталі	12–15 мм
Рекомендована товщина для якісного різання	До 8 мм
Тип охолодження	Примусове повітряне з внутрішнім вентилятором та термозахистом
Режим роботи (ПВ)	60% при 55 А, 80% при 45 А, 100% при 35А
Маса джерела живлення	Близько 18 кг
Габаритні розміри	Приблизно 450 × 200 × 350 мм
Клас захисту корпусу	IP21S (захист від твердих предметів >12 мм та вертикальних крапель води)
Тип запалювання дуги	Безконтактне високочастотне (HF), 3–5 кВ
Система управління	Цифрова з мікропроцесорним контролером та цифровою індикацією параметрів

Портативна система EX-TRACK з ЧПК являє собою портативний верстат для автоматизованого плазмового різання з числовим програмним керуванням. Система складається з механічної частини (напрямні, каретка з пальником, привідні двигуни) та блоку керування з контролером ЧПК, таблиця 2.2.

Таблиця 2.2. Конструктивні особливості системи EX-TRACK

Параметр	Значення
Тип системи	Портативна двокоординатна система переміщення пальника (осі X та Y)
Довжина робочої зони по осі X	1500–2000 мм (залежно від модифікації)
Ширина робочої зони по осі Y	До 1000 мм
Максимальна швидкість переміщення	3000 мм/хв (50 мм/с або 3 м/хв) для обох осей
Точність позиціювання	$\pm 0,3\text{--}0,5$ мм
Повторюваність позиціювання	$\pm 0,2$ мм
Тип приводу	Крокові двигуни або серводвигуни з редукторами
Тип передачі	Зубчастий ремінь або рейка-шестерня
Система напрямних	Лінійні напрямні на циліндричних валах або профільованих рейках
Маса каретки з пальником	Близько 5–8 кг
Загальна маса системи EX-TRACK	Близько 30–40 кг
Регулювання висоти пальника	Ручне або автоматичне (система THC — Torch Height Control)

Система управління ЧПК оснащується спеціалізованим контролером для плазмового різання на базі процесора ARM або x86 та забезпечує керування двома координатними осями X і Y з можливістю підключення додаткової осі Z для регулювання висоти пальника. Вона підтримує роботу з файлами у форматах G-код, DXF (із попередньою конвертацією) та PLT, а введення даних здійснюється через USB-порт, SD-карту або інтерфейс Ethernet залежно від модифікації обладнання. Для взаємодії з оператором використовується кольоровий сенсорний дисплей діагоналю 7–10 дюймів. Система дозволяє як ручне введення простих контурів, так і завантаження готових програм з файлів, забезпечуючи при цьому автоматичне регулювання висоти пальника (THC),

компенсацію ширини різку, корекцію обробки кутів, а також функції плавного розгону і гальмування для підвищення точності та якості різання.

Система EX-TRACK встановлюється безпосередньо на робочому столі або на спеціальній рамній конструкції над заготовкою. Напрямні системи вирівнюються за рівнем та закріплюються у стабільному положенні. Пальник закріплюється на каретці за допомогою спеціального кронштейну, який дозволяє регулювати висоту пальника над матеріалом з точністю до 0,5 мм. При наявності системи автоматичного регулювання висоти (THC) на пальнику встановлюється ємнісний або індуктивний датчик, який відслідковує відстань до матеріалу та підтримує її на постійному рівні під час різання.

Основні переваги використання системи EX-TRACK з ЧПК для проведення експериментальних досліджень:

Висока повторюваність результатів — автоматизована система забезпечує однакові умови для всіх експериментів: однакову траєкторію, швидкість переміщення, довжину розрізу. Це критично важливо для коректного порівняння результатів при різних значеннях тиску газу.

Можливість програмування складних траєкторій — за допомогою системи ЧПК можна створити програму для виконання декількох паралельних розрізів на одній заготовці з точним дотриманням відстаней між ними. Це дозволяє оптимізувати використання матеріалу та скоротити час на підготовку експериментів.

Стабільна швидкість різання — на відміну від ручного різання, де швидкість може коливатися в залежності від рухів оператора, система ЧПК підтримує задану швидкість з точністю до 1-2% протягом усього розрізу (за винятком ділянок розгону на початку та гальмування в кінці).

Можливість автоматичного регулювання висоти — при наявності системи THC висота пальника над матеріалом підтримується постійною навіть при нерівності поверхні листа або його термічній деформації під час різання. Це забезпечує стабільність процесу та однакову якість різку по всій довжині.

Зменшення впливу людського фактора — автоматизація процесу практично виключає вплив кваліфікації оператора на результати експериментів, що підвищує об'єктивність досліджень.

Для забезпечення стабільної подачі стисненого повітря (плазмоутворювального газу) використовується поршневий компресор B5900/200CT5,5 італійського виробництва, рис. 2.3. Це професійний компресор, розрахований на тривалу безперервну роботу в промислових умовах [3].



Рисунок 2.3. – Поршневий компресор B5900/200CT5,5

Компресор обладнаний автоматичною системою управління, яка підтримує тиск у ресивері в заданому діапазоні (зазвичай від 8 до 10 атмосфер). При досягненні верхньої межі тиску спрацьовує пресостат, який вимикає електродвигун або переводить компресор у режим холостого ходу (залежно від конструкції). При падінні тиску нижче заданого рівня компресор автоматично вмикається і починає нагнітати повітря до ресивера. Така система забезпечує стабільну подачу повітря до плазмореza навіть при змінній витраті газу.

Таблиця 2.3. Технічні характеристики компресора B5900/200CT5,5:

Параметр	Значення
Тип компресора	Поршневий двоциліндровий з V-подібним розташуванням циліндрів
Привід	Від асинхронного електродвигуна через клиноремінну передачу
Потужність електродвигуна	5,5 кВт (7,5 к.с.)
Напруга живлення	380 В, трифазна мережа змінного струму
Продуктивність (за впуском)	Близько 900 л/хв
Продуктивність (реальна на виході)	Близько 700–750 л/хв при тиску 8 атм
Максимальний робочий тиск	10 атмосфер (1,0 МПа)
Об'єм ресивера	200 л
Матеріал ресивера	Сталь з антикорозійним покриттям, розрахований на тиск до 15 атм
Система змащування	Масляна (циркуляційна система з масляним насосом)
Тип охолодження	Повітряне, з оребреними циліндрами та головкою
Рівень шуму	Близько 75–80 дБ(А) на відстані 1 м
Маса компресора з ресивером	Близько 150–180 кг
Габаритні розміри	Приблизно 1200 × 600 × 1100 мм

Ресивер виконує кілька важливих функцій: акумулювання запасу стисненого повітря для згладжування пульсацій, що виникають при роботі поршневого компресора; охолодження повітря, що сприяє конденсації вологи; відокремлення конденсату та механічних домішок, які осідають на дні ресивера. На ресивері встановлені: манометр для контролю тиску, запобіжний клапан, налаштований на тиск 12 атмосфер для безпеки, дренажний кран для зливу конденсату.

Продуктивності компресора (653 л/хв при робочому тиску) більш ніж достатньо для живлення плазморіза EX-TRAFIRE 55SD, який споживає близько 150-250 л/хв залежно від режиму різання. Такий запас по продуктивності забезпечує стабільність тиску навіть при тривалій безперервній роботі та

дозволяє використовувати компресор для живлення додаткових пневматичних інструментів у майстерні.

Система підготовки повітря:

Між компресором та плазморізом встановлена система підготовки повітря, яка включає:

Магістральний фільтр-вологівідокремлювач з автоматичним зливом конденсату, рис. 2.4. Фільтр встановлюється безпосередньо після ресивера і виконує первинне очищення повітря від крупних частинок води та масла. Принцип роботи заснований на зниженні швидкості потоку повітря у розширеній камері, внаслідок чого краплі конденсату осідають під дією гравітації. Ефективність відокремлення води — не менше 95%.

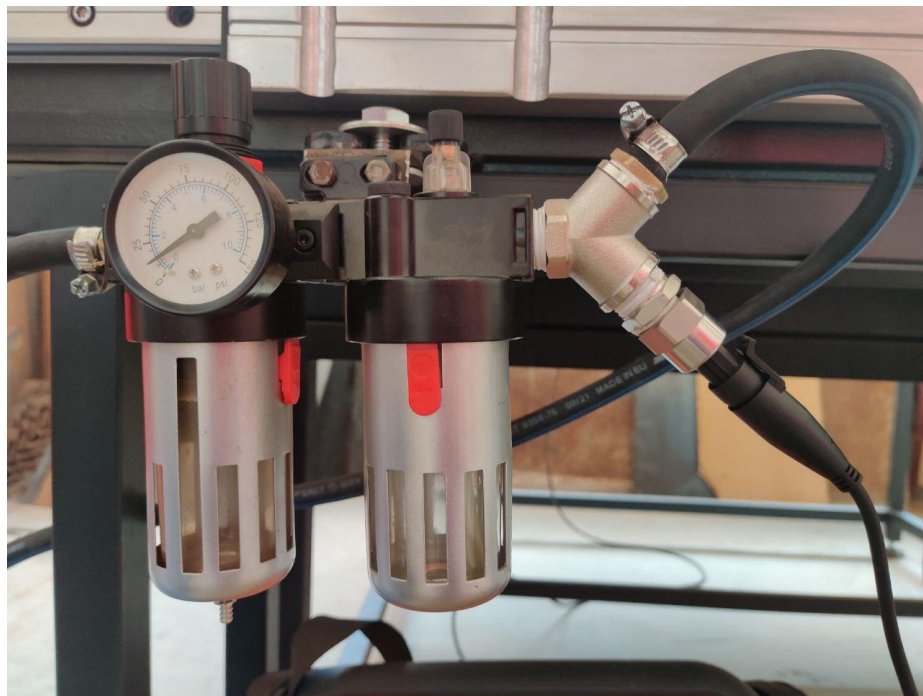


Рисунок 2.4 – Змонтований давач тиску на виході з вологовідокремлювача

Якість стисненого повітря, яке подається до плазморіза, повинна відповідати наступним вимогам:

- Максимальний вміст часток розміром $> 5 \text{ мкм}$: не більше 5 мг/м^3
- Максимальний вміст масла: не більше $0,1 \text{ мг/м}^3$ (клас чистоти 3 за ISO 8573-1)
- Точка роси під тиском: не вище -20°C

- Відсутність вільної води у газовій фазі

Дотримання цих вимог важливе для забезпечення стабільності горіння плазмової дуги, мінімізації утворення грату, продовження терміну служби витратних матеріалів та отримання високої якості різання.

Після системи підготовки повітря встановлюється редуктор тиску з манометром. Редуктор обраний з діапазоном регулювання 0-10 атмосфер. Регулювання здійснюється за допомогою поворотного гвинта з блокуванням встановленого положення.

Паралельно з виходом з вологовідокремлювача під'єднаний електронний давач тиску який дозволить точно вимірювати тиск повітря в системі різки металу.

Давач тиску може використовуватись для масла, палива, повітря і води, максимальний тиск – 150psi (Рис.2.5). Основні характеристики наведені в таблиці.

Таблиця 2.4. Характеристики давача тиску

Параметр	Значення
Вхідний діапазон	0–150 PSI ($\approx$ 10 бар)
Вихідний сигнал	0.5–4.5 В (лінійний): 0 PSI $\rightarrow$ 0.5 В 75 PSI $\rightarrow$ 2.5 В 150 PSI $\rightarrow$ 4.5 В
Точність	$\pm 0.5\%$ FS
Різьблення	1/8" NPT
Здатність до перевантаження	2–4 $\times$ номінального тиску
Робоча температура	-40 °C $\sim$ +120 °C
Клас захисту	IP67
Середовище тиску	Масло, газ, вода (сумісні з нерж. сталлю 316L)
Час відгуку	≤ 1 мс



Рисунок 2.5 – Давач тиску

Таким чином з допомогою плати Arduino Uno можна зчитати дані з давача тиску про зміну тиску в процесі різку для подальшого аналізу.

2.4 Вимірювальне обладнання та методи контролю

Перпендикулярність різку (або прямокутність різку) характеризує відхилення реальної поверхні різку від ідеальної площини, перпендикулярної до поверхні листа. Недостатня перпендикулярність (конусність різку) є одним із типових дефектів плазмового різання, який призводить до неточності розмірів деталі та проблем при подальшому складанні та зварюванні. Конусність різку виникає внаслідок відхилення плазмового струменя від вертикального напрямку під дією аеродинамічних сил, магнітних полів або нерівномірного розподілу енергії в струмені.

Для контролю перпендикулярності використовується кутомірний інструмент — універсальний кутомір або спеціалізований шаблон для контролю кута. Універсальний кутомір складається з основи, рухомої лінійки та шкали.

Методика вимірювання перпендикулярності полягає в наступному: основа кутоміра притискається до верхньої площини листа, а рухома лінійка прикладається до поверхні різку. Кут між лінійкою та вертикальним напрямком (90° до площини листа) показує величину відхилення від перпендикулярності.

Позитивне відхилення означає розширення різку донизу (прямий конус), негативне — звуження різку донизу (зворотний конус). Для плазмового різання найбільш типовим є прямий конус з відхиленням $1-3^\circ$ при неоптимальних режимах.

Вимірювання перпендикулярності проводяться у трьох місцях вздовж кожного розрізу: на початку (на відстані 20-30 мм від початку різку, де процес вже стабілізувався), в середині (на половині довжини розрізу) та в кінці (на відстані 20-30 мм від кінця різку). Така схема вимірювань дозволяє виявити зміну перпендикулярності вздовж розрізу, яка може виникати внаслідок нагрівання пальника, зносу витратних матеріалів або зміни умов видалення розплаву. На кожному місці вимірювання проводяться два виміри: з лицьового боку та з зворотного боку розрізу, після чого обчислюється середнє значення для компенсації можливого нахилу кутоміра.

Крім інструментального вимірювання, перпендикулярність контролюється візуально шляхом огляду поверхні різку при боковому освітленні. Досвідчений оператор може визначити наявність конусності за характерною зміною ширини щілини від верху до низу та за наявністю смуг, що відхиляються від вертикального напрямку.

2.5 Діапазони варіювання технологічних параметрів

Тиск плазмоутворювального газу є основним досліджуваним параметром у даній роботі. Вибір діапазону варіювання тиску здійснено на основі аналізу технічних характеристик обладнання, рекомендацій виробника, літературних даних та попередніх експериментів. Для плазмового різання тонколистового металу типовий робочий тиск повітря становить 4-7 атмосфер.

Нижня межа діапазону (4 атмосфери або 0,4 МПа) обрана як мінімальний тиск, при якому ще можливе стабільне горіння дуги та формування плазмового струменя достатньої інтенсивності для різання матеріалу товщиною 2-5 мм. При тиску нижче 4 атмосфер спостерігається нестабільне горіння дуги, погана

якість різку з великою кількістю грату та можливі випадки згасання дуги під час різання, що робить процес непридатним для практичного застосування. Верхня межа діапазону (7 атмосфер або 0,7 МПа) обрана як максимальний безпечний тиск для використовуваного обладнання, при якому ще забезпечується нормальна робота пальника без надмірного зносу витратних матеріалів. При тиску вище 9 атмосфер можливе пошкодження сопла, підвищена турбулентність плазмового струменя та погіршення якості різку через надмірне розширення щілини.

Експерименти планується проводити з кроком 1,5 атмосфера (0,15 МПа), що дає 3 рівнів тиску: 4, 5,5 та 7 атмосфер. Такий крок обраний як компроміс між детальністю дослідження та загальною кількістю експериментів. Попередні випробування показали, що зміна тиску на 1,5 атмосферу призводить до помітних змін показників якості, що робить цей крок достатнім для виявлення закономірностей. Водночас використання більш дрібного кроку (наприклад, 0,5 атмосфери) призвело б до надмірного збільшення кількості експериментів без суттєвого підвищення точності визначення оптимальних режимів.

Під час різання тиск контролюється візуально кожні 30 секунд, а також записується автоматично системою моніторингу. Якщо під час експерименту виявлено відхилення тиску більше $\pm 0,3$ атмосфери від заданого значення, такий експеримент анулюється і повторюється після виявлення та усунення причини нестабільності.

Сила струму є другим за важливістю технологічним параметром плазмового різання після тиску газу. Від сили струму залежить кількість енергії, що вноситься в газ, а отже, температура та інтенсивність плазмового струменя. Збільшення сили струму підвищує продуктивність різання (дозволяє збільшити швидкість або різати більш товстий матеріал), але водночас може призводити до розширення зони термічного впливу, збільшення ширини різку та підвищеного зносу витратних матеріалів.

В даному дослідженні сила струму не є варіюваним параметром, а встановлюється на фіксованих рівнях залежно від товщини матеріалу

відповідно до рекомендацій виробника обладнання та технологічних таблиць. Вибір оптимальної сили струму для кожної товщини здійснено на основі попередніх експериментів та літературних даних.

Для матеріалу товщиною 2 мм встановлюється мінімальна сила струму $I = 37$ А. Цього значення достатньо для якісного різання тонкого листа з швидкістю 1500 мм/хв при оптимальному тиску газу. Використання більшої сили струму для такої товщини недоцільне, оскільки призводить до надмірного термічного впливу, деформації листа та погіршення якості країв різку. При струмі 37 А ширина різку становить близько 1,5-2,0 мм, що є прийнятним для більшості застосувань тонколистового металу.

Для матеріалу товщиною 5 мм використовується середнє значення сили струму $I = 45$ А. Це значення забезпечує добрий баланс між продуктивністю різання та якістю поверхні. При струмі 45 А можлива швидкість різання 1500 мм/хв залежно від тиску газу та інших параметрів. Ширина різку при цьому струмі становить близько 2,0-2,5 мм, що відповідає промисловим вимогам до точності різання листових конструкцій.

Вибрані значення сили струму дозволяють охопити весь діапазон товщин матеріалу та дослідити вплив тиску газу при різних енергетичних режимах процесу. Для кожного значення сили струму передбачається варіювання тиску газу в повному діапазоні 4-7 атмосфер, що дає змогу виявити взаємодію між цими двома основними параметрами процесу.

Швидкість різання визначається як швидкість лінійного переміщення пальника (або заготовки) вздовж траєкторії розрізу. Від швидкості різання залежить продуктивність процесу, якість поверхні різку та величина енергетичного вкладу на одиницю довжини розрізу. Занадто низька швидкість призводить до надмірного нагрівання матеріалу, розширення зони термічного впливу та можливої деформації тонких листів. Занадто висока швидкість може призвести до неповного проплавлення матеріалу, утворення великої кількості грату на нижній кромці або навіть переривання процесу різання.

У даному дослідженні швидкість різання не є самостійним змінним параметром, а вибирається як оптимальна для кожної комбінації товщини матеріалу, сили струму та тиску газу. Оптимальна швидкість визначається експериментально під час налаштування режимів перед основною серією експериментів. Критерієм оптимальності є отримання повного проплавлення матеріалу по всій товщині з мінімальною кількістю грату при прийнятній якості поверхні різу.

Максимальна швидкість різання обмежена технічними можливостями системи переміщення пальника або столу і становить 3000 мм/хв (50 мм/с або 3 м/хв). Це обмеження враховується при плануванні експериментів, зокрема, при різанні найтоншого матеріалу (2 мм) при високому струмі та оптимальному тиску газу швидкість може досягати цієї граничної величини.

Прогнозні діапазони швидкостей різання:

- Для матеріалу товщиною 2 мм при струмі 37 А: швидкість 1500 мм/хв
- Для матеріалу товщиною 5 мм при струмі 45 А: швидкість 800мм/хв

Ці значення є орієнтовними і уточнюються в процесі експериментів. Для кожного експерименту фактична швидкість різання фіксується в протоколі та враховується при аналізі результатів. Очікується, що при збільшенні тиску газу оптимальна швидкість різання також буде зростати, оскільки підвищений тиск забезпечує більш інтенсивне видалення розплаву та дозволяє різати швидше без погіршення якості.

2.6 Методика проведення експериментів

Підготовка до експериментів та налаштування обладнання

Перед початком кожної серії експериментів здійснюється комплексна та ретельна підготовка обладнання та робочого місця, яка критично важлива для отримання достовірних та повторюваних результатів. Процес підготовки включає кілька послідовних етапів, які повинні виконуватися в суворому порядку для забезпечення якості результатів.

Етап 1. Перевірка компресорного обладнання та системи подачі газу

Етап 2. Калібрування вимірювальних приладів

Етап 3. Налаштування джерела живлення EX-TRAFIRE 55SD

Етап 4. Налаштування системи ЧПІК (EX-TRACK)

Етап 5. Регулювання тиску газу

Етап 6. Підготовка матеріалу та закріплення на столі

Етап 7. Встановлення висоти пальника

Експеримент проводиться за наступною послідовністю операцій для всіх спроб:

Для кожної комбінації товщини матеріалу, сили струму та тиску газу проводяться три повторні розрізи, що дозволяє оцінити варіативність результатів та отримати середні значення показників якості. Для кожного розрізу здійснюються наступні дії:

Відразу після розрізу проводяться первинні спостереження та записуються якісні характеристики:

- Загальний вигляд розрізу — записуються видимі дефекти: конусність, хвилястість країв, наявність тріщин, деформація матеріалу
- Утворення ґрату — оцінюється якісно як відсутній, мінімальний, помірний або значний; записується видимість ґрату на верхній та нижній кромках
- Звук та вібрація — записуються спостереження щодо характеру звуку горіння дуги, стабільності процесу та наявності вібрацій
- Фотографування розрізу — розріз фотографується для документації та якісної порівняльної оцінки різних режимів

2.7 Методика вимірювання показників якості

Для забезпечення репрезентативності результатів на кожному розрізі проводяться вимірювання показників якості в декількох точках. Розріз розбивається на три зони по його довжині: початкова зона (перші 15-20 мм розрізу), середня зона та кінцева зона (останні 15-20 мм розрізу). В кожній зоні

вибирається по одній контрольній точці для проведення вимірювань. Така схема вибору точок дозволяє виявити можливу варіацію показників якості вздовж розрізу.

Для кожної контрольної точки проводяться вимірювання двох основних показників якості (перпендикулярність та ширина різь). Для глибини зони термічного впливу та ґрату роблять вибірково на одній із контрольних точок.

На кожній контрольній точці розрізу вимірюється перпендикулярність за допомогою універсального кутоміра. Кутомір прикладається до верхньої поверхні матеріалу основою, а рухома лінійка прикладається до поверхні різь. Показання кутоміра свідчать про відхилення від перпендикуляра в градусах. На кожному розрізі проводяться три вимірювання перпендикулярності в трьох зонах (початкова, середня, кінцева), а також два вимірювання на кожній контрольній точці: одне з лицьового боку та одне зі зворотного боку для оцінки неоднорідності конусності.

Ширина різь вимірюється штангенциркулем з точністю 0,1 мм у трьох точках: на верхній кромці матеріалу, в середині товщини та на нижній кромці матеріалу. Замір робиться на кожній контрольній точці розрізу. Результати записуються в протокол.

Визначення утворення ґрату та видалення розплаву. На розрізі візуально оцінюється утворення ґрату на нижній кромці. Оцінка проводиться за чотирибальною шкалою: 0 — ґрат відсутній, 1 — мінімальний ґрат (менше 5% по довжині), 2 — помірний ґрат (5-25% по довжині), 3 — значний ґрат (більше 25% по довжині). Записується оцінка для кожної контрольної точки.

Також вимірюються розміри зовнішніх та внутрішніх елементів за допомогою штангенциркуля, а дані заносяться до таблиці.

Для дослідження у САПР SolidWorks було створено листову деталь прямокутної форми розміром 50x100 мм, рис. 2.5. Всередині також міститься квадрат 40x40 мм, пряма лінія для вимірювання ширини різь, коло діаметром 20 мм та прямокутний трикутник зі стороною 40 мм.

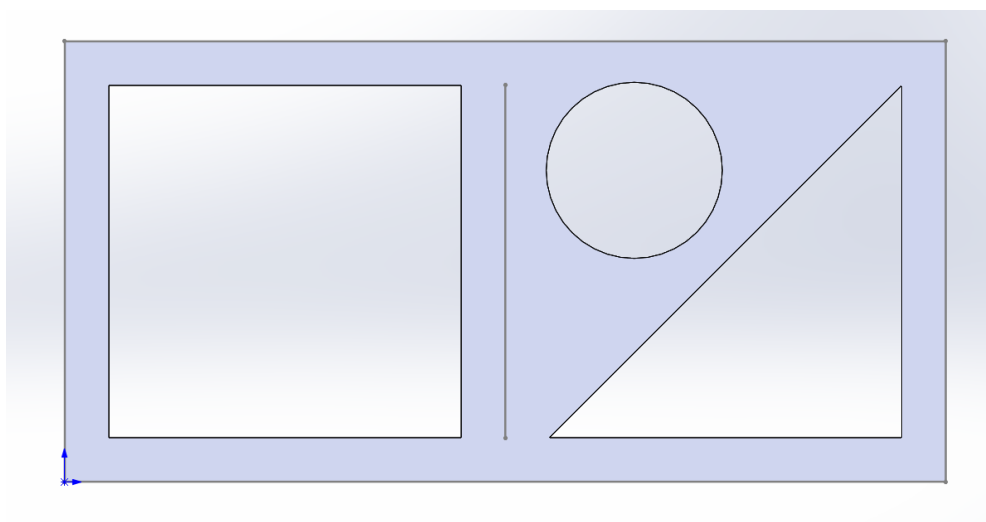


Рисунок 2.5 – Деталь для здійснення досліджень.

Така форма деталі дозволить оцінити різні геометричні характеристики деталі в процесі дослідження на заданих параметрах різь.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ

Будо проведено дослідження впливу тиску плазмоутворююсого газу якість та стабільність процесу плазмового різання. На рис 3.1 показано верхню та нижню сторони вирізаних деталей товщиною 2 мм. Сила струму становила 37А і швидкість різання – 1500 мм/хв.

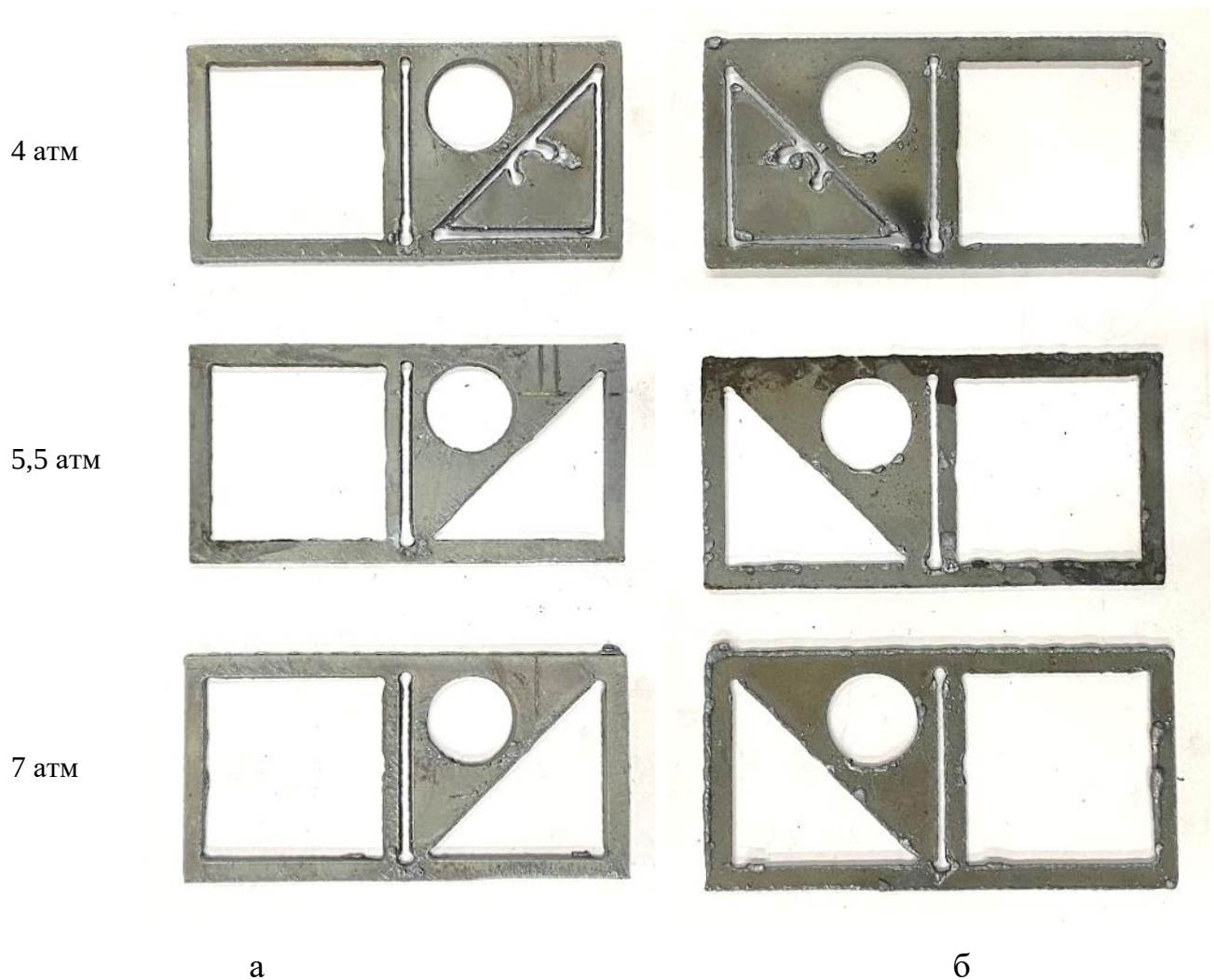


Рисунок 3.1 – Результати дослідження впливу тиску плазмоутворююсого газу якість та стабільність процесу плазмового різання металу товщиною 2 мм.

а – верхня сторона; б – нижня сторона.

Як видно з рис. 3.1. для тиску 4 атм внутрішня частина трикутника залишилася приєднаною до заготовки за допомогою утвореного грату, але вона легко відділилася.

Також аналогічне дослідження проведено з металевою заготовкою товщиною 5 мм. Результати відображено на рис. 3.2. Для цього дослідження були задані швидкість різання 800 мм/хв та струм 45А.

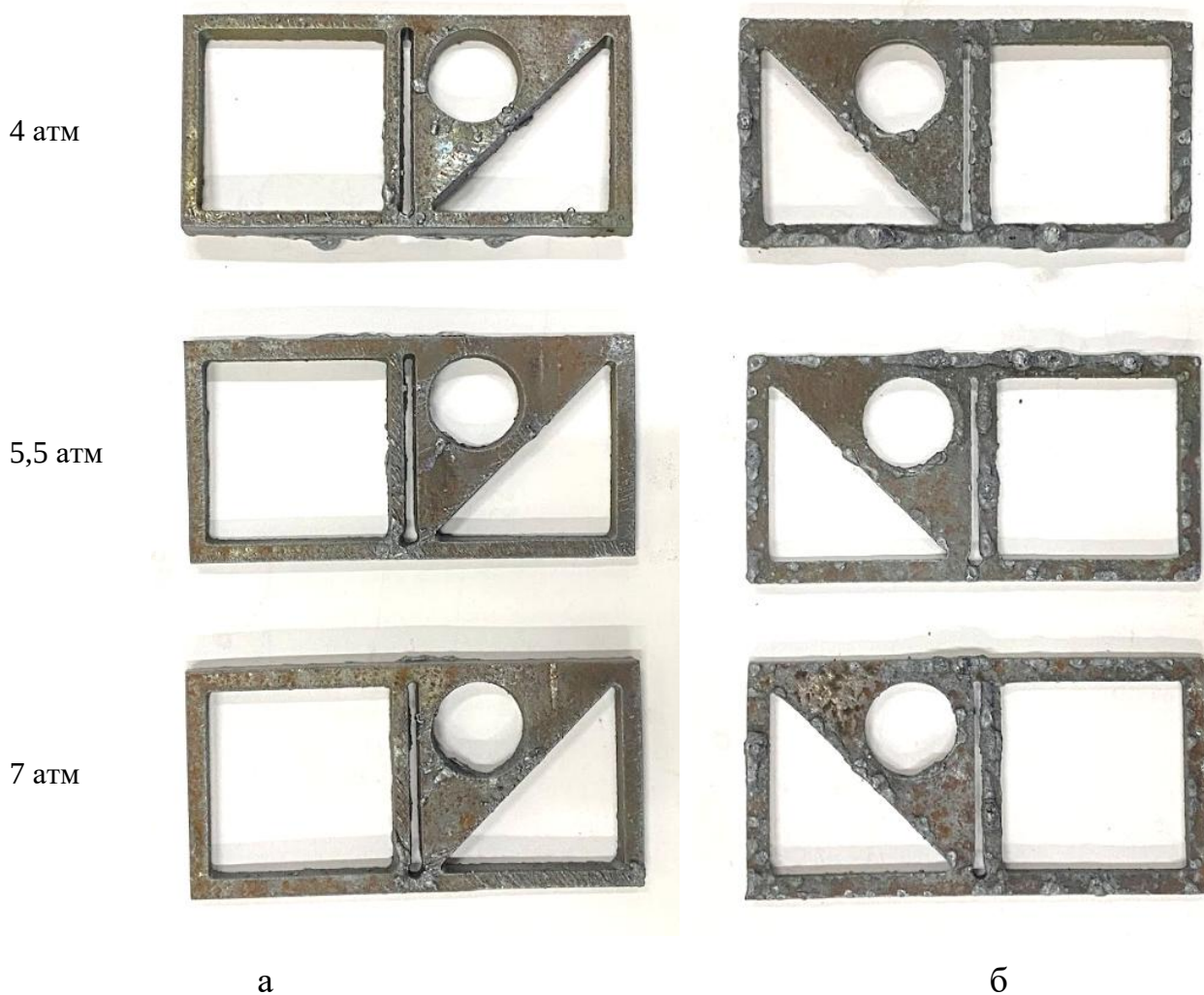


Рисунок 3.2 – Результати дослідження впливу тиску плазмоутворюючого газу якості та стабільності процесу плазмового різання металу товщиною 5 мм.

а – с.

Як бачимо при тиску плазмоутворюючого газу 7 атм наявність грату найменша.

3.1 Аналіз отвору пробивки та ширини різь

Для визначення залежності впливу тиску плазмоутворюючого газу на розмір отвору пробивки а також ширини різь було здійснено вимірювання цих параметрів для всіх зразків. Для цього виміряно діаметр отвору а саме його ширину по горизонталі для лінії, віна вирізалася пробиваючи отвір знизу заготовки і рухаючись догори.

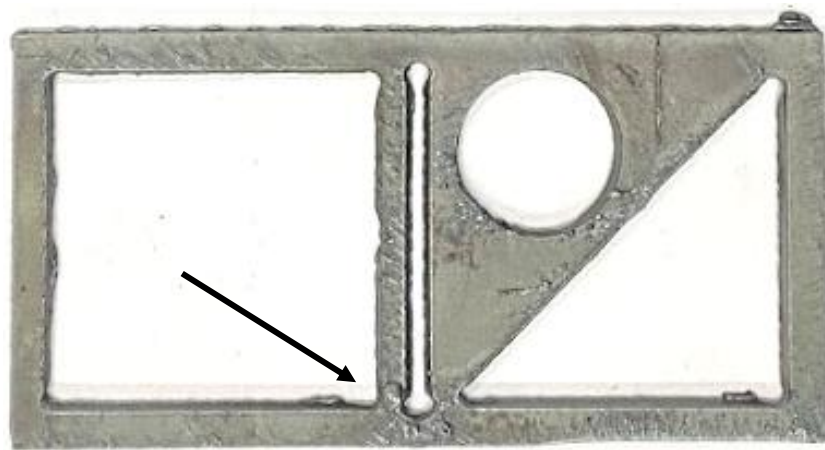


Рисунок 3.3 – Місце заміру отвору пробивки.

Також було виміряно ширину різь в декількох точках на верхній та на нижній поверхні деталі для обох товщин заготовок. Результати вимірювання подані в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1. Результати вимірювання розмір отвору пробивки та ширини різь

Товщина 2 мм				Товщина 5 мм			
Тиск, атм	Розмір отвору, мм	Ширина низ, мм	Ширина верх, мм	Тиск, атм	Розмір отвору, мм	Ширина низ, мм	Ширина верх, мм
4	3,04	1,06	2,23	4	3,17	1,41	2,57
5,5	3,17	1,28	2,27	5,5	3,03	1,43	2,33
7	3,26	1,32	2,64	7	2,93	1,47	2,13

На рис. 3.4. зображено графік залежності розміру отвору пробивки від тиску плазмоутворюючого газу для двох товщин заготовок 2 і 5 мм. Як бачимо зі зростанням тиску газу розмір отвору зростає для товщини заготовки 2 мм і зменшується для 5 мм.

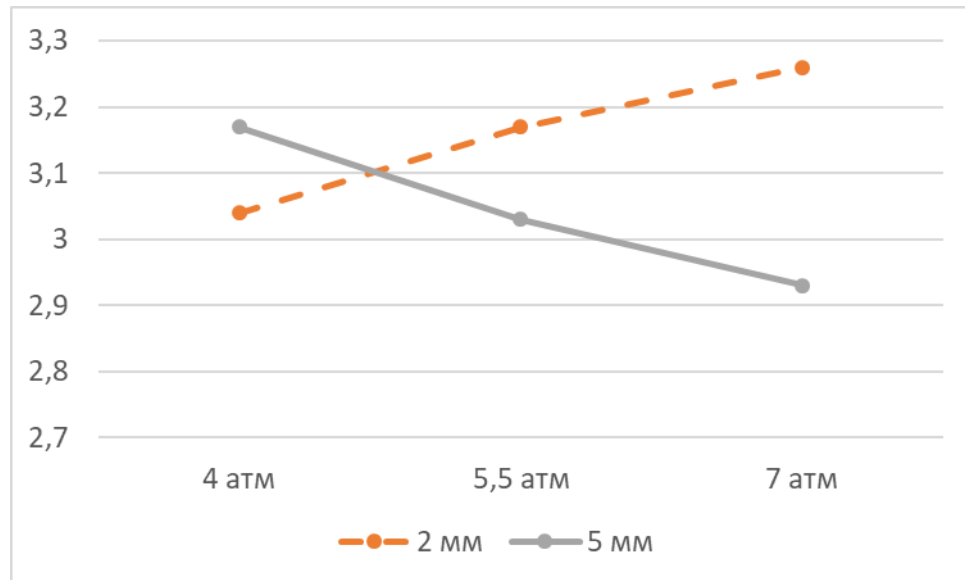


Рисунок 3.4. – Залежності розміру отвору пробивки від тиску плазмоутворюючого газу для двох товщин заготовок 2 і 5 мм

Це можна пояснити тим, що для тонкого матеріалу надмірний тиск газу призводить до турбулентного розширення плазмового струменя на виході з матеріалу, збільшуючи ширину різку на верхній поверхні. Для товстого матеріалу вищий тиск забезпечує кращу фокусування та стабілізацію плазмового струменя протягом усього шляху через матеріал.

Також було проаналізовано ширину різку у верхній та у нижній частині деталі. Графіки залежності ширини різку від тиску плазмоутворюючого газу показані на рис. 3.5 і 3.6.

Як бачимо зі зростанням тиску дещо зростає ширина різку для металу товщиною 2 мм на обох поверхнях деталі. Для металу товщиною 5 мм зі зростанням тиску плазмоутворюючого газу ширина різку на нижній поверхні дещо зростає але в незначних межах і становить в середньому 1,43 мм. Тоді коли ширина різку на верхній поверхні заготовки зменшується з 2,57 мм до 2,13 мм за рахунок більш сконцентрованого плазмового струменя.

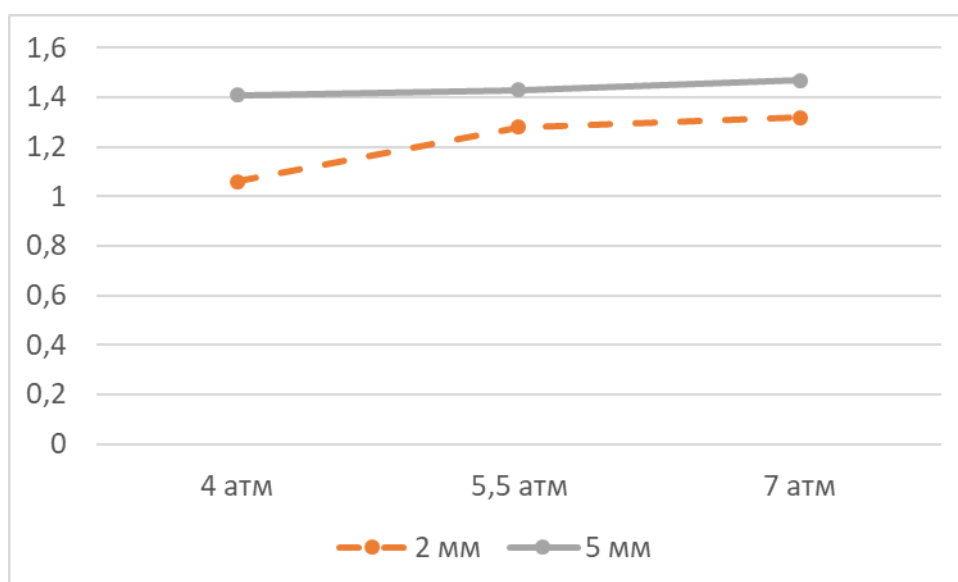


Рисунок 3.5. – Залежності ширини різь на нижній поверхні деталі від тиску плазмоутворюючого газу для двох товщин заготовок 2 і 5 мм

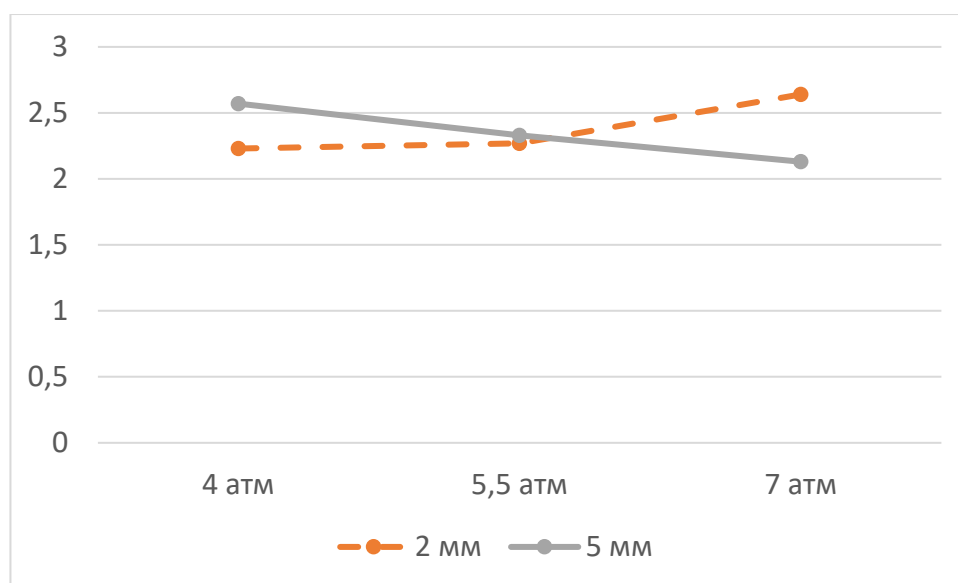


Рисунок 3.6. – Залежності ширини різь на верхній поверхні деталі від тиску плазмоутворюючого газу для двох товщин заготовок 2 і 5 мм

Тому для меншої товщини краще дещо зменшити тиск газу а для більших товщин – збільшувати.

3.2 Вплив зміни тиску на розміри деталі

Наступним етапом є дослідження впливу тиску плазмоутворюючого газу на точність розмірів деталі і на скільки ці розміри відповідають заданим, а саме висота і ширина деталі 50 і 100 мм відповідно, сторона квадрата – 40 мм і діаметр кола – 20 мм.

На рис. 3.7 показані місця замірів досліджуваних величин.

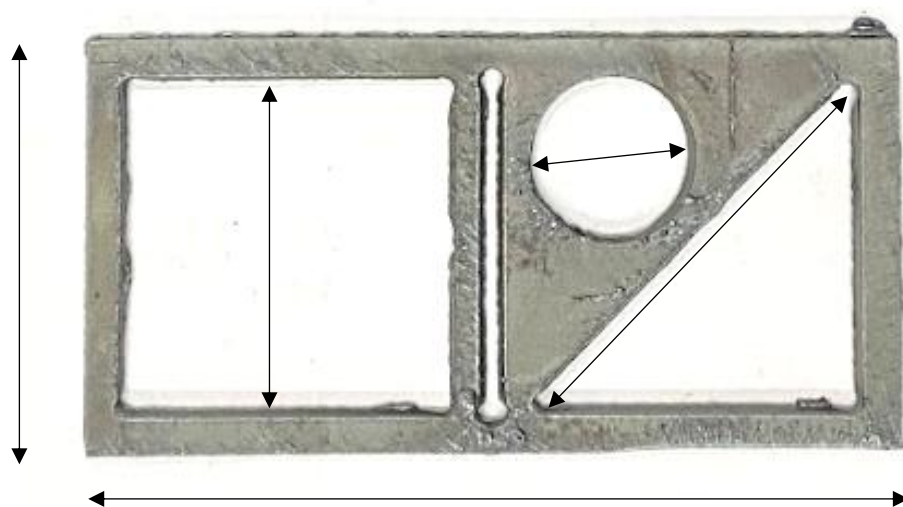


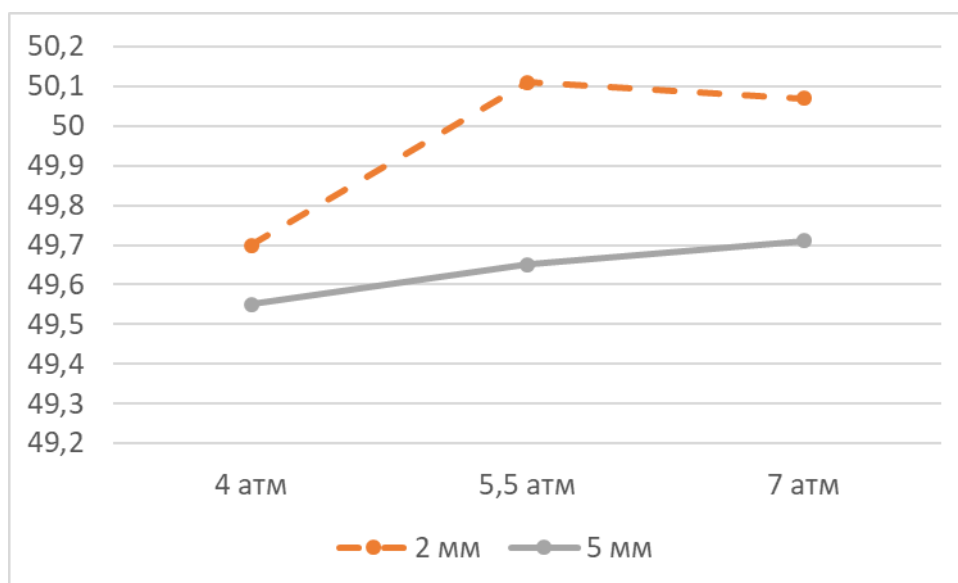
Рисунок 3.7 – Місця замірів досліджуваних величин

Результати вимірювання подані в таблиці 3.2.

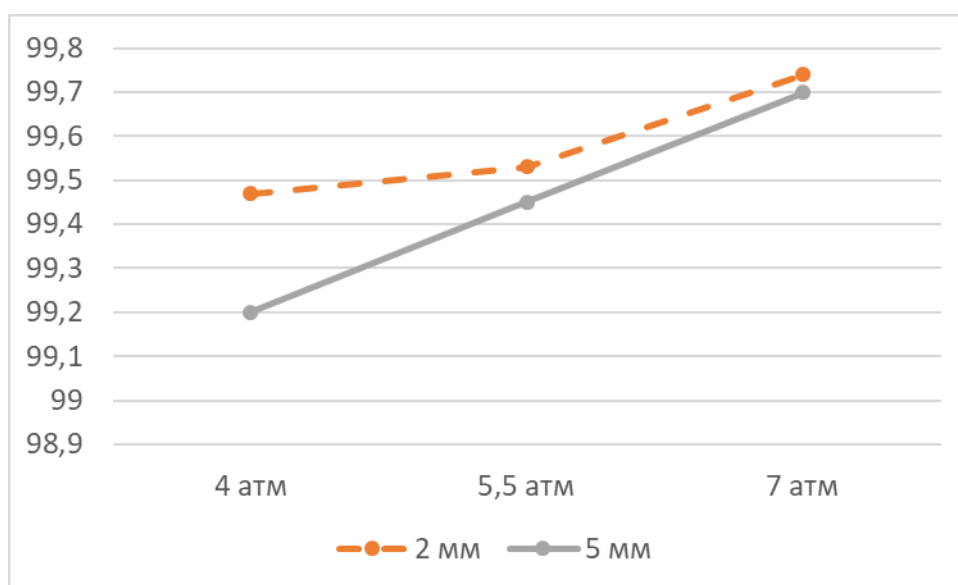
Таблиця 3.2. Результати вимірювання розмірів деталі

Товщина 2 мм					Товщина 5 мм			
Тиск, атм	Висота деталі, мм	Ширина деталі, мм	Ширина квадрата, мм	Діаметр кола, мм	Висота деталі, мм	Ширина деталі, мм	Ширина квадрата, мм	Діаметр кола, мм
4	49,7	99,47	40,7	19,67	49,55	98,7	39,87	19,94
5,5	50,11	90,53	39,93	19,85	49,65	99,45	39,75	19,97
7	50,07	99,74	39,96	19,46	49,71	99,7	39,88	20

На рис. 3.8 показані залежності висоти і ширини деталі в залежності від тиску плазмоутворюючого газу.



а



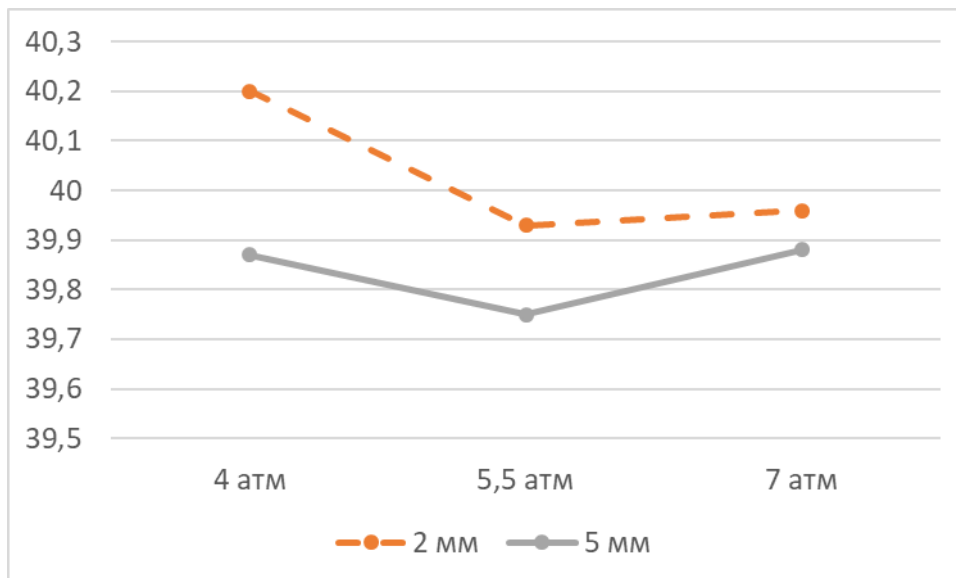
б

Рисунок 3.8 – Залежності а – висоти і б – ширини деталі від тиску плазмоутворюючого газу

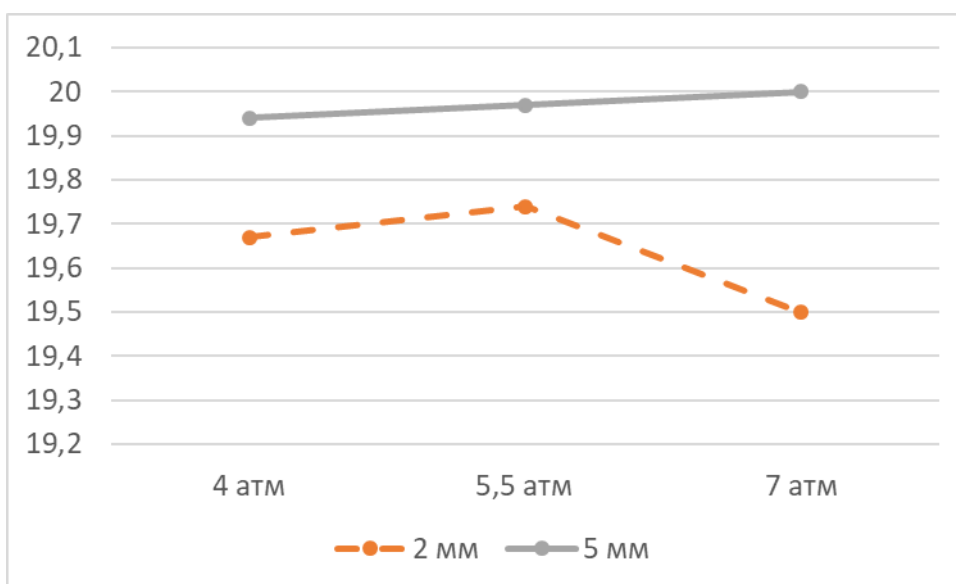
Зі зростанням тиску газу габаритні розміри деталей зростають і їх значення наближується до заданого і відхилення складає близько 0,2-0,3 мм. Для значень тиску 5,5 атм та 7 атм висота деталі була дещо більша за 50 мм а у всіх інших зразках розміри менші від заданого. Для товщини 5 мм зменшення тиску газу

негативно впливає на точність розмірів і при тиску 4 атм відхилення складає 0,8 мм.

Також були виміряно ширину квадрата і діаметр отвору, графіки цих залежностей від тиску плазмоутворюючого газу показані на рис. 3.9.



а



б

Рисунок 3.9 – Залежності а – ширини квадрата і б – діаметра отвору від тиску плазмоутворюючого газу

Розміри квадрата прямують до 40 мм зі зростанням тиску. Діаметр отвору для товщини 5 мм має відхилення 0,06 мм для 4 атм і становить рівно 20 мм для тиску 7 атм. Тоді як для товщини 2 мм діаметр отвору значно менший і при

7 атм відхилення досягає 0,5 мм. Це можна пояснити більшою швидкістю різання та невеликим діаметром отвору.

Також щоб визначити точність розмірів вирізаного трикутного отвору вимірюємо його гіпотенузу, відстань між двома радіусами. Розмір у гострих кутах завжди буде менший. На рис. 3.10 показано результати замірів.

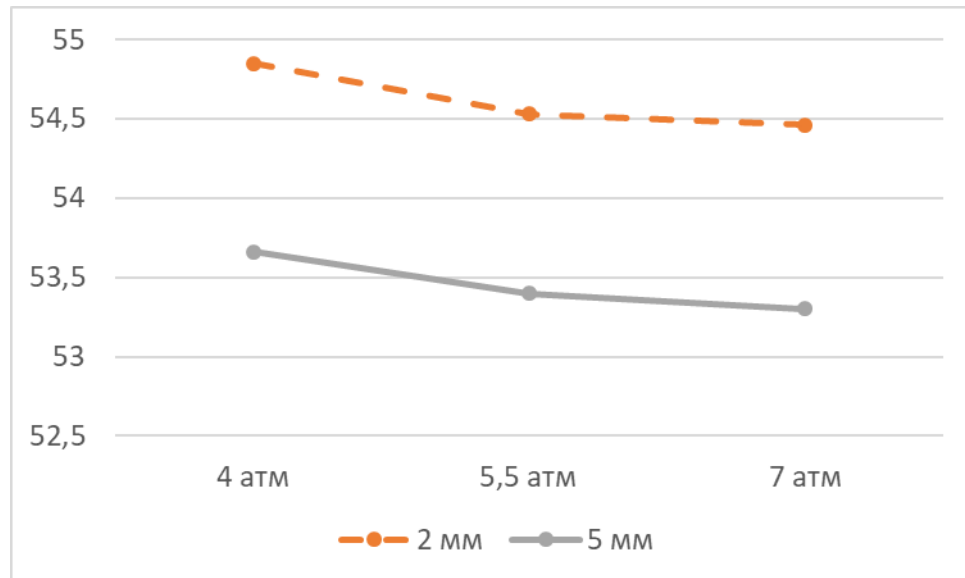


Рисунок 3.10 – Залежність довжини гіпотенузи трикутника від тиску плазмоутворюючого газу

Для обох товщин металу зі зростанням тиску плазмоутворюючого газу довжина гіпотенузи трикутника, а саме відстань між внутрішніми радіусами утворених у двох гострих кутах трикутника зменшується.

3.3 Визначення конусності та наявності грату

Вимірювання конусності різу виконувалося для товщини 5 мм оскільки точно виміряти конусність для 2 мм досить складно. Для тиску 7 атм конусність не перевищує $0,5^\circ$, для 5,5 атм близько 1° і для 4 атм конусність досягає $3-5^\circ$.

Для товщини 5 мм при тиску 4 атм грату найбільше і він міцно тримається деталі, зі зростанням тиску наявність грату значно зменшується, рис. 3. 11.

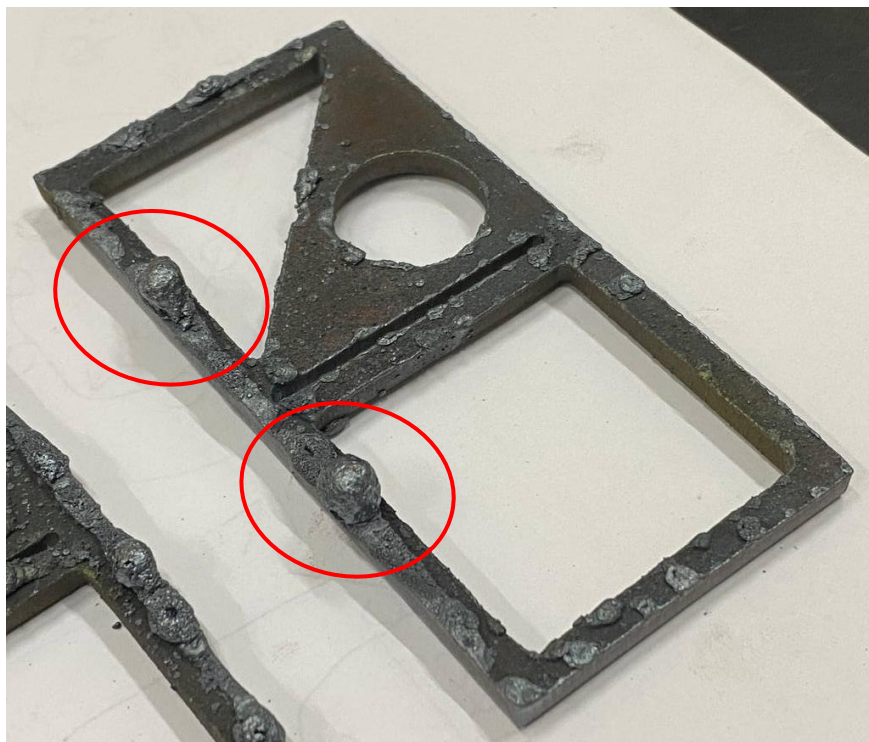


Рис. 3.11 – Наявність грату для товщини 5 мм при тиску 4 атм.

Для товщини 2 мм картина зворотня, при тиску 4 атм грату найменше а при 7 атм його кількість та міцність прикріплення до деталі зростає.

4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ВИРОБНИЦТВА

4.1 Загальні вимоги безпеки

Плазмове різання металу є технологічним процесом, під час якого на організм працівника впливають численні шкідливі та небезпечні виробничі фактори. Забезпечення безпеки та здоров'я працівників при роботі з обладнанням для плазмового різання є критично важливим завданням як з точки зору охорони праці, так і з етичної та юридичної позицій. Дана дипломна робота пов'язана з експериментальними дослідженнями процесу плазмового різання, тому детальне розуміння можливих небезпечних факторів та методів їх нейтралізації є необхідною умовою безпечного проведення роботи.

Згідно з Законом України "Про охорону праці", роботодавець зобов'язаний забезпечити безпечні та здорові умови праці, провести навчання та інструктаж працівників з питань охорони праці, забезпечити їх особистими захисними засобами (ОЗЗ) та контролювати дотримання вимог безпеки. До експериментальних досліджень, пов'язаних з плазмовим різанням, допускаються особи не молодші 18 років, які мають відповідну професійну підготовку, пройшли попередні медичні огляди та отримали спеціальне навчання з охорони праці.

Дисципліна при виконанні робіт з плазмового різання, точне дотримання інструкцій та рекомендацій виробника обладнання, а також постійна увага щодо умов роботи є основними засобами попередження нещасних випадків та професійних захворювань. Кожен працівник повинен розуміти, що заходи безпеки розроблені не для утруднення роботи, а для збереження його здоров'я та життя.

4.2 Небезпечні та шкідливі виробничі фактори при плазмовому різанні

Джерело живлення EX-TRAFIRE 55SD та система ЧПК EX-TRACK використовують електричну енергію напругою 220 В (мережа живлення) та вироблюють на виході постійну напругу дуги близько 100-200 В при силі струму до 55 А. Хоча ці значення можуть здаватися відносно невисокими, контакт з живими частинами електричного кола може бути смертельно небезпечним [19].

При контакті людини з живими частинами апарату можливе електропораження, яке залежить від [15-17]:

- Напруги контакту — чим більша напруга, тим небезпечніша ситуація
- Тривалості контакту — довше тривалість контакту, тим більше пошкодження тканин
- Електричного опору тіла людини — залежить від вологості шкіри, наявності потів, контакту з провідними матеріалами
- Частоти струму — для змінного струму 50 Гц небезпечнішим є контакт, ніж для постійного

При силі струму 50-100 мА (що цілком можливо при контакті з напругою 220 В в умовах підвищеної вологості) можливі серйозні опіки внутрішніх органів, зупинка дихання та серцевої діяльності, які можуть привести до смерті.

Конкретні місця та джерела електричної небезпеки:

1. Первинна обмотка трансформатора живлення в апараті EX-TRAFIRE 55SD — напруга 220 В, проводиться через кабель від розетки до апарату. Кабель не повинен мати видимих пошкоджень ізоляції. При обслуговуванні апарату персонал не повинен торкатися частин, які з'єднані з первинною обмоткою.
2. Вихідні затиски апарату (плюс та мінус) — напруга близько 100-200 В. До цих затисків підключаються кабелі, що йдуть до пальника та до заготовки. Ці затиски завжди живі, навіть якщо дуга не запалена. Контакт

з обома затисками одночасно або контакт з одним затиском при наявності контакту з землею може привести до електропораження.

3. Пальник та кабель пальника — весь пальник та кабель знаходяться під напругою вихідного ланцюга. При пошкодженні кабелю (перетиранням) можливий контакт з голими провідниками.
4. Заготовка та робочий стіл — на них подається напруга мінусового виходу апарату через масовий затиск. При недостатній ізоляції обладнання та робочого місця персонал може випадково контактувати з цими частинами.
5. Система ЧПК EX-TRACK — містить власне джерело живлення напругою 220 В та внутрішні електронні схеми. При несанкціонованому розкритті корпусу контролера можливий контакт з живими частинами.

Заходи захисту від електричної небезпеки:

1. Заземлення обладнання — апарат EX-TRAFIRE 55SD та система EX-TRACK повинні мати надійне з'єднання з контуром заземлення будівлі через трьохпровідний кабель живлення (фаза, нуль, земля). Опір заземлення не повинен перевищувати 4 Ом згідно з ДСТУ EN 50194. Періодично (не менше 1 разу на рік) проводиться перевірка опору заземлення мегаомметром.
2. Використання захисного переривача (УЗО) — перед апаратом у електрощиті встановлюється пристрій захисного відключення з номіналом 30 мА, який швидко вимикає живлення при виникненні струму утечки. УЗО значно підвищує безпеку навіть при наявності пошкоджень ізоляції.
3. Регулярна перевірка кабелів та з'єднань — щоденно перед початком роботи проводиться огляд кабелю живлення апарату, кабель-шлангового пакету та всіх з'єднань на предмет видимих пошкоджень ізоляції, тріснутих ізоляцій, облізлих місць. Будь-яке пошкодження є причиною для негайного припинення роботи та ремонту кабелю. Не дозволяється

навішування кабелю на металеві гаки, прокладання кабелю через гаряче місце розрізу або через вологу.

4. Ізолювання рук та тіла — при роботі з плазморізом персонал одягає ізолюючий одяг (комбінезон, рукавиці), що попереджає випадковий контакт тіла з напругою. Рукавиці повинні бути виготовлені з матеріалу, що має хорошу ізолюючу здатність (гума, натуральна шкіра та ін.), але при цьому не повинні бути вогко від поту. При брудних та вологих рукавицях їх слід змінити на чисті та сухі.
5. Гідроізоляція робочого місця — робочий стіл та навколишня територія повинні залишатися сухими. При роботі в умовах підвищеної вологості (до 75% вологості) рекомендується встановлення вологовідокремлювача у системі стисненого повітря та виключення контакту з вологими поверхнями.
6. Електробезпечна система заземлення персоналу — перед роботою персонал може одягти спеціальний браслет, З'єднаний проводом заземлення з контуром заземлення будівлі. Це попереджує накопичення статичної напруги на тілі.
7. Заборона самостійного ремонту електричного обладнання — при виявленні несправностей у роботі апарату персонал не повинен намагатися ремонтувати його самостійно. Обладнання передається на ремонт кваліфікованим електротехніком або повертається виробнику для гарантійного ремонту.

Ультрафіолетове і інфрачервоне випромінювання. При плазмовому різанні металу температура плазмового струменя досягає 20000-30000 °С, а температура дуги — близько 5000-6000 °С на виході з сопла. Така надзвичайно висока температура є джерелом інтенсивного теплового випромінювання у видимому діапазоні, а також у ультрафіолетовому (УФ) та інфрачервоному (ІЧ) діапазонах спектра.

Ультрафіолетове випромінювання (УФ) складається з фотонів з довжиною хвилі від 100 до 380 нм. Хоча УФ складає лише близько 4% енергії від загального випромінювання плазмової дуги, воно є найбільш біологічно активним. УФ розділяється на три піддіапазони: УФ-А (315-380 нм), УФ-В (280-315 нм) та УФ-С (100-280 нм). При плазмовому різанні переважає УФ-В та УФ-С.

Інфрачервоне випромінювання (ІЧ) складається з фотонів з довжиною хвилі від 380 нм до 1 мм. ІЧ складає більшість енергії теплового випромінювання дуги. ІЧ розділяється на три піддіапазони: ІЧ-А (780-1400 нм), ІЧ-В (1400-3000 нм) та ІЧ-С (3000 нм - 1 мм). Для плазмового різання найбільш значущим є ІЧ-А, який найлегше проникає в людське тіло.

Небезпечні ефекти УФ та ІЧ випромінювання [15-17]:

1. Ураження очей — найбільш чутливим органом до ультрафіолетового випромінювання є очі. УФ, особливо УФ-С, абсорбується в рогівці та передній камері ока, викликаючи фотокератит (запалення рогівки). При гострому опроміненні розвивається "електрична офтальмія" з симптомами: відчуття піску в очах, біль, світлобоязнь, слезотеча, набрякання повік. При тривалому чи повторюваному опроміненні розвивається хронічне запалення, катаракта (помутніння кришталика), дистрофія сітківки з ризиком втрати зору.
2. Опіки шкіри — інтенсивне ІЧ випромінювання викликає сильний нагрів шкіри, приводячи до термічних опіків. Механізм опіку подібний до впливу гарячого предмету, але поширюється на більшу площу. При опроміненні близько 5 хвилин збільшується температура шкіри на 1-2°C, при 20-30 хвилин можливі опіки першого-другого ступеня.
3. Вплив на хіміїв рецепторів — комбінований вплив УФ та ІЧ може викликати утому очей, головний біль, загальну розбитість та погіршення умовно-рефлекторної діяльності.
4. Ризик розвитку професійних захворювань — при тривалому та інтенсивному опроміненні (понад 10 років) працівники часто страждають

від професійних катарактирх (катаракта теплівника), ендотеліальної рубеоли.

Заходи захисту від УФ та ІЧ випромінювання:

1. Захисні окуляри для плазмового різання — при роботі обов'язково використовуються спеціалізовані окуляри з фільтрами для захисту від УФ та ІЧ випромінювання. Окуляри повинні мати затемненням DIN 5 (для плазморізів потужністю до 55 А) або DIN 6 (для потужніших апаратів). Затемнення DIN 5 означає, що окуляри пропускають близько 0,04% видимого світла при нормальних умовах освітлення.
2. Захисне обладнання для обличчя та шиї — при тривалій роботі (більше 2-3 годин в день) використовується захисна маска чи щиток, який закриває обличчя та верхню частину грудей. Такий щиток може бути закріплений на головному уборі або триматися в руці оператора.
3. Захисний одяг — персонал одягає робочий комбінезон з плащівки або іншого матеріалу, що має низьку теплопровідність та добре поглинає УФ. Робочий одяг повинен повністю закривати руки та ноги. При роботі з гарячими матеріалами рекомендується використання шкіряного передника або спецодягу з вогнетривкої тканини.
4. Захисні рукавиці — при роботі використовуються шкіряні або спеціальні вогнетривкі рукавиці, які захищають руки від ІЧ випромінювання та термічних опіків від летючих бризків розплаву. Рукавиці повинні досягати верхньої третини передпліччя для максимального захисту.
5. Головний убір — персонал одягає головний убір (шапка, каска), яка захищає волосся та верхню частину голови від випромінювання та від летючих бризків металу.
6. Організація робочого місця — плазморіз установлюється так, щоб випромінювання було спрямоване вниз на матеріал, а не вгору на голову оператора. На робочому місці установлюється захисний екран з матеріалу, який добре поглинає УФ та ІЧ (наприклад, спеціальна

плащівка яскраво-помаранчевого кольору, яка відбиває ІЧ випромінювання).

7. Режим праці та відпочинку — при роботі з плазморізом персонал повинен робити перерви на 10-15 хвилин кожні 1-2 години для відпочинку очей та охолодження шкіри. Під час перерв персонал повинен залишатися в затіненому місці.

При плазмовому різанні металу утворюється виробничий шум, що виникає внаслідок проходження плазми з великою швидкістю через сопло та взаємодії плазмового струменя з металом. Крім того, джерелами шуму є компресор та система охолодження апарату [15-17].

Рівні шуму при плазмовому різанні:

- При різанні без сопла (тільки дуга): близько 75-85 дБ(А)
- При різанні з соплом (запалена дуга на матеріалі): близько 85-95 дБ(А)
- При використанні компресора: додаткові 80-85 дБ(А)
- Загальний рівень шуму на робочому місці: 90-100 дБ(А)

Для порівняння: рівень шуму нормальної розмови становить близько 60 дБ(А), рівень шуму на вулиці під час автомобільного руху — близько 70-80 дБ(А), рівень шуму ав станку — близько 85-95 дБ(А).

Небезпечні ефекти шуму та вібрації:

1. Втрата слуху — при тривалому впливі шуму рівня 85 дБ(А) та вище розвивається професійна глухота (шумова тугохідність). Цей процес є незворотним; втрачений слух не можна відновити. При нервирання рівні 90 дБ(А) 50% робітників втрачають слух на 10-20 дБ протягом 10 років роботи.
2. Фізіологічні ефекти — довготривалий вплив шуму викликає підвищення кров'яного тиску, порушення ритму серцевої діяльності, підвищення адреналіну в крові, що може привести до розвитку гіпертонічної хвороби.
3. Психологічні та неврологічні ефекти — шум викликає постійне роздратування нервової системи, що проявляється у вигляді бездоння,

утоми, погіршення концентрації уваги, прискорення реакції, агресивної поведінки.

4. Вібрація — крім шуму, при роботі апарату та компресора виникає вібрація, яка передається через руки оператора (при ручному тримуванні пальника). Тривалий вплив вібрацій може привести до синдрому "білих пальців" — порушення кровообігу в кистях рук з загрозою гангрени.

Заходи захисту від шуму та вібрації:

1. Засоби індивідуального захисту слуху:

- Беруші — класичний засіб захисту, які вставляються в слуховий прохід. Беруші повинні закривати слуховий прохід повністю. Ефективність затуплення залежить від матеріалу та правильності вставлення; при правильному вставленні затупленням становить 15-30 дБ(А).
- Навушники — спеціальні навушники для захисту слуху з м'яким ущільненням підвищують затупленням до 20-35 дБ(А). Сучасні "активні" навушники містять мікрофон та гучномовець, які перетворюють вхідний звук у протифазовий, скасовуючи його. Такі навушники особливо ефективні для шуму низької частоти (як от шум компресора).
- Беруші + навушники — комбінована система забезпечує максимальний захист (до 40-50 дБ(А) затупленням).

При роботі з плазморізом, даючим шум 90-100 дБ(А), персонал повинен використовувати навушники та беруші одночасно, що дає затупленням близько 30-40 дБ(А), приносячи до ефективного рівня близько 50-70 дБ(А) в слуховому проході — безпечного рівня.

2. Вибір тихішого обладнання — при можливості вибирається обладнання з меншим рівнем шуму. Наприклад, компресори з частотним регулюванням (інвертором) генерують менше шуму, ніж традиційні пульсуючі компресори.

3. Звукоізоляція робочого місця — навколо робочої зони встановлюється шумоподавлювальна перегородка із звукопоглинаючого матеріалу (піна, мінеральна вата та ін.). Це дозволяє зменшити рівень шуму в навколишньому середовищі на 10-15 дБ(А).
4. Медичне спостереження — персонал, задіяний у роботі з плазморізом, повинен проходити аудіометрію (перевірка слуху) не менше 1 разу на рік для раннього виявлення втрати слуху.
5. Режим праці та відпочинку — персонал повинен робити перерви на 10-15 хвилин кожні 1-2 години для відпочинку слухового аналізатора. Під час перерв рекомендується перебування у тихому місці.

При плазмовому різанні металу як джерелами теплового впливу являються [15-17]:

1. Плазмовий струмінь — прямий контакт з плазмовим струменем температурою 20000-30000°C приводить до миттєвого випаровування будь-якої органічної тканини та глибоких опіків.
2. Розплавлений метал — розплавлений метал, що вилітає з зони різання у вигляді бризків розміром 0,5-3 мм і температурою близько 1500-2000°C, може потрапити на шкіру та викликати значні опіки другого-третього ступеня.
3. Гарячі дони та електрод пальника — сопло та електрод розігріваються до температури близько 300-500°C під час роботи та залишаються гарячими деякий час після вимкнення апарату.
4. Заготовка і робочий стіл — матеріал в зоні розрізу розігрівається до температури близько 100-200°C при ручному триманні заготовки без захисних засобів.

Типи й характеристики опіків:

- Опіки першого ступеня — гіперемія (почервоніння) шкіри. Виникають при контакті з умовно гарячим предметом на період 1-2 секунди.
- Опіки другого ступеня — утворення пухирів з прозорою рідиною. Виникають при контакті на період 3-5 секунд.

- Опіки третього ступеня — повне руйнування всіх шарів шкіри. Виникають при контакті на період більше 10 секунд або при контакті з плазмовим струменем (миттєво).
- Опіки четвертого ступеня — руйнування не лише шкіри, але й глибших тканин (м'язів, кісток). Виникають при тривалому контакті з плазмою або при контакті з розплавленим металом.

Заходи захисту від теплового впливу:

1. Захисний спецодяг — персонал одягає робочий комбінезон з плащівки або іншої тканини з низькою теплопровідністю. Комбінезон повинен повністю закривати ноги та руки, мати довгі рукави та щільно прилягати до тіла для запобігання втикання бризків під одяг.
2. Шкіряна спецодяг для вогнетривких операцій — при роботі з особливо гарячими матеріалами рекомендується використання спецодягу з вогнетривкої тканини (наприклад, шкіри товщиною 1,5-2 мм). Такий одяг витримує короткочасний контакт з гарячими бризками без пропалювання.
3. Захисні рукавиці — шкіряні або спеціальні вогнетривкі рукавиці довжиною мінімум до верхньої третини передпліччя. Рукавиці повинні бути щільно облягаючими, щоб запобігти втиканню бризків під них.
4. Захисні чоботи — ноги захищаються виробничими чоботами з плащівки чи шкіри з металевим носком та металевою пластиною під підошвою для захисту від цвяха чи гострих предметів. Чоботи повинні мати щільне прилягання до ноги для запобігання втиканню бризків.
5. Відстань від матеріалу — під час різання персонал повинен залишатися на відстані мінімум 30-50 см від матеріалу та сопла, щоб виключити прямого контакту з плазмовим струменем та розплавом.
6. Положення тіла під час роботи — персонал повинен займати позицію, при якій тіло не знаходиться прямо в напрямку вимітання бризків з матеріалу. Оптимально, коли бризки вимітаються в напрямку від оператора або убік від нього.

7. Першорядно-медична допомога при опіках — при виникненні опіків необхідно негайно охолодити уражену ділянку холодною водою протягом 10-15 хвилин. Це сприяє зниженню температури тканин та зменшенню глибини опіку. Після охолодження опік накривається стерильною (або чистою) тканиною та забезпечується медична допомога. При опіках третього-четвертого ступеня необхідно викликати швидку допомогу.

4.3 Організаційні та технічні заходи безпеки

Розташування та конструкція робочої зони:

1. Відокремлення робочої зони — робоча зона для проведення експериментів з плазмового різання повинна бути фізично відокремлена від інших робочих місць та зон відпочинку персоналу. Це запобігає невіпадковому потраплянню сторонніх осіб в небезпечну зону.
2. Розташування компресора — поршневий компресор B5900/200CT5,5 встановлюється в окремому приміщенні або за перегородкою на відстані мінімум 3-5 метрів від основної робочої зони. Це забезпечує зменшення рівня шуму на робочому місці оператора. Компресор повинен мати віброізоляцію для зменшення передачі вібрацій на підлогу та прилеглі конструкції будівлі.
3. Система вентиляції та вилучення диму — над робочим столом встановлюється витяжна система з вентилятором та фільтрами. Витяжний зонд розташовується щодо близько до місця розрізу для максимальної ефективності. Повітря, яке витягується, проходить через багатоступінчасту фільтрацію (первинна фільтрація грубих частинок, фільтрація дрібних аерозолів, адсорбційна фільтрація газів) перед викидом в атмосферу.
4. Робочий стіл та навколишня територія — робочий стіл та територія навколо нього повинні підтримуватися в абсолютній чистоті та порядку. Дроти, шланги, кабелі повинні укладатися вздовж стіни або під столом,

щоб не створювати перешкод для руху персоналу. На столі не повинно бути непотрібних предметів, які можуть перешкоджати роботі.

5. Освітлення — робоча зона повинна мати достатнє штучне освітлення (мінімум 500 люксів), яке дозволяє чітко видити матеріал та органи управління апарату. Джерелами освітлення служать люмінесцентні лампи або світлодіодні світильники, розташовані над робочою поверхнею. При роботі з плазморізом необхідно користування автоматичного затемнення окулярів для захисту від яскравого світла дуги.

ВИСНОВКИ ПРОПОЗИЦІЇ

1. Тиск плазмоутворювального газу є одним із ключових параметрів, що визначає термодинамічні характеристики плазмового струменя, його стабільність та ефективність видалення розплавленого металу.
2. Для тонкого металу (2 мм) підвищення тиску призводить до турбулентного розширення плазмового струменя, що викликає збільшення ширини різку на верхній поверхні (з 2,23 мм до 2,64 мм) та розміру отвору пробивки (з 3,04 мм до 3,26 мм).
3. Для товстого металу (5 мм) підвищення тиску сприяє кращій фокусуванню струменя, що призводить до зменшення ширини різку на верхній поверхні (з 2,57 мм до 2,13 мм) та розміру отвору (з 3,17 мм до 2,75 мм).
4. Ширина різку на нижній поверхні для обох товщин зростає з підвищенням тиску, що свідчить про покращення проплавлення по всій глибині.
5. Для товщини 5 мм найкраща точність (відхилення менше 0,2 мм) досягається при тиску 7 атм. При зниженні тиску до 4 атм відхилення розмірів зростає до 0,8 мм.
6. Для товщини 2 мм спостерігається менша точність відтворення дрібних елементів (отвір Ø20 мм має відхилення до 0,5 мм при 7 атм) через високу теплову деформацію та розширення різку.
7. Для товщини 5 мм підвищення тиску з 4 до 7 атм дозволяє зменшити конусність з 3–5° до менше ніж 0,5°.
8. Виявлено протилежну залежність: для товщини 5 мм підвищення тиску зменшує кількість грату, покращуючи його видалення. Натомість для товщини 2 мм підвищення тиску призводить до збільшення кількості грату через надмірне видування та розбризкування розплаву.
9. Для різання сталі товщиною 2 мм рекомендовано використовувати знижений тиск (4–5 атм) для зменшення ширини різку, мінімізації грату та запобігання надмірному розширенню отворів.

10. Для різання сталі товщиною 5 мм рекомендовано використовувати підвищений тиск (6–7 атм) для забезпечення мінімальної конусності, високої точності розмірів та чистоти поверхні без грату.
11. Впровадження розроблених рекомендацій дозволяє зменшити обсяг подальшої механічної обробки деталей (зачищення грату, виправлення розмірів), знизити кількість браку та підвищити продуктивність процесу на 15–20%.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Порізка металу плазмою з ЧПУ на замовлення в Україні - АВ метал груп :URL: <https://avmg.ua/uslugi/metaloobrobka/plazmennaya-rezka-metalla/> (дата звернення: 12.10.2025).
2. Принцип роботи плазморізу :URL: <https://dnipro-m.ua/news/plazmorezstroenie-princzip-raboty-vybor-apparata/> (дата звернення: 12.10.2025).
3. Компресор у системі плазмової :URL: <https://effectenergy.com.ua/ua/produksiia/aparaty-plazmovo-rizky.html> (дата звернення: 12.10.2025).
4. Система різання з ЧПУ EX-TRACK :URL: <https://www.ex-trafire.com/uk/> (дата звернення: 12.10.2025).
5. Portable CNC Cutting System EX-TRACK CNC URL: https://ex-track.com/wp-content/uploads/2023/12/EX-TRACK_Operator_manual_FW_3.0_and_1.3.4_EN.pdf (дата звернення: 20.10.2025).
6. EX-TRACK CNC, технічні дані URL: https://ex-track.com/wp-content/uploads/2022/12/FACT_SHEET_EX-TRACK_EN.pdf (дата звернення: 20.10.2025).
7. Василенко А.М. Матеріалознавство та технологія металів: підручник для здобувачів професійної освіти. Київ, Літера ЛДТ, 2019, 224 с.
8. Кузін О. А., Металознавство та термічна обробка металів / О. А. Кузін, Р. А. Яцюк. - Львів : Афіша, 2002. – 304 с.
9. Металознавство: підручник / О. М. Бялік, В. С. Черненко [та ін.]; - 2-ге вид., перероб. і доп. – К. : ІВЦ Видавництво “Політехніка”, 2002. – 384 с.
10. Пахолюк А. П. Основи матеріалознавства і конструкційні матеріали : посібник / А. П. Пахолюк, О. А. Пахолюк. – Львів : Світ, 2005. – 172 с.
11. Попович В. В. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство : підручник / В. В. Попович, В. В. Попович. – Львів : Світ, 2006. – 624 с.
12. Матеріалознавство : підручник / С. С. Дяченко, І. В. Дощечкіна, А. О. Мовлян, Е. І. Плешаков; за ред. проф. С. С. Дяченко. – Харків : ХНАДУ, 2007. - 440 с.

- 13.Металознавство і термічна обробка металів і сплавів із застосуванням комп'ютерних технологій навчання: підручник / Ю.М. Таран, Є. П. Калінушкін, В. З. Куцова [та ін.]; під ред. Ю. М. Тарана – Дніпропетровськ : Дніпрокнига, 2002. - 360 с.
- 14.Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів: навчальний посібник / В. В. Хільчевський, С. Є. Кондратюк, В. О. Степаненко [та ін.]. - К. : Либідь, 2002. - 328 с.
- 15.Грибан В. Г., Негодченко О. В. Охорона праці: навч. посібник, [для студ. Г 82 вищ. навч. закл.] / В. Г. Грибан, О. В. Негодченко — К.: Центр учбової літератури, 2009. - 280 с.
- 16.Безпека життєдіяльності та охорона праці: практикум / уклад. Тимочко В.О., Городецький І.М., Березовецький А.П. та ін. – Львів: Сполом, 2022. – 376 с.
- 17.Охорона праці (гігієна праці та виробнича санітарія): навч. посіб. / Пістун І.П., Березовецький А.П., Тимочко В.О., Городецький І.М. та ін.; за ред. І.П. Пістуна. – Львів: Тріада плюс, 2017. – Ч. І. – 620 с.
- 18.Дацишин О.В., Ткачук А.І., Гвоздєв О.В. Технологічне обладнання зернопереробних та олійних виробництв: навч. посібник / за ред. О. В. Дацишина. — Херсон: ХДАУ, 2018. — 248 с.
- 19.Інструкція з безпеки та експлуатації для системи плазмового різання
URL: https://ex-track.com/wp-content/uploads/2022/12/EX-TRACK_CNC_OXY_manual_ML.pdf (дата звернення: 02.11.2025).