

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій  
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки  
(повна назва)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**Пояснювальна записка**

Другий (магістерський)  
(рівень вищої освіти)

Розробка автоматизованого технологічного процесу зварювання металевих виробів  
(тема)

Виконав:  
здобувач 2023 року навчання,  
групи КІПВМ-23-3

Максимов Дмитро Максимович  
(прізвище, ініціали)

Спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка  
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва  
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Андрусевич А.О.  
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту  
Зав. кафедри КІТАР

Невлюдов І. Ш.  
(прізвище, ініціали)

(підпис)

(прізвище, ініціали)

2025 р.

Я, як студент ХНУРЕ Максимов Дмитро Максимович, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надав і не одержав недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Дата  
20.01.25

ПІБ  
Максимов Д.М.

## ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет \_\_\_\_\_ АКТ \_\_\_\_\_  
 Кафедра \_\_\_\_\_ КІТАР \_\_\_\_\_  
 Рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ другий (магістерський) \_\_\_\_\_  
 Спеціальність 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та  
робототехніка \_\_\_\_\_  
 Тип програм \_\_\_\_\_ освітньо-професійна \_\_\_\_\_  
 Освітня програма Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва  
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КІТАР \_\_\_\_\_  
(підпис)

«30» серпня 2024 р.

ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві \_\_\_\_\_ Максимову Дмитру Максимовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка автоматизованого технологічного процесу зварювання  
металевих виробів.

Затверджена наказом по університету від 22.11.2024. № 1231 Ст.

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 20.01.2025

3. Вихідні дані до роботи: \_\_\_\_\_

3.1 Види зварювання; \_\_\_\_\_

3.2 Технологія TIG-зварювання; \_\_\_\_\_

3.3 Програма IBM SPSS 26 для побудови регресійної моделі; \_\_\_\_\_

3.4 Проведення досліджень впливу параметрів зварювання на міцність зварного  
шва.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі:

4.1 Вступ; \_\_\_\_\_

4.2 Аналіз предметної області; \_\_\_\_\_

4.3 Опис макету для дослідження; \_\_\_\_\_

4.4 Проведення експериментальних досліджень; \_\_\_\_\_

4.5 Охорона праці; \_\_\_\_\_

4.6 Висновки. \_\_\_\_\_

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів)

Демонстраційний матеріал у вигляді презентації формату PowerPoint (\*.ppt) 17 с. формату А4

6. Консультанти розділів роботи

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання	01.09.2024	виконано
2	Збір матеріалів для дослідження	25.09.2024	виконано
3	Розробка розділу «Аналіз предметної області»	09.10.2024	виконано
4	Розробка розділу «Опис макету для дослідження»	15.10.2024	виконано
5	Розробка розділу «Проведення експериментальних досліджень»	03.11.2024	виконано
6	Розробка розділу Охорона праці	28.11.2024	виконано
7	Оформлення кваліфікаційної роботи	06.12.2024	

Дата видачі завдання

02.09.2024

Здобувач

\_\_\_\_\_ Максимов Д.М.  
(підпис) (прізвище, ініціали)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ проф. Андрусевич А.О.  
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 94 с., 16 табл., 32 рис., 5 дод., 23 джерело.

### TIG-ЗВАРЮВАННЯ, ПАРАМЕТРИ ЗВАРЮВАННЯ, ЗВАРНИЙ ШОВ, РЕГРЕСІЙНА МОДЕЛЬ.

Мета роботи – підвищення якості зварного шва шляхом визначення впливу параметрів зварювання на міцність зварних з'єднань.

Об'єкт дослідження – процеси зварювання метала.

Предмет дослідження – технологія створення нероз'ємних з'єднань з металами.

В ході виконання кваліфікаційної роботи був проведений аналіз видів зварювання, розглянуті такі типи, як TIG, MMA, MIG. Для проведення досліджень розглянуто макет для перевірки залежності параметрів зварювання за технологією TIG.

В результаті дослідження таких чинників, як товщина металевих листів, зварювальний струм та кут зварювання, побудована регресійно-кореляційна модель, яка показує вплив параметрів зварювання на міцність зварного шва.

Отримані результати можуть бути використані при організації та налаштуванні автоматизованого процесу зварювання.

Також, отримані результати роботи можна віднести до Цілі сталого розвитку 9 «Промисловість, інновації та інфраструктура», а саме п.9.4 «Високотехнологічне машинобудування».

## ABSTRACT

Explanatory note: 94 p., 16 tabl., 32 pic., 5 applications, 23 sources.

TIG WELDING, WELDING PARAMETERS, WELDING SEAM,  
REGRESSION MODEL.

The object of research improving weld quality by determining the influence of welding parameters on the strength of welded joints..

The object of research is metal welding processes.

The subject of research is the technology of creating inseparable connections with metals.

In the course of the qualification work, an analysis of welding types was carried out, such types as TIG, MMA, MIG were considered. To conduct research, a layout was considered for checking the dependence of TIG welding parameters.

As a result of the study of such factors as the thickness of metal sheets, welding current and welding angle, a regression-correlation model was built, which shows the influence of welding parameters on the strength of the weld.

The obtained results can be used in the organization and adjustment of the automated welding process.

Also, the obtained work results can be attributed to the Sustainable Development Goal 9 "Industry, innovation and infrastructure", namely item 9.4 "High-tech engineering".

## ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень .....	9
Вступ .....	10
1 Аналіз предметної області .....	12
1.1 Основні види зварювання .....	13
1.1.1 Ручне зварювання серед захисних газів (TIG) .....	13
1.1.2 Ручне дугове зварювання електродом .....	18
1.1.3 Плазмове зварювання .....	19
1.1.4 Напівавтоматичне зварювання .....	20
1.2 Трансформатори для зварювання .....	21
1.3 Висновки до першого розділу .....	23
2 Розробка стенду для досліджень .....	25
2.1 Розробка стенду для досліджень .....	25
2.2 Комплектуючі макету .....	26
2.3 Підключення елементів керування .....	28
2.4 Конвертація значень напруги в навантаження .....	30
2.5 Розрахунок стійкості системи .....	32
2.6 Висновки до другого розділу .....	36
3 Проведення досліджень .....	37
3.1 Побудова плану експерименту .....	37
3.2 Визначення впливу зварювального струму на міцність зварних швів .....	37
3.3 Визначення впливу кута зварювання на міцність зварних швів .....	46
3.4 Побудова регресійно-кореляційної моделі .....	55
3.5 Висновки до третього розділу .....	58
4 Охорона праці .....	60
Висновки .....	69
Перелік джерел посилання .....	71
Додаток А Лістинг коду для калібрування та вимірювань зразка .....	74
Додаток Б Лістинг коду для конвертації вимірювань .....	76

Додаток В Результати досліджень .....	78
Додаток Г Абробачія наукових результатів досліджень .....	83
Додаток Д Демонстраційний матеріал.....	93

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ЗС – зварювальний струм;

КЗ – кут зварювання;

АС – Alternating Current;

MIG – напівавтоматичне зварювання серед інертних газів;

MMA – ручне дугове зварювання електродом, що плавиться;

TIG – ручне зварювання серед захисних газів.

## ВСТУП

На сьогодні точкове зварювання здобуло популярність як у промисловості, так і в побуті, оскільки воно ефективно вирішує навіть найскладніші завдання. Даний метод зварювання користується попитом не лише в домашніх умовах, але й у виробництві, адже здатен справлятися з найважчими викликами. Це один з найбільш універсальних і доступних способів зварювання металевих листів [1].

Точкове зварювання часто використовується в побутових цілях домашніми майстрами. Промислове обладнання для точкового зварювання можна використовувати в багатьох сферах. Його застосування включає зварювання складних металевих конструкцій і складання автомобілів, побутових предметів, таких як холодильники або телевізори. Точкове зварювання малими електродами здатне утворювати плями припою на невеликих ланцюгах без зниження продуктивності. У промисловому секторі більшість великих компаній використовують автоматичне обладнання, напівавтоматичне частіше використовується в домашніх умовах. Найбільше відповідний метод точкового зварювання підходить для чорних і кольорових металів [2]. Дана технологія підходить для будь-якої обробленої деталі: одинарної товщини, кованої або різаної, штампованої або катаної. Завдяки хімічним властивостям чорних і кольорових металів, їх з'єднання окремими точками зварювання, а не одним цілісним з'єднанням (швом), збільшує площу з'єднання, робить її міцніше і знижує ризик механічних пошкоджень при експлуатації [3] – [4].

У роботі буде описано види зварювання, проаналізовані їх особливості, переваги та недоліки. В експериментальній частині роботи буде проведено розрахунки залежності міцності зварного шва від параметрів зварювання,

таких як струм, кут зварювання, товщина металевих листів.

Мета роботи – побудова моделі впливу параметрів зварювання на міцність зварних з'єднань.

Об'єкт дослідження – процеси зварювання метала.

Предмет дослідження – технологія створення нероз'ємних з'єднань з металами.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- виконати аналіз методів для зварювання металів;
- розглянути характеристики макету для дослідження;
- розглянути елементну базу макету, його компоновку, способи взаємодії з макетом;
- побудувати план експериментів;
- обрати параметри зварювання, які включити у модель для дослідження їх впливу;
- побудувати регресійно-кореляційну модель впливу параметрів зварювання на міцність зварних швів.
- оформити пояснювальну записку згідно з рекомендаціям та вимогами ДСТУ 3008:2015.

Пояснювальну записку виконано згідно з [5] – [7]. За результатами проведених досліджень опублікована теза доповідь в студентському збірнику Виробництво і мехатронні системи 2024.

## 1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

Зварювання – це технологічний процес, спрямований на досягнення нерозривного зв'язку матеріалів шляхом встановлення міжатомних зв'язків між зварюваними деталями як при місцевій, так і при пластичній деформації зварюваних частин, або за рахунок їх спільної дії.

Зварюванням з'єднують однорідні та різнорідні метали та їх сплави, метали, в тому числі деякі неметалічні матеріали (пластмасу, графіт, кераміку, скло та ін.).

Зварювання є економічно вигідним, ефективним, продуктивним і в значній мірі автоматизованим технологічним процесом, що знаходить широке застосування майже в усіх сферах машинобудування [2].

Фізична природа процесу зварювання полягає в утворенні міцних зв'язків між молекулами і атомами на з'єднаних поверхнях деталей.

Для утворення сполук потрібно виконати наступні умови: очистити поверхні заготовок від адсорбованих на них домішок, оксидів і сторонніх атомів; активізувати енергію поверхневих атомів, полегшуючи їх взаємодію один з одним; розташувати зварні поверхні на відстані, що еквівалентна відстані між атомами в деталях, що зварюються.

Існує велика кількість методів зварювання залежно від товщини, матеріалу тощо.

Основні типи зварювання:

- ручне зварювання серед захисних газів (TIG);
- ручне дугове зварювання електродом, що плавиться (MMA);
- плазмове зварювання;
- напівавтоматичне зварювання.

## 1.1 Основні види зварювання

### 1.1.1 Ручне зварювання серед захисних газів (TIG)

TIG-зварювання (Tungsten Inert Gas), також відоме як аргонодугове зварювання або зварювання неплавким електродом в середовищі інертного газу, – це один із найбільш точних і універсальних методів зварювання. Зварювання плавленням, під час якого дуга та розплавлений метал, а іноді і застигаючий шов, перебувають у оточенні захисних газів. Газ вводиться через пальник (іноді доповнюється окремими пристроями) безпосередньо в зону зварювання або ним заповнюють стаціонарні і накидні камери, у яких перебувають зварні вироби.

Зазвичай в якості газу для спалювання бруду і оксидів під час роботи використовують аргон або гелій з невеликою домішкою кисню, що створюють захисне середовище навколо зони зварювання, для запобігання контакту розплавленого металу з киснем, азотом та іншими шкідливими компонентами повітря. Це забезпечує високу якість зварювального шва. Зварювання проводять електродом з вольфраму, який має дуже високу температуру плавлення (понад 3400 °C), що використовується для створення дуги яка плавить метал. Додатковий присадний матеріал може використовуватися для створення шва, залежно від типу зварюваних матеріалів та методу. Присадний дріт вводиться вручну або автоматично (рисунок 1.1).

Процес зварювання відбувається наступним чином:

- зварювальник підводить електрод до деталі, створюючи електричну дугу між вольфрамовим електродом і металом. Ця дуга нагріває метал до стану плавлення;
- захисний газ подається через зварювальний пальник, захищаючи зварювальну ванну;
- за потреби можна додавати присадний матеріал для формування

зварювального шва. У деяких випадках зварювання може проводитися без присадного матеріалу (автогене зварювання) [4].



Рисунок 1.1 – TIG зварювання

Якість зварювання цим методом дуже висока, компоненти сплаву мають низьку температуру плавлення, а добавки сплаву не горять, ванна для зварювання захищена від кисню, що практично виключає утворення шлаку. При зварюванні майже завжди застосовують постійний струм прямої полярності, лише для алюмінію використовують змінний струм або зворотну полярність: таким чином краще руйнується оксидна плівка [7].

Незважаючи на те, що цей спосіб досить дорогий і не відрізняється високою швидкістю роботи, він дуже популярний і іноді незамінний при зварюванні металу в тих випадках, коли обсяг роботи невеликий або коли немає можливості провести автоматизацію процесу (рисунок 1.2).

Перевагами газового зварювання є:

- висока якість зварного шва з мінімальною кількістю дефектів, таких як пори, шлакові вclusions або бризки;
- можливість зварювання тонких матеріалів – цей метод дозволяє точно контролювати кількість тепла, що робить його ідеальним для зварювання тонких листів металу;
- зварювання широкого спектра матеріалів – TIG-зварювання підходить

для зварювання нержавіючої сталі, алюмінію, міді, титану та інших металів, включаючи кольорові сплави;

- чистота зварювальної зони – завдяки використанню інертного газу зварювальна ванна добре захищена від впливу атмосфери, що мінімізує ризик окислення;

- недорогі витратні матеріали (водень, пропан, метан, етилен, бензол, бензин);

- простота методів регулювання горіння;

- висока виробнича потужність.

Недоліками цього методу є:

- низька ефективність нагріву металу;

- низька швидкість зварювання – у порівнянні з іншими методами (MIG або ручне дугове зварювання), процес TIG-зварювання значно повільніший;

- висока складність процесу – TIG-зварювання потребує високої кваліфікації зварювальника. Важливо вміти точно контролювати дугу, тримати присадний дріт під правильним кутом і забезпечувати безперервну подачу газу;

- дороге обладнання – апарати для TIG-зварювання та вольфрамові електроди коштують дорожче в порівнянні з іншими методами зварювання;

- низька продуктивність;

- складність автоматизації процесу.

TIG-зварювання часто використовують в авіаційній та комірній промисловості, завдяки високій точності. Через чистоту та високу якість швів цей метод добре підходить для виготовлення обладнання для харчової, медичної та автомобільної промисловостей.

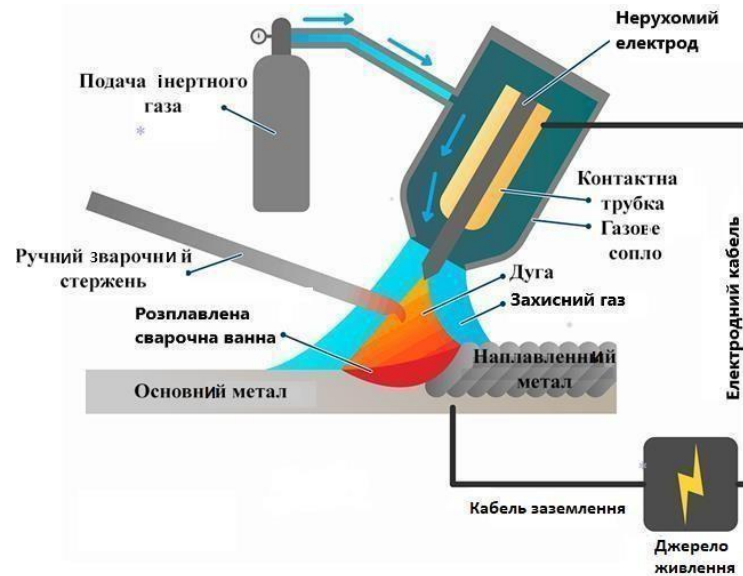


Рисунок 1.2 – Схема ручного зварювання серед захисних газів (TIG)

TIG-зварювання є ідеальним вибором, коли потрібна висока точність і чистота шва. Хоча цей метод може бути більш повільним і складним у виконанні, він незамінний для зварювання високоякісних конструкцій із різних металів. Цей метод дуже подібний до методу MIG зварювання, проте має суттєві відмінності (рисунок 1.3).

Зварювання електродом, що не плавиться, в середовищі захисного газу (TIG/GTAW) і зварювання електродним дротом в інертних газах (MIG/GMAW) – це способи зварювання, розроблені на початку 1940-х років у відповідь на зростання попиту на озброєння. TIG був розроблений насамперед для авіаційної індустрії, а MIG був розроблений для збільшення швидкості виробництва зброї.

Зварювання TIG використовує вольфрамовий електрод. Він не витрачається під час зварювання, лише вимагає невеликого заточування. Цей метод використовує аргон, суміш аргону та водню або газову суміш аргону та гелію для забезпечення захисту. Зварювання TIG рекомендується для таких матеріалів, як магній, алюміній та мідні сплави, а також тонкі шматочки нержавіючої сталі. З іншого боку, зварювання MIG добре працює на сталях, тому що це один із найшвидших способів зварювання. Зварювання MIG

використовує металевий електрод, який подвоюється як наповнювач для зварювання та споживається під час процесу. При зварюванні MIG газ аргону використовується окремо або у поєднанні з киснем, двоокисом вуглецю або гелієм [8].

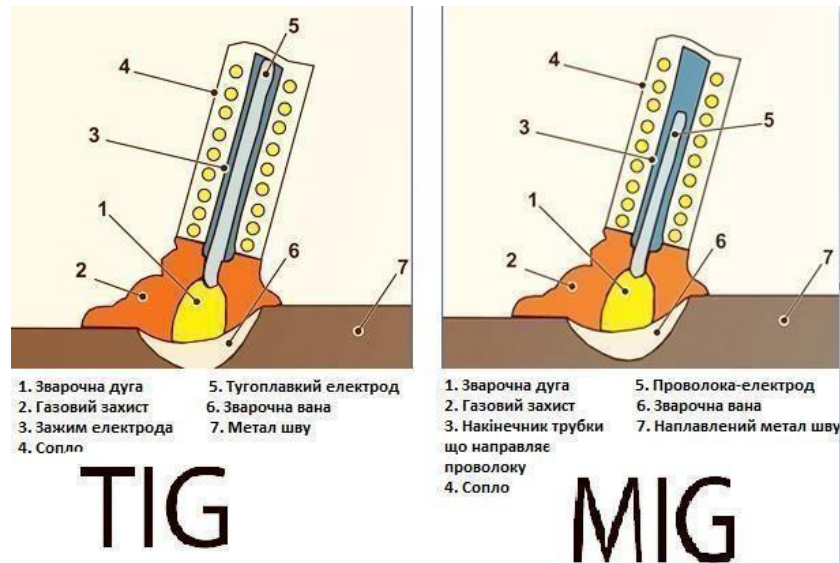


Рисунок 1.3 – Різниця зварювання методами TIG та MIG

Особливості MIG зварювання:

- більші виробничі потужності за рахунок зварювання більш довгих швів;
- зварювальна апаратура дешевша;
- підходить для напівпрофесійного використання, адже не потребує особливих навичок;
- менш вибагливе до очищення компонентів.

Особливості TIG зварювання:

- більш якісні і надійніші зварні шви;
- можливість контролювання температури електрода, що призводить до меншої кількості помилок при роботі;
- відсутність бризк;
- нижча швидкість осадження.

В цілому, зварювання TIG складніше, ніж зварювання MIG, тому що між електродом, наповнювачем та заготівлею повинні підтримуватись більш жорсткі допуски. Незважаючи на те, що зварювання MIG менш складне і більше підходить для напівпрофесійного використання, зварювання TIG виробляє зварні шви найвищої якості, але потребує більше компонентів та відповідної кваліфікації.

### 1.1.2 Ручне дугове зварювання електродом

Найбільш поширений вид зварювання, в якому електродом виступає дріт, вкритий обмазкою (рисунок 1.4).



Рисунок 1.4 – ММА зварювання

У процесі плавлення дріт поєднує зварювані деталі, поки покриття (шлак) захищає зварювальну ванну від впливу кисню, а також сприяє покращенню характеристик дуги і якості зварного шва [9]. Зазвичай цей метод використовують для зварювання чорних металів, чавуну та деяких видів кольорових металів і сплавів, але досить складно досягти міцного з'єднання в такому випадку: легкоплавкі складники сплавів згорають, отже з'єднання є не дуже високої якості.

Перевагами методу електродугового зварювання є висока виробнича

потужність, великі можливості механізації або автоматизації, невелика зона теплового впливу в порівнянні з іншими методами зварювання, легке налагодження процесу, відносно недорогі витратні матеріали, велика продуктивність процесу [10].

Недоліками є потреба використовувати спеціальні зварювальні перетворювачі (випрямлячі, інвертори) і зварювальні трансформатори, енергозалежність від електричної системи або генератора, необхідність заздалегідь підготовлювати кромки (обробка, очищення деталей).

### 1.1.3 Плазмове зварювання

Джерелом тепла при цьому виді зварювання є плазмовий струмінь, який утворюється при іонізації робочого газу між електродами, одним з яких може бути зварюваний виріб, або коли обидва електроди розташовані у плазмовому пальнику – плазмотроні (рисунок 1.5).

У промисловому виробництві ці два методи часто використовуються для облицювання та різання, а не для фактичного зварювання [11].

Перевагами плазмового зварювання є висока концентрація тепла, хороша стійкість до горіння, можливість зварювати деталі товщиною до 10 мм без попередньої підготовки кромки, можливість проводити роботи на малих струмах при мікроплазмовому зварюванні тонких деталей (товщина матеріалу від 0,01 мм до 0,8 мм), здатність ефективно різати більшість видів матеріалів, здатність виконувати напилення або наплавлення при введенні в плазмову дугу присадочного металу (в тому числі вогнетривків), здатність зварювати метали з неметалами, мінімальна зона теплового впливу, можливість проводити роботи з тугоплавкими і жаростійкими металами, високі виробничі можливості технологічного процесу та його автоматизації.

До недоліків плазмового методу відносять високочастотні перешкоди ультразвуку, оптичне випромінювання (інфрачервоне, ультрафіолетове, видимий спектр), надмірна іонізація повітря, виділення парів металу при

зварюванні, короткий термін служби насадки паяльника через високі температури, спеціальні вимоги до монтажу та висококваліфікований обслуговуючий персонал.

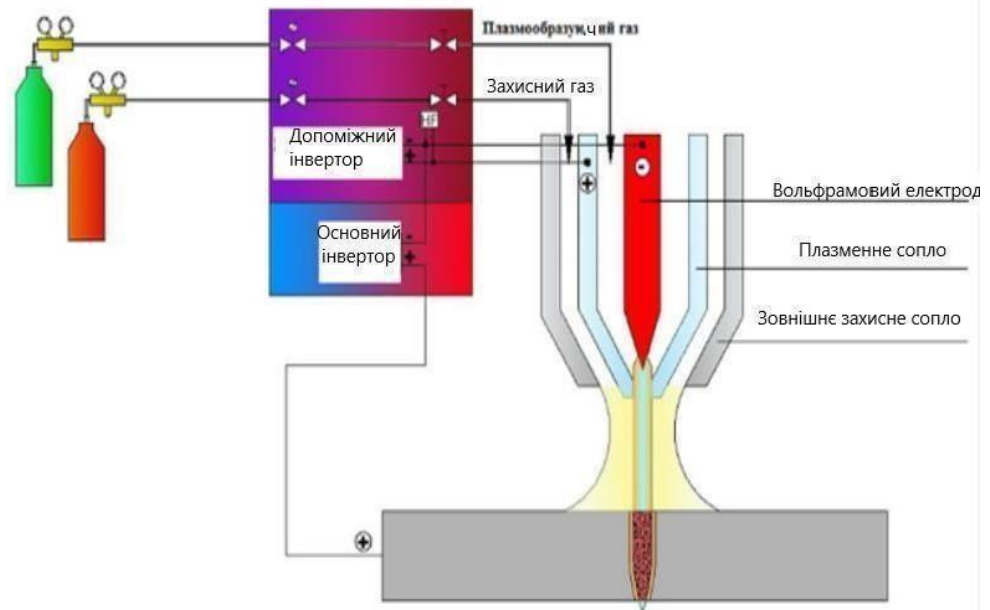


Рисунок 1.5 – Схема промислового апарату плазмового зварювання

#### 1.1.4 Напівавтоматичне зварювання

При цьому виді зварювання роль електроду зазвичай виконує зварювальний дріт, який автоматично надходить в зону зварювання, але можливе також зварювання неплавким електродом [12]. Пристрій переміщається вручну. Зварювання ведеться постійним або імпульсним струмом, при зварюванні застосовують інертні (MIG) або активні (MAG) захисні гази, а при зварюванні порошковим дротом газ не потрібен [13]. Зварювання MMA більше підходить для зварювання великих обсягів металу. Сфери застосування напівавтоматів – зварювання тонких листів, високолегованих сталей, кольорових металів, промислове застосування (рисунок 1.6).

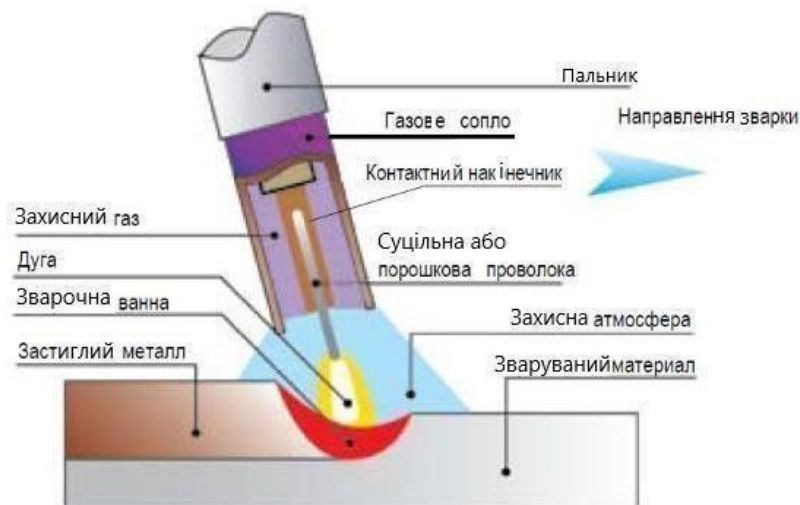


Рисунок 1.6 – Схема напівавтоматичного зварювання

## 1.2 Трансформатори для зварювання

Зварювальний трансформатор – це пристрій, який використовується для перетворення змінного струму для досягнення оптимальних параметрів зварювання (рисунок 1.7).

Для забезпечення безперебійної роботи пристрій знижує вхідну напругу від напруги мережі ( від 220 В до 380 В) до напруги 60 В до 75 В [14].

Основним завданням пристрою є перетворення високих вхідних напруг в більш низькі, оптимальні для роботи.

Внаслідок цього збільшується сила струму в обмотці, чого достатньо для плавлення металу.

Зварювання за допомогою трансформаторів проводиться наступним чином:

- струм надходить у первинну обмотку високої напруги, створюючи магнітне поле змінного характеру;
- магнітний потік проходить через сердечник, що направляє його на вторинну обмотку, мінімізуючи індуктивні втрати;

- магнітна індукція створює електрорушійну силу, яка обертає електрони металу та створює постійний струм;
- внаслідок збільшення кількості витків у вторинній обмотці знижується напруга та збільшується сила струму;
- замикання металів на електродах утворює рівномірну дугу, внаслідок чого частинки металу переносяться на деталі, що зварюються.



Рисунок 1.7 – Схема зварювального трансформатора

Зварювальні трансформатори мають такі переваги:

- висока продуктивність;
- здатність зварювати товсті металеві заготовки;
- великий експлуатаційний строк;
- простота використання.

Більшість апаратів для зварювання перетворюють струм з постійного на змінний. Це робиться для загоряння дуги [15].

Трансформатори дозволяють проводити роботи з постійним струмом, отже треба лише підлаштувати струм до необхідних умов.

Принцип роботи трансформаторів для зварювання заснований на звичайних фізичних процесах. Перш за все електричний струм подають на

першу котушку, внаслідок чого створюється магнітне поле. Це надає електронам спрямований рух, що зумовлений електрорушійною силою (ЕРС).

Струм, що протікає по спіралі первинної котушки, проходить через сердечник і досягає вторинної обмотки, на якій кількість витків є меншою ніж на першій, внаслідок чого зменшується вихідна напруга. Цю роботу виконує трансформаторний вузол [16].

Для регулювання сили струму потрібно змінювати відстань між обмотками. Коли вторинна котушка дроту наближається до першої котушки, сила струму зростає. Також існують трансформатори з різною конфігурацією, в яких вторинна обмотка жорстко закріплена, а сердечник рухається.

Під час роботи зварювальна система піддається постійному навантаженню. Однак його перевага в тому, що він може працювати навіть у режимі простою.

Після формування шва ланцюжок розмикається. Пристрій перейде в режим очікування (простою).

Напруга холостого ходу створюється електрорушійними силами, що замикаються в повітряних отворах між витками. Експлуатація таких пристроїв вважається безпечною. Діапазон однопольного індикатора становить від 48 В до 70 В і не повинен перевищувати прийняті стандарти.

У небезпечних випадках використовуються обмежувачі, які спрацьовують автоматично після закінчення процесу зварювання. Для безпечної роботи прилад повинен бути забезпечений заземленням [17].

### 1.3 Висновки до першого розділу

Було розглянуто зварювання як технологічний процес, його основні типи, такі як:

- ручне зварювання серед захисних газів (TIG);
- ручне дугове зварювання електродом, що плавиться (MMA);

- плазмове зварювання;
- напівавтоматичне зварювання.

Було наведено переваги та недоліки кожного з перерахованих методів, особливості їх роботи.

Детально розглянули процес ручного зварювання серед захисних газів, визначали відмінності між TIG та MIG зварюванням, визначили їх компоненти, різницю в підходах до роботи.

## 2 РОЗРОБКА СТЕНДУ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 2.1 Розробка стенду для досліджень

Для проведення досліджень впливу параметрів зварювання TIG на міцність зварного з'єднання, необхідно тестовий стенд, який би дозволяв би змінювати навантаження та тестові зразки [18]. За основу стенда була взято метод перевірки гнучкості за допомогою тензоперетворювача (рисунок 2.1).

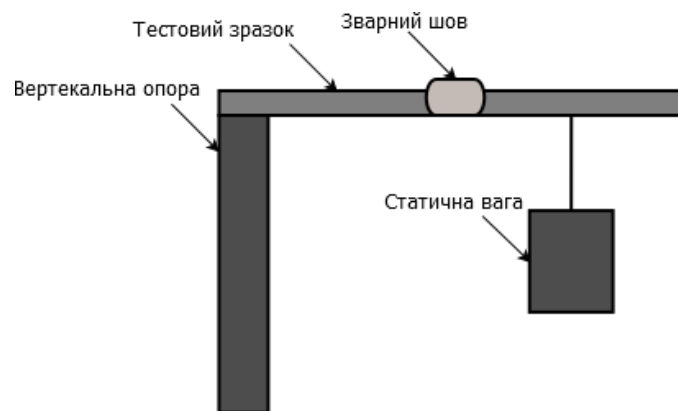


Рисунок 2.1 – Схема стенду

Це схема випробувального стенда для тестування міцності зварного з'єднання. Конструкція побудована на основі вертикально закріпленого верстатного профілю. Основні елементи стенду.

Вертикальна опора – основа конструкції, яка утримує всі елементи. Він прикріплений до стабільної платформи або підставки внизу, забезпечуючи стійкість стенду.

Кріплення деталі – елемент, який фіксує тестову деталь. Кріплення прикріплене до верстатного профілю таким чином, щоб забезпечити стабільність деталі під час випробувань.

Деталь для тестування – сама деталь, яка піддається випробуванням на міцність. Вона розташована в точці фіксації й призначена для витримування

навантажень.

Статична вага – вантаж, який прикріплюється до тестової деталі або підвішується на неї для створення контрольованого навантаження. Вага забезпечує статичне навантаження на деталь, щоб оцінити її міцність при різних значеннях навантаження.

Цей макет дозволяє експериментально визначити механічний вигин тестового зразка, зокрема, здатність витримувати вагу в точці зварного з'єднання, що може бути критично важливим для розрахунку навантажень у реальних умовах використання [19].

## 2.2 Комплектуючі макету

В якості вертикальної опори, буде використовуватися верстатна станина, до якої за допомогою струбцин будуть фіксуватися тестові зразки різної товщини, та зварені при різних параметрах зварювання. Сам зразок представляє собою дві плоскі заготовки з'єднані між собою в стик з торцями по одній стороні (рисунок 2.2).

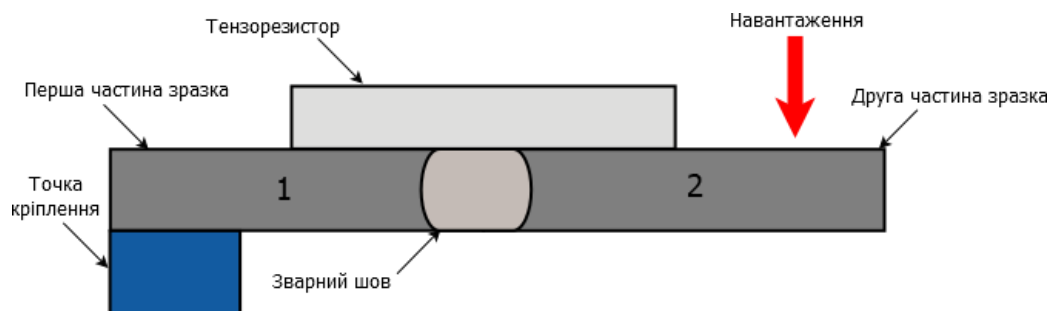


Рисунок 2.2 – Тестовий зразок

На тестовий зразок у точці зварного шва, встановлюється тензорезистор YZC13, який здатний вимірювати навантаження до 20 кг. Датчик являє собою прямокутний брусок з алюмінієвого сплаву, з отвором у центрі. На його бічні поверхні нанесені тонкоплівкові резистори, з'єднані за мостовою схемою, тому

резистивний датчик має 4 гнучкі виводи. Усі елементи датчика залиті епоксидним компаундом. На бруску передбачені різьбові отвори для кріплення його до основи і для встановлення пластини під вимірюваний вантаж [20]. На торцевому боці датчика нанесено маркування, що вказує максимальну вагу вимірюваного вантажу. Для того щоб резистори змінювали свій опір, тензометричний датчик повинен одним кінцем фіксуватися на основі, а на інший його кінець повинен діяти вантаж так, щоб виникла деформація бруска і, відповідно, плівкових резисторів. Для того щоб перетворити аналоговий сигнал з виходу тензорного датчика в двійковий код, застосовується аналого-цифровий перетворювач (АЦП) НХ711.

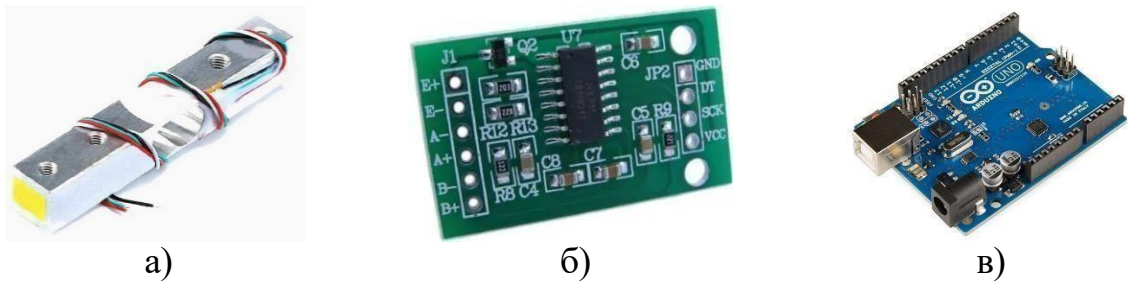
Інтегральна мікросхема НХ711 являє собою аналого-цифровий перетворювач з частотою дискретизації 24 біт і вбудованим малошумливим операційним підсилювачем. Мультиплексор дає змогу вибрати один із двох наявних вхідних каналів. Канал А має програмований вибір коефіцієнта посилення, який може бути 64 або 128. Канал В працює з попередньо встановленим коефіцієнтом, що дорівнює 32.

До складу мікросхеми входить інтегральний стабілізатор напруги, що виключає необхідність застосування зовнішнього стабілізатора [21]. На вхід синхронізації може бути подано будь-який імпульсний сигнал від зовнішнього джерела, водночас АЦП допускає роботу від вбудованого генератора. Основні технічні характеристики НХ711 наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Характеристики НХ711

Характеристика	Значення
Розрядність АЦП	24 біт
Посилення за входом, А	64 або 128
Посилення за входом, В	32
Частота вимірювань	10 або 80 разів на секунду
Напруга живлення, В	2,6–5,5
Споживаний струм, мА	10
Вхідна напруга, мВ	±40

Для опитування та отримання значень буде використовуватися плата керування Arduino Uno. На рисунку 2.3 наведені основні елементи контролю тестового зразка.



а – тензорезистор YZC13; б – модуль перетворення NХ711; в – плата керування Arduino Uno.

Рисунок 2.3 – Елементи для вимірювання навантажень на тестовому зразку

### 2.3 Підключення елементів керування

На платі з АЦП є два роз'єми – J1 та JP2, які використовуються для отримання аналогового сигналу

На роз'єми J1:

- E-, E+ – живлення тензорного моста;
- A-, A+ – диференційний вхід каналу, А;
- B-, B+ – диференційний вхід каналу, В.

На роз'єми JP2:

- GND, VCC – живлення;
- DT, SCK – інформаційні шини.

Оскільки резистори тензорного датчика ввімкнені за мостовою схемою, від пристрою відходять 4 провідники, що мають різне кольорове маркування. На два плеча моста подається опорна напруга, а з двох інших плечей знімається вихідна напруга, яка подається на вхід операційного підсилювача мікросхеми NХ711. Підключення за кольорами провідів здійснюється таким

чином:

- червоний – E+;
- чорний – E-;
- білий – A-;
- зелений – A+.

На рисунку 2.4 наведена схема підключення.

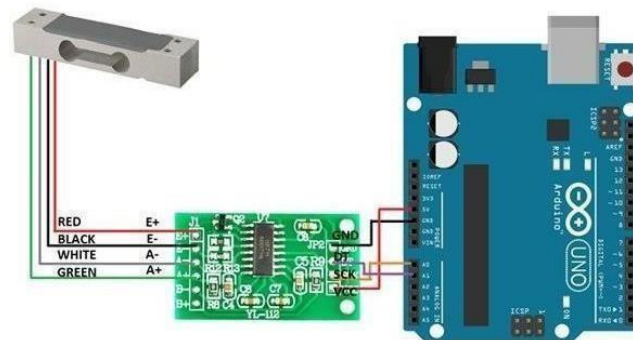


Рисунок 2.4 – Схема підключення елементів керування

Для подальшого опрацювання та передавання інформації здійснюється під'єднання HX711 до Ардуїно UNO. Для цього контакти живлення GND і VCC HX711 підключаються до точок GND і 5V роз'єму POWER модуля Arduino UNO, а контакти DT і SCK підключаються до точок A1 і A0 роз'єму ANALOG IN. Тензодатчик HX711 через контролер Arduino UNO можна під'єднати до рідкокристалічного дисплея LCD 1602 або до комп'ютера, використовуючи USB-порт і стандартні бібліотеки для Arduino.

Оскільки на виході вимірювального моста змінюється напруга, то саме вона перетворюється на бінарний код [22]. Діапазон контрольованих напруг залежить від обраного коефіцієнта посилення. Якщо коефіцієнт дорівнює 128, діапазон вимірюваних напруг варіюється від  $\pm 20$  мВ, вибір коефіцієнта посилення 64 визначає межі вимірювання від  $\pm 40$  мВ, а за коефіцієнта, що дорівнює 32, межі вимірювання визначаються величинами  $\pm 80$  мВ. Ці дані будуть коректними тільки за напруги живлення +5 V. Якщо вхідна напруга

вийде за нижню межу діапазону, АЦП видасть код 800000h, а якщо за верхню, то код буде 7FFFFFFh. Для калібрування та вимірювань використовується код наведений в Додатку А.

На рисунку 2.5 наведено перевірка роботи електронної складової стенду.

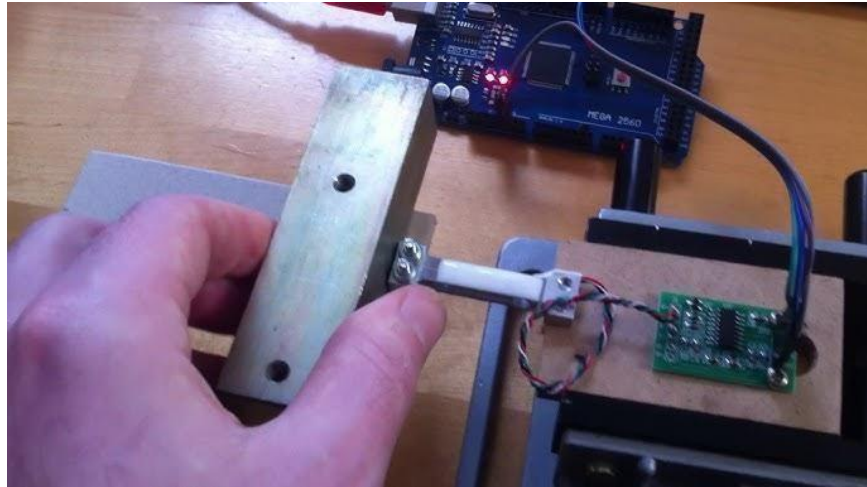


Рисунок 2.5 – Тестування електронної складової

#### 2.4 Конвертація значень напруги в навантаження

Для того щоб вірно конвертувати напруги з АЦП в значення навантаження, яке діє на тестовий зразок необхідно визначити тиск. Вважаємо, що є балка з певною масою та певним об'ємом, яка має одну точку фіксації. На неї діє додаткова сила  $F_{дон}$ , яка створює на ній тиск та змушує її вигинатися. На балці є тензорезистор, який заміряє вихідну напругу. В залежності від сили тиску буде змінюватися її значення.

Розрахунок загального тиску  $P_{заг}$ , створений додатковою масою, визначимо за формулою (2.1):

$$P_{заг} = \frac{F_{заг}}{S_б} \quad (2.1)$$

де  $P_{заг}$  – тиск на балку, Н/м<sup>2</sup>;

$F_{заг}$  – загальна сила, діюча на балку, Н;

$S_{б}$  – площа балки, м<sup>2</sup>.

Загальну силу  $F_{заг}$ , що діє на балку можна визначити за формулою (2.2):

$$F_{заг} = F_{б} + F_{доп} \quad (2.2)$$

де  $F_{б}$  – сила балки, Н;

$F_{доп}$  – сила що діє на балку, м<sup>2</sup>.

Сила яка діє на балку  $F_{б}$ , можна знайти за формулою (2.3):

$$F_{б} = \rho \times V \times g \quad (2.3)$$

де  $\rho$  – щільність матеріалу балку, кг/м<sup>3</sup>;

$g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;

$V$  – об'єм балки, м<sup>3</sup>.

Силу що діє на балку  $F_{доп}$ , можна знайти за формулою (2.4):

$$F_{доп} = m_{доп} \times g \quad (2.4)$$

де  $m$  – маса що діє на балку, кг.

Для зробити співвідношення між тиску у напругу, можна скористатися формулою (2.5):

$$U_{1Н/м^2} = \frac{U_{вим}}{P_{заг}} \quad (2.5)$$

де  $U_{вим}$  – значення напруги на виході тензоперетворювача, мВ.

Таким чином, в дослідженні будуть використовуватися параметри, внесені в таблицю 2.2.

Таблиця 2.2 – Вхідні данні для дослідження

Щільність заготовки матеріалу Ст3, ( $\rho$ ), кг/м <sup>3</sup>	Довжина заготовки, ( $l_0$ ), м.	Ширина заготовки, ( $b_0$ ), м.	Товщина заготовки, ( $h_0$ ), м.	Об'єм заготовки, ( $V$ ), м <sup>3</sup> .	Площа заготовки, ( $S_0$ ), м <sup>2</sup> .	Додаткова вага, ( $m_{дон}$ ), кг.
7850	0,1	0,04	0,001	0,000004	0,004	20
			0,002	0,000008		
			0,003	0,000012		
			0,004	0,000016		
			0,005	0,00002		
			0,006	0,000024		

Код конвертації значень напруги в тиск наведено в Додатку Б.

## 2.5 Розрахунок стійкості системи

Згідно із технічним завданням заносимо початкові дані до таблиці 2.3.

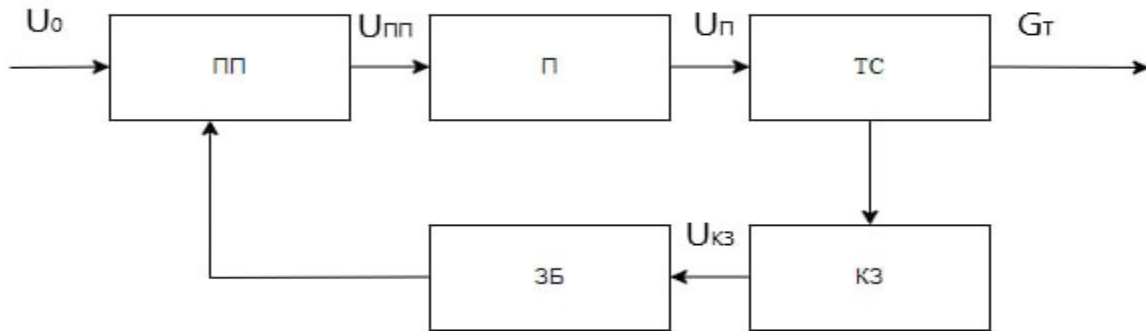
Таблиця 2.3 – Значення параметрів САУ

Найменування	Позначення	Значення
Коефіцієнт підсилення ЗБ	$K_{ЗБ}$	1500
Коефіцієнт підсилення ТС	$K_{ТС}$	1,2
Стала часу	$T_1$ [с]	1,25
Стала часу	$T_2$ [с]	0,4
Коефіцієнт підсилення КЗ	$K_{КЗ}$	0,0002
Стала часу ВП	$T_{ВП}$	0,02

До табл. 2.4 заносимо вимоги, яким повинна задовольняти вихідна САУ.

Таблиця 2.4 – Вимоги, щодо якості процесу управління

Найменування	Позначення	Значення
Час перерегулювання	$\sigma$	30
Час регулювання	$t_{рег}$	3



Лінійна неперервна САУ регулювання подання напруги трансформатора (ТС) містить: ТС як об'єкт регулювання, плата керування (ПП), запобіжник (ЗБ), підсилювач (П) і коробку замикання (КЗ)

Рисунок 2.6 – Функціональна схема САУ

Лінійна неперервна САУ № 5 регулювання частоти обертання газотурбінного двигуна (ГТД) містить: ГТД як об'єкт регулювання, вимірювальний пристрій у ланцюзі негативного зворотного зв'язку, елемент порівняння, підсилювач (П) і дозуючий орган (ДО).

Формула елемента порівняння:

$$U_{пп} = U_0 - U_{кз} \quad (2.6)$$

де  $U_{пп}$  – вихідна напруга ПП;

$U_0$  – вихідне значення напруги;

$U_{кз}$  – напруга на виході КЗ.

Формула підсилювача:

$$U_{п} = K_{п} U_{пп}, \quad (2.7)$$

де  $U_{п}$  – вихідна напруга ПП;

$K_{п}$  – вихідне значення напруги.

Передавальна функція підсилювача:

$$W_{\Pi}(s) = K_{\Pi}, \quad (2.8)$$

Формула запобіжника:

$$\frac{dG_T}{dt} = K_{ЗБ} U_{\Pi} \quad (2.9)$$

де  $G_T$  – витрата току;

$K_{ЗБ}$  – коефіцієнт ЗБ.

Передавальна функція коробки замикання:

$$\begin{aligned} W_{ЗБ}(s) &= \frac{K_{ЗБ} \cdot U_{\Pi}}{s \cdot U_{\Pi}}, \\ W_{ЗБ}(s) &= \frac{K_{ЗБ}}{s}, \\ W_{ЗБ}(s) &= \frac{1500}{s}. \end{aligned} \quad (2.10)$$

Формула трансформатора:

$$T_2^2 \frac{d^2 n_{TC}}{dt^2} + T_1 \frac{dn_{TC}}{dt} + n_{TC} = K_{TC} \left( \tau_1 \frac{dG_T}{dt} + G_T \right), \quad (2.11)$$

де  $n_{TC}$  – витрата току;

$K_{TC}$  – коефіцієнт ЗБ;

$T_1, T_2$  – сталі часу газотурбінного двигуна;

Передавальна функція газотурбінного двигуна:

$$W_{TC}(s) = \frac{n_{TC}}{G_T}, \quad (2.12)$$

$$W_{TC}(s) = \frac{G_T \cdot K_{TC} \cdot (\tau_1 \cdot s + 1)}{(T_2 \cdot s^2 + T_1 \cdot s + 1) \cdot G_T},$$

$$W_{TC}(s) = \frac{K_{TC} \cdot (\tau_1 \cdot s + 1)}{(T_2 \cdot s^2 + T_1 \cdot s + 1)},$$

$$W_{TC}(s) = \frac{1,2 \cdot (1,1 \cdot s + 1)}{(0,4 \cdot s^2 + 1,25 \cdot s + 1)}.$$

Формула вимірювального пристрою:

$$T_{K3} \frac{dU_{K3}}{dt} + U_{K3} = K_{K3} n_{TC}, \quad (2.13)$$

де  $T_{K3}$  – стала часу КЗ;

$K_{K3}$  – коефіцієнт посилення КЗ.

Передавальна функція вимірювального пристрою:

$$W_{K3}(s) = \frac{U_{K3}}{n_{TC}},$$

$$W_{K3}(s) = \frac{K_{K3} \cdot n_{TC}}{(T_{K3} \cdot s + 1) \cdot n_{TC}},$$

$$W_{K3}(s) = \frac{K_{K3}}{(T_{K3} \cdot s + 1)}, \quad (2.14)$$

$$W_{K3}(s) = \frac{0,0002}{(0,02 \cdot s + 1)},$$

Структурна схема нескоригованої системи зображена на рис. 2.7.

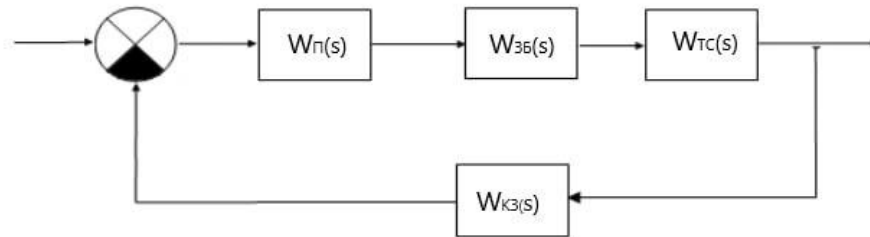


Рисунок 2.7 – Структурна схема нескоригованої системи

## 2.6 Висновки до другого розділу

Розробили тестовий стенд, описали його принцип дії, навели відповідну схему.

Були описані електричні компоненти макету, їх технічні характеристики та особливості, такі як:

- тензорезистор;
- аналого-цифровий перетворювач;
- плата керування;
- кінцевий вимикач механічний;

Використовуючи розрахунки загального тиску та сили, що діє на балку, була проведена конвертація значень напруги в навантаження. Дані структуровані у відповідній таблиці.

Для калібрування та вимірювань написали та використали код, наведений в Додатку А.

Для конвертації значень напруги в тиск написали та використали код, наведений в Додатку Б.

## 3 ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 3.1 Побудова плану експерименту

Проведемо дослідження за темою впливу параметрів зварювання на якість зварного шва. В цих дослідженнях до моделі залежності чинників, які впливають на якість зварного шва, були включені наступні параметри:

- сила току;
- товщина металевих заготовок;
- кут під яким відбувається зварювання.

У процесі досліджень будемо використовувати металеві листи алюмінію, що є поширеним металом та добре проводить тепло, тому він швидко нагрівається і охолоджується, що вимагає дотримання чітких режимів зварювання.

Використовуватимемо змінний струм (АС). Це дозволяє виконувати ефективно очищення поверхні алюмінію від оксидної плівки під час зварювання. АС режим допомагає уникнути забруднень і утворення пор.

Для зварювання алюмінію зазвичай використовують вольфрамові електроди з торієвим або лантановим покриттям (з маркуванням WT–20 або WL–15) діаметром 1,0–1,6 мм.

У якості захисного газу оберемо аргон. Орієнтовна витрата для тонких алюмінієвих листів становитиме приблизно 6–10 л/хв.

Перед початком досліджень зачистимо поверхню алюмінію від окислів та забруднень за допомогою металевої щітки.

### 3.2 Визначення впливу зварювального струму на міцність зварних швів

Розрахунок зварювального струму для TIG-зварювання алюмінію базується на емпіричних формулах і рекомендаціях, які використовуються на

практиці. Оскільки алюміній має високу теплопровідність, потрібно правильно вибрати параметри, щоб забезпечити належну глибину провару та уникнути перегріву тонких матеріалів.

Для алюмінієвих листів товщиною 1 мм рекомендується використовувати струм приблизно 40–60 ампер.

Як орієнтир можна використовувати емпіричну формулу для TIG-зварювання алюмінію (3.1):

$$I \approx 25 - 30A/mm \text{ товщини} \quad (3.1)$$

Теоретичне значення для 1 мм товщини буде дорівнювати 25–30 ампер, але враховуючи додаткові фактори, такі як кут зварювання, втрата тепла через теплопровідність та компенсація втрат на аргонне охолодження збільшимо зварювальний струм до 40 – 60 ампер. Це дасть змогу отримати стабільну дугу та якісний зварний шов під час практичних умов.

Щоб визначити, яку вагу може витримати зварний шов, потрібно провести розрахунок, який враховує:

- тип з'єднання та форму шва;
- механічні властивості матеріалу;
- розміри шва та ефективну площу з'єднання.

Для спрощення розрахунків припустимо, що довжина зварного шва  $L$  дорівнює 100 мм.

Спочатку визначимо ефективну площу зварного шва (3.2):

$$A_{\text{еф}} = a * L \quad (3.2)$$

де  $a$  – розмір катета шва (ширина або висота зварного шва);

$L$  – довжина шва.

У випадку алюмінію товщиною 1 мм часто використовують розмір

катета  $a \approx 0.7 * t \approx 0.7mm$ . Тоді:

$$A_{\text{еф}} = 0.7mm * 100mm = 70mm^2 = 70 * 10^{-6}m^2$$

Для алюмінієвих сплавів межа міцності на зсув може варіюватися, але для розрахунків використаємо середнє значення:

$$T_{\text{доп}} = 70\text{Мпа} = 70 * 10^6\text{Па}$$

Для визначення допустимого навантаження на зсув для шва використаємо формулу (3.3):

$$F_{\text{доп}} = T_{\text{доп}} * A_{\text{еф}} \quad (3.3)$$

Підставивши значення отримаємо:

$$F_{\text{доп}} = 70 * 10^6\text{Па} * 70 * 10^{-6}m^2 = 4900\text{Н}$$

Переведемо силу в вагу:

$$m = \frac{F}{g} = \frac{4900}{9.81} \approx 500\text{кг}$$

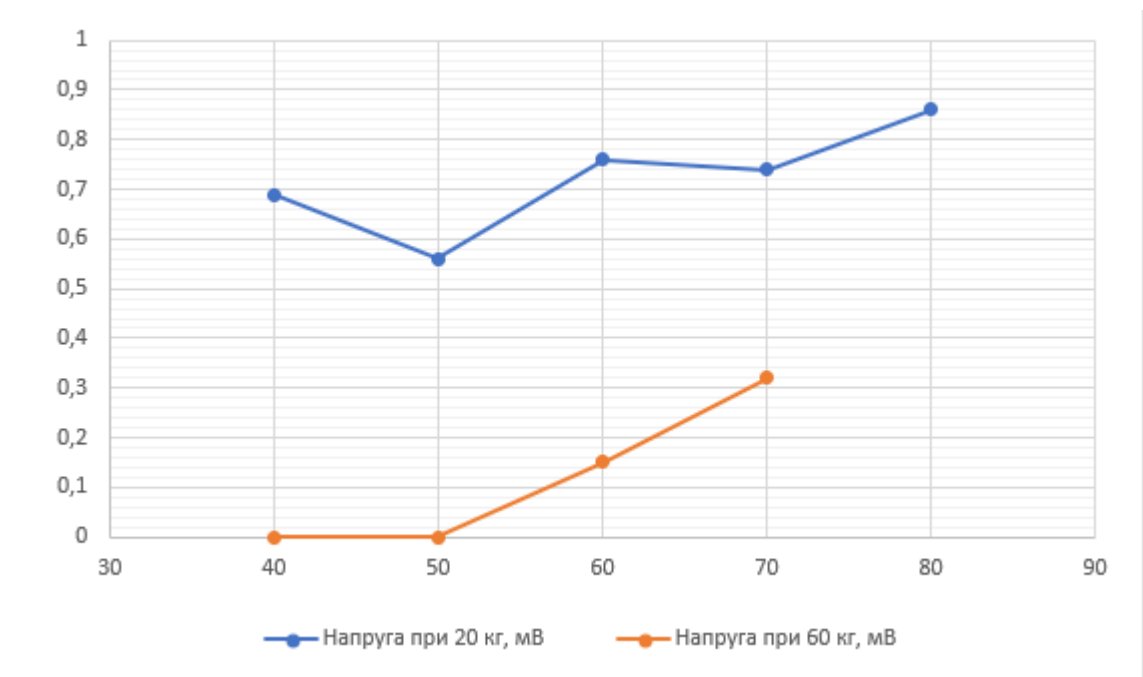
Отже, зварний шов з алюмінієвих листів товщиною 1 мм і довжиною 100 мм може витримати навантаження близько 500 кг при зсувному статичному навантаженні.

Проведемо дослідження при яких будемо змінювати зварювальний струм із кроком 10 Ампер для листів алюмінію товщиною 1 міліметр під кутом  $90^\circ$ , результати занесемо у таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 – Залежність міцності зварного шва для листів товщиною 1 мм від зварювального струму

Товщина листів, мм	Зварювальний струм, А	Напруга, В	Кут зварювання, °	Максимальне навантаження, кг	Напруга при 20 кг, мВ	Напруга при 60 кг, мВ
1	40	12	90	500	0,69	злам
1	50	12	90	550	0,56	злам
1	60	12	90	600	0,76	злам
1	70	12	90	650	0,74	0,15
1	80	12	90	700	0,86	0,32

На рисунку 3.1 наведемо відповідний графік залежності.



Рисунку 3.1 – Графік залежності максимального навантаження від зварювального струму для листів алюмінію товщиною 1 мм

Тепер проведемо аналогічні дослідження для листів алюмінію товщиною 2 мм під кутом  $90^\circ$ , результати занесемо у таблицю 3.2. Зварювальний струм збільшимо згідно емпіричній формулі для TIG-зварювання алюмінію (3.1).

Таблиця 3.2 – Залежність міцності зварного шва для листів товщиною 2 мм від зварювального струму

Товщина листів, мм	Зварювальний струм, А	Напруга, В	Кут зварювання, °	Максимальне навантаження, кг	Напруга при 20 кг, мВ	Напруга при 60 кг, мВ
2	80	12.5	90	1200	0,89	злам
2	90	13	90	1380	0,87	0,62
2	100	13.5	90	1600	0,92	0,72
2	110	14	90	1840	0,98	0,8
2	120	14.5	90	2100	1,2	0,82

На рисунку 3.2 наведемо відповідний графік залежності.

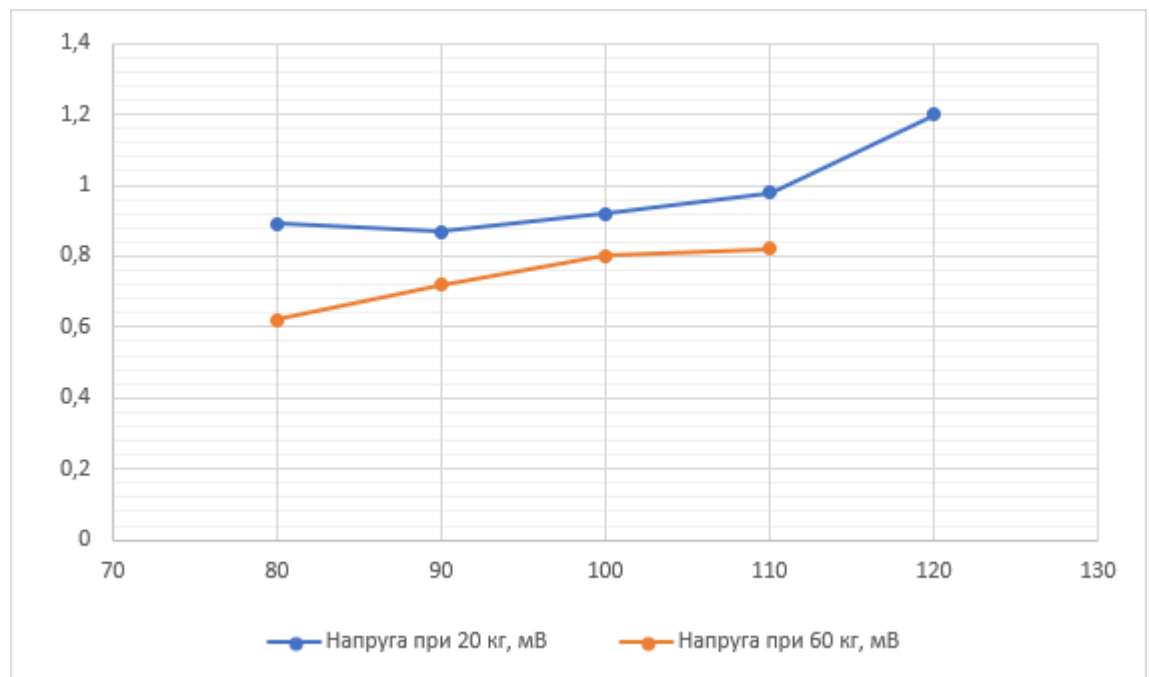


Рисунок 3.2 – Графік залежності максимального навантаження від зварювального струму для листів алюмінію товщиною 2 мм

Тепер проведемо аналогічні дослідження для листів алюмінію товщиною 3 мм під кутом  $90^\circ$ , результати занесемо у таблицю 3.3.

Таблиця 3.3 – Залежність міцності зварного шва для листів товщиною 3 мм від зварювального струму

Товщина листів, мм	Зварювальний струм, А	Напруга, В	Кут зварювання, °	Максимальне навантаження, кг	Напруга при 20 кг, мВ	Напруга при 60 кг, мВ
3	120	14	90	2000	0,87	0,45
3	130	15	90	2200	0,92	0,71
3	140	15.5	90	2400	0,96	0,83
3	150	16	90	2600	1,3	0,99
3	160	16.5	90	2800	1,7	1,2

На рисунку 3.3 наведемо відповідний графік залежності.

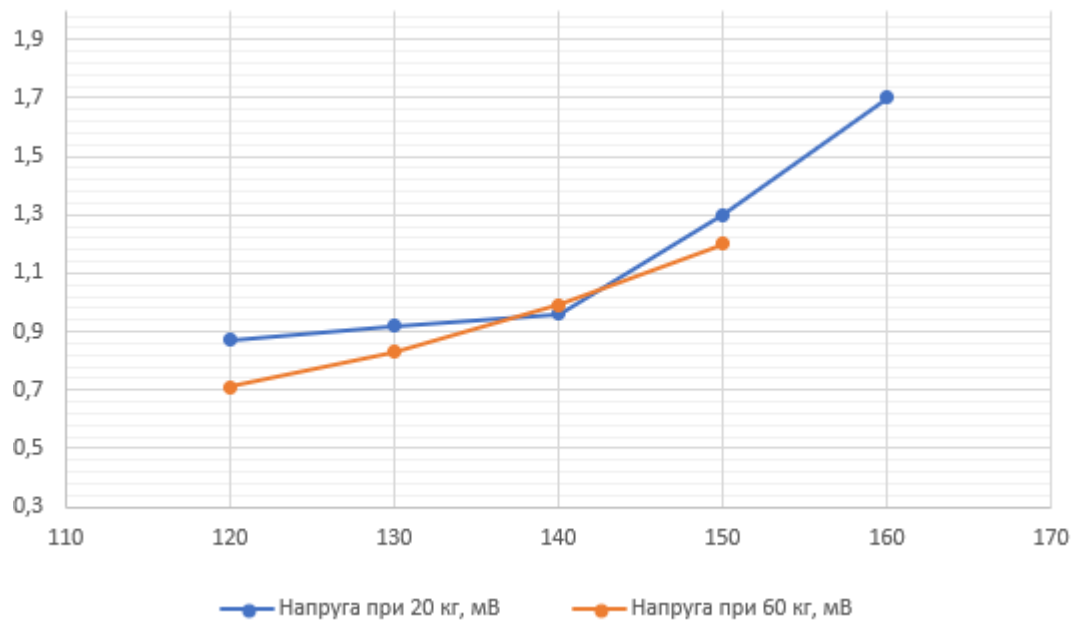


Рисунок 3.3 – Графік залежності максимального навантаження від зварювального струму для листів алюмінію товщиною 3 мм

Тепер проведемо аналогічні дослідження для листів алюмінію товщиною 4 мм під кутом 90°, результати занесемо у таблицю 3.4.

Таблиця 3.4 – Залежність міцності зварного шва для листів товщиною 4 мм від зварювального струму

Товщина листів, мм	Зварювальний струм, А	Напруга, В	Кут зварювання, °	Максимальне навантаження, кг	Напруга при 20 кг, мВ	Напруга при 60 кг, мВ
4	160	16	90	2800	5,7	3,9
4	170	16.5	90	3000	7,2	5,3
4	180	17	90	3200	8,4	6,9
4	190	17.5	90	3400	8,8	7,8
4	200	18	90	3600	10,6	8,4

На рисунку 3.4 наведемо відповідний графік залежності.

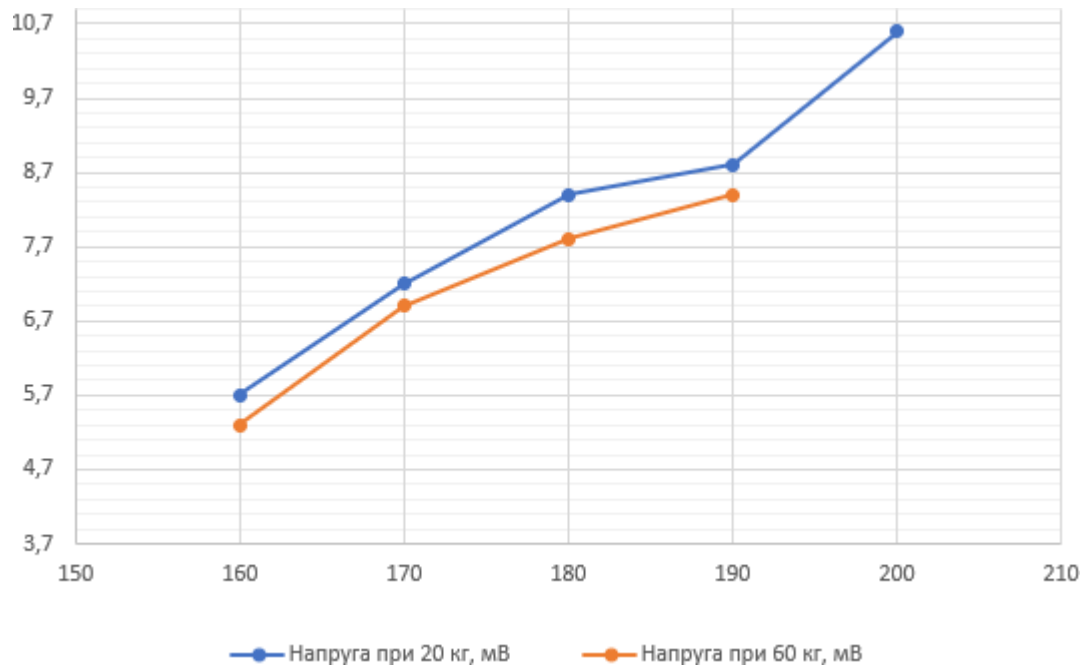


Рисунок 3.4 – Графік залежності максимального навантаження від зварювального струму для листів алюмінію товщиною 4 мм

Тепер проведемо аналогічні дослідження для листів алюмінію товщиною 5 мм під кутом 90°, результати занесемо у таблицю 3.5.

Таблиця 3.5 – Залежність міцності зварного шва для листів товщиною 5 мм від зварювального струму

Товщина листів, мм	Зварювальний струм, А	Напруга, В	Кут зварювання, °	Максимальне навантаження, кг	Напруга при 20 кг, мВ	Напруга при 60 кг, мВ
5	200	18	90	3600	4,9	4,5
5	210	18.5	90	3800	7,6	7,2
5	220	19	90	4000	8,9	9,1
5	230	19.5	90	4200	10,2	9,0
5	240	20	90	4400	12,7	11,3

На рисунку 3.5 наведемо відповідний графік залежності.

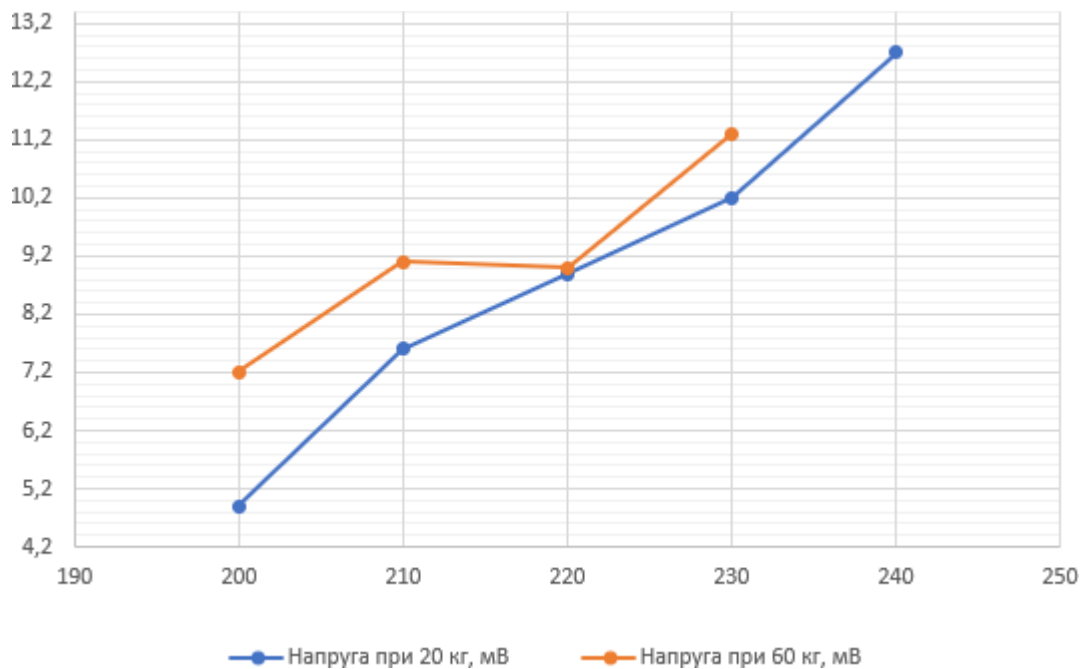


Рисунок 3.5 – Графік залежності максимального навантаження від зварювального струму для листів алюмінію товщиною 5 мм

Тепер проведемо аналогічні дослідження для листів алюмінію товщиною 6 мм під кутом 90°, результати занесемо у таблицю 3.6.

Таблиця 3.6 – Залежність міцності зварного шва для листів товщиною 6 мм від зварювального струму

Товщина листів, мм	Зварювальний струм, А	Напруга, В	Кут зварювання, °	Максимальне навантаження, кг	Напруга при 20 кг, мВ	Напруга при 60 кг, мВ
6	240	20	90	4400	8,7	6,3
6	250	20.5	90	4600	10,5	7,4
6	260	21	90	4800	12,5	8,8
6	270	21.5	90	5000	18,9	12,3
6	280	22	90	5200	21,1	16,7

На рисунку 3.6 наведемо відповідний графік залежності.

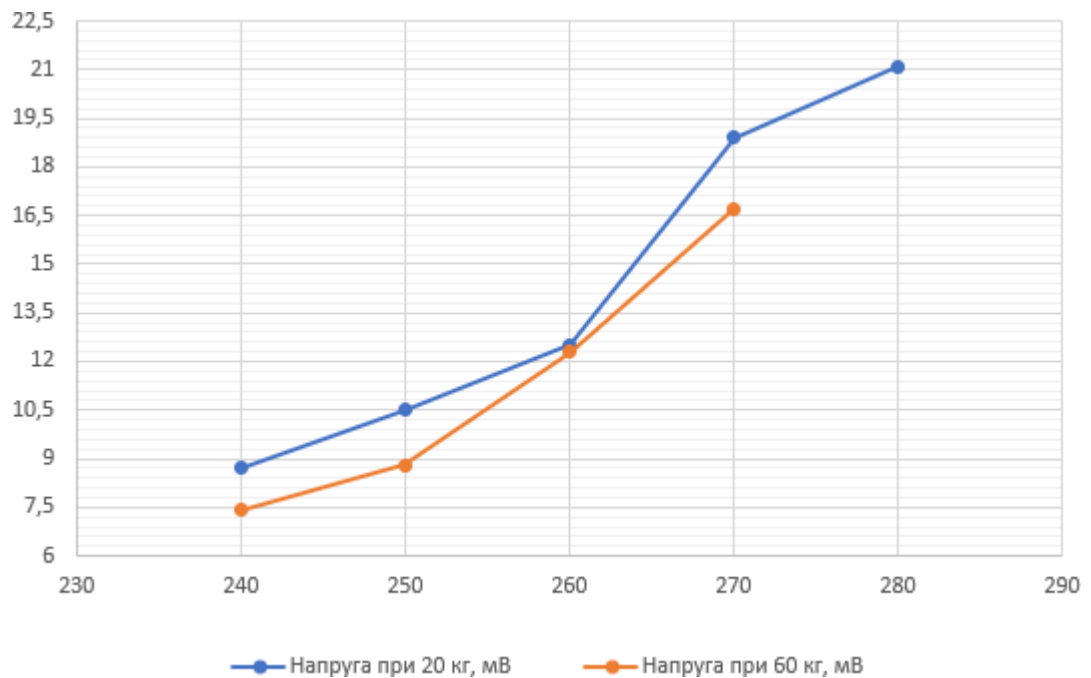


Рисунок 3.6 – Графік залежності максимального навантаження від зварювального струму для листів алюмінію товщиною 6 мм

Аналізуючи дані таблиць для листів різної товщини (1 мм – 6 мм), можна зробити такі висновки щодо впливу зварного струму на міцність зварювального шва: із збільшенням зварного струму спостерігається зростання максимального навантаження (міцності) зварного шва. Це підтверджується для всіх товщин листів, які використовувалися у

розрахунках. При збільшенні струму поліпшується глибина провару, а це забезпечує більш надійне і міцне з'єднання металу. Шов стає міцнішим і може витримувати більше навантаження.

В наведених таблицях можна помітити, що максимальне навантаження зростає пропорційно з підвищенням зварного струму, це свідчить про те, що струм є одним із ключових факторів, що впливають на здатність шва витримувати механічне навантаження. Проте важливо слідкувати за відповідністю зварювального струму до товщин. Якщо струм занадто малий для певної товщини листа, зварний шов може бути слабким і недостатньо міцним, оскільки провар не досягає потрібної глибини. Якщо струм надто високий для тонких листів, це може призвести до перегріву, деформації або навіть проплавлення металу, що знижує міцність з'єднання. Зі збільшенням товщини листа зростає потреба в більшому зварному струмі для забезпечення необхідної глибини провару. Тонші листи вимагають меншого струму, тоді як для товстих листів потрібно застосовувати вищий струм для досягнення оптимальної міцності з'єднання. Правильний вибір зварювального струму забезпечує необхідну міцність і довговічність зварного шва. Надто малий або надто великий струм може призвести до дефектів шва, таких як тріщини, недостатній провар або надмірне проплавлення, що вплине на здатність з'єднання витримувати навантаження.

### 3.3 Визначення впливу кута зварювання на міцність зварних швів

Визначення міцності зварного шва при змінненні кута зварювання залежить від кількох важливих факторів, таких як тип з'єднання, кут нахилу, товщина металу, а також самі параметри зварювання. Зміна кута зварювання впливає на розподіл навантаження по шву і його здатність витримувати механічні впливи. Кут 90 градусів один із найбільш оптимальних кутів для таврових і кутових з'єднань, оскільки забезпечує рівномірний розподіл

напруги та достатній контакт між металами. Міцність шва в цьому випадку максимальна.

При зменшенні кута зварювання площа контакту металу може зменшуватись, що знижує міцність шва через недостатній провар або концентрацію напруги в певних точках. Щоб компенсувати це, часто збільшують зварювальний струм або кількість проходів зварювання.

Міцність шва можна визначити за допомогою розрахунку площі поперечного перерізу шва. При зміні кута зварювання змінюється ефективна площа поперечного перерізу зварного шва, яка сприймає навантаження. Чим менший кут зварювання, тим менша площа шва, що безпосередньо впливає на його міцність (3.4).

$$A_{\text{шва}} = l * t_{\text{провару}} * \sin(\alpha) \quad (3.4)$$

де  $l$  – довжина шва;

$t_{\text{провару}}$  – глибина провару;

$\alpha$  – кут між зварюваними листами (у градусах).

Для ефективного зварювання необхідно збільшити глибину провару або довжину шва, якщо кут між деталями зменшується.

При зміні кута зварювання зварювальні параметри також необхідно коригувати, щоб забезпечити достатню міцність шва:

- зварювальний струм – при зменшенні кута може знадобитися збільшити струм для забезпечення глибшого провару, щоб компенсувати зменшення площі контакту;

- швидкість зварювання – менший кут може вимагати зменшення швидкості зварювання для кращого прогріву зони шва;

- кількість проходів – для міцного шва при малих кутах може знадобитися додаткові проходи, щоб підвищити міцність та зменшити ймовірність утворення дефектів.

Відповідно до попередніх досліджень ми знаємо, що довжина шва дорівнює 100 мм. Для спрощення розрахунків будемо вважати що глибина провару дорівнює товщині металевих заготівок.

Згідно з формулою (3.2) ми знаємо, що ефективна площа зварного шва дорівнює 70 мм.

Для визначення максимально допустимого навантаження на зварний шов використаємо добуток ефективної площі шва та напруги (3.5).

$$F_{max} = A_{шва} * \beta \quad (3.5)$$

де  $\beta$  – допустима напруга;

$A_{шва}$  – площа зварного шва.

Проведемо дослідження при яких будемо зменшувати зварний кут із кроком 15 градусів для листів алюмінію товщиною 1 міліметр під кутом 90°, результати занесемо у таблицю 3.7.

Таблиця 3.7 – Залежність міцності зварного шва для листів товщиною 1 мм від кута зварювання

Товщина листів, мм	Зварювальний струм, А	Напруга, В	Кут зварювання, °	Максимальне навантаження, кг	Напруга при 20 кг, мВ	Напруга при 60 кг, мВ
1	40	10	90	500	0,47	0,34
1	40	10	75	483	0,38	злам
1	40	10	60	433	0,21	злам
1	40	10	45	353	злам	злам
1	40	10	30	250	злам	злам

Зменшення кута зварювання поступово знижує максимальне навантаження, яке може витримати шов, оскільки площа контакту і міцність з'єднання зменшуються. Особливо помітне зменшення навантаження відбувається після зменшення кута менше 60°.

На рисунку 3.7 наведемо відповідний графік залежності.

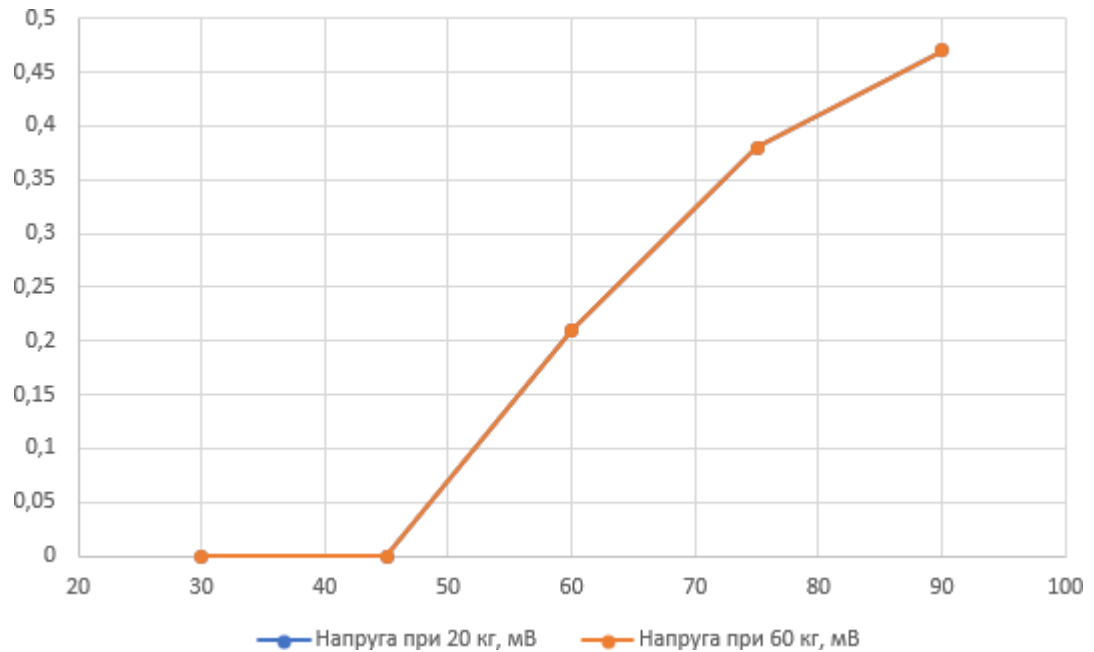


Рисунок 3.7 – Графік залежності максимального навантаження від кута зварювання для листів алюмінію товщиною 1 мм

Тепер проведемо аналогічні дослідження для листів алюмінію товщиною 2 мм, результати занесемо у таблицю 3.8.

Таблиця 3.8 – Залежність міцності зварного шва для листів товщиною 2 мм від кута зварювання

Товщина листів, мм	Зварювальний струм, А	Напруга, В	Кут зварювання, °	Максимальне навантаження, кг	Напруга при 20 кг, мВ	Напруга при 60 кг, мВ
2	80	15	90	1000	0,59	0,4
2	80	15	75	967	0,67	0,21
2	80	15	60	866	0,34	злам
2	80	15	45	707	0,29	злам
2	80	15	30	500	злам	злам

На рисунку 3.8 наведемо відповідний графік залежності.

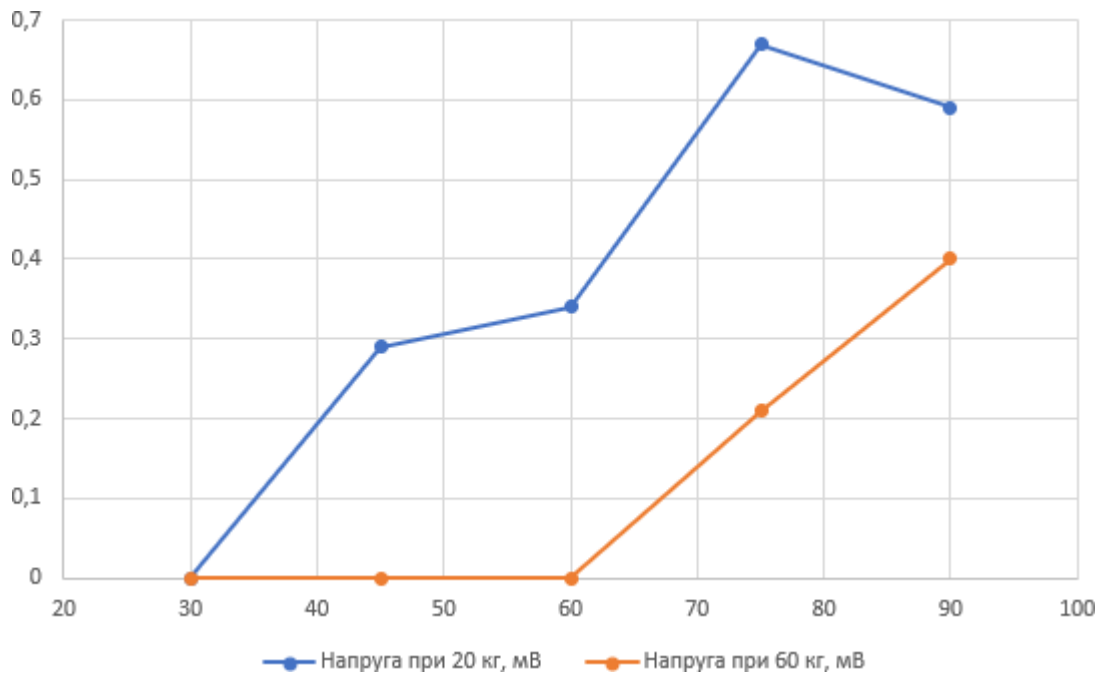


Рисунок 3.8 – Графік залежності максимального навантаження від кута зварювання для листів алюмінію товщиною 2 мм

Тепер проведемо аналогічні дослідження для листів алюмінію товщиною 3 мм, результати занесемо у таблицю 3.9.

Таблиця 3.9 – Залежність міцності зварного шва для листів товщиною 3 мм від кута зварювання

Товщина листів, мм	Зварювальний струм, А	Напруга, В	Кут зварювання, °	Максимальне навантаження, кг	Напруга при 20 кг, мВ	Напруга при 60 кг, мВ
3	120	20	90	1500	4,3	2,4
3	120	20	75	1451	3,8	2,7
3	120	20	60	1299	2,2	1,5
3	120	20	45	1060	1,1	0,9
3	120	20	30	750	1,5	злам

На рисунку 3.9 наведемо відповідний графік залежності.

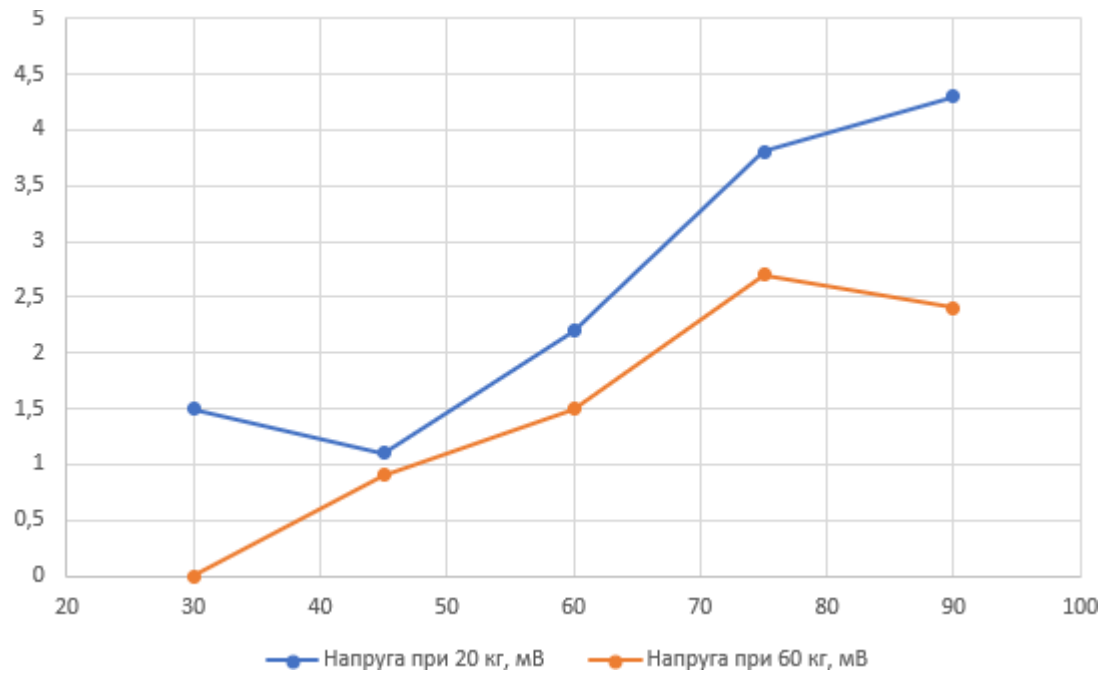


Рисунок 3.9 – Графік залежності максимального навантаження від кута зварювання для листів алюмінію товщиною 3 мм

Тепер проведемо аналогічні дослідження для листів алюмінію товщиною 4 мм, результати занесемо у таблицю 3.10.

Таблиця 3.10 – Залежність міцності зварного шва для листів товщиною 4 мм від кута зварювання

Товщина листів, мм	Зварювальний струм, А	Напруга, В	Кут зварювання, °	Максимальне навантаження, кг	Напруга при 20 кг, мВ	Напруга при 60 кг, мВ
4	160	25	90	2000	7,7	4,9
4	160	25	75	1935	7,2	4,3
4	160	25	60	1732	6,4	3,9
4	160	25	45	1414	5,3	3,4
4	160	25	30	1000	5,6	2,8

На рисунку 3.10 наведемо відповідний графік залежності.

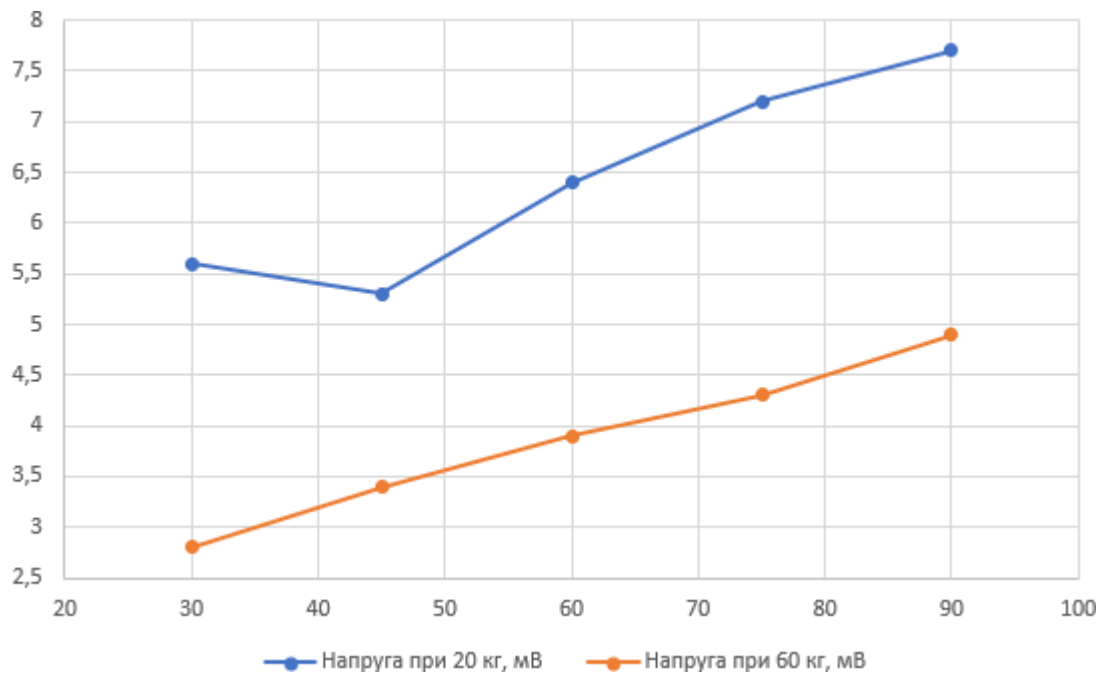


Рисунок 3.10 – Графік залежності максимального навантаження від кута зварювання для листів алюмінію товщиною 4 мм

Тепер проведемо аналогічні дослідження для листів алюмінію товщиною 5 мм, результати занесемо у таблицю 3.11.

Таблиця 3.11 – Залежність міцності зварного шва для листів товщиною 5 мм від кута зварювання

Товщина листів, мм	Зварювальний струм, А	Напруга, В	Кут зварювання, °	Максимальне навантаження, кг	Напруга при 20 кг, мВ	Напруга при 60 кг, мВ
5	200	30	90	2500	9,9	6,5
5	200	30	75	2419	8,6	6,2
5	200	30	60	2165	8,9	4,1
5	200	30	45	1767	7,2	5,0
5	200	30	30	1250	6,7	3,9

На рисунку 3.11 наведемо відповідний графік залежності.

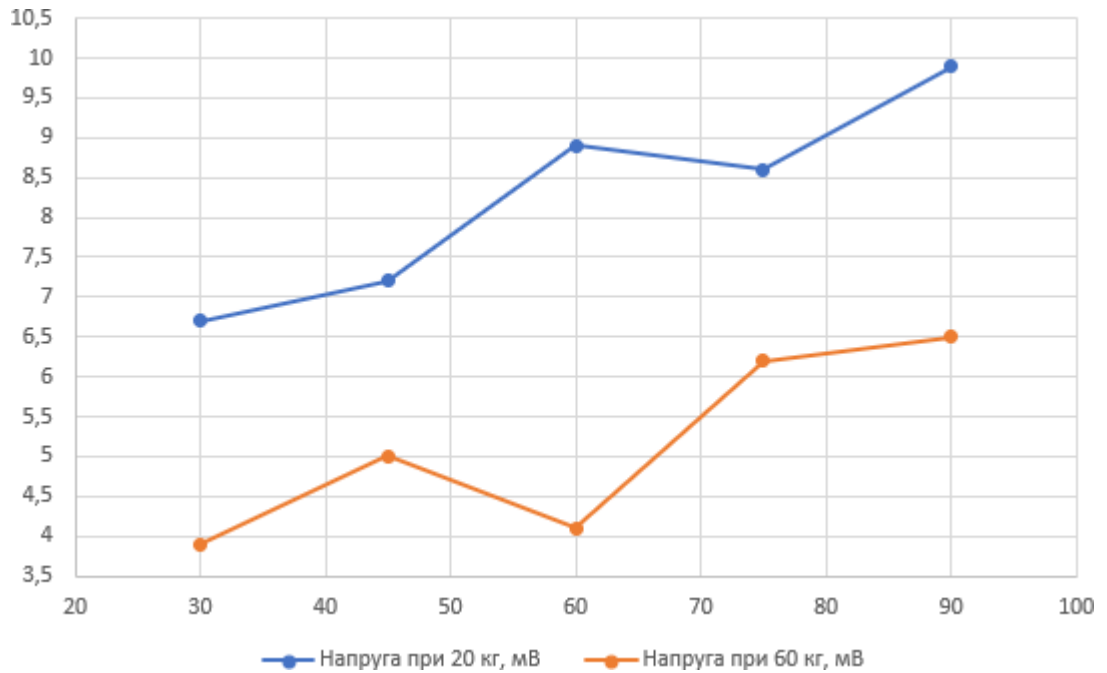


Рисунок 3.11 – Графік залежності максимального навантаження від кута зварювання для листів алюмінію товщиною 5 мм

Тепер проведемо аналогічні дослідження для листів алюмінію товщиною 6 мм, результати занесемо у таблицю 3.12.

Таблиця 3.12 – Залежність міцності зварного шва для листів товщиною 6 мм від кута зварювання

Товщина листів, мм	Зварювальний струм, А	Напруга, В	Кут зварювання, °	Максимальне навантаження, кг	Напруга при 20 кг, мВ	Напруга при 60 кг, мВ
6	240	35	90	3000	15,7	12,3
6	240	35	75	2903	13,5	10,4
6	240	35	60	2598	12,5	10,8
6	240	35	45	2121	10,9	9,3
6	240	35	30	1500	9,1	8,7

На рисунку 3.12 наведемо відповідний графік залежності.

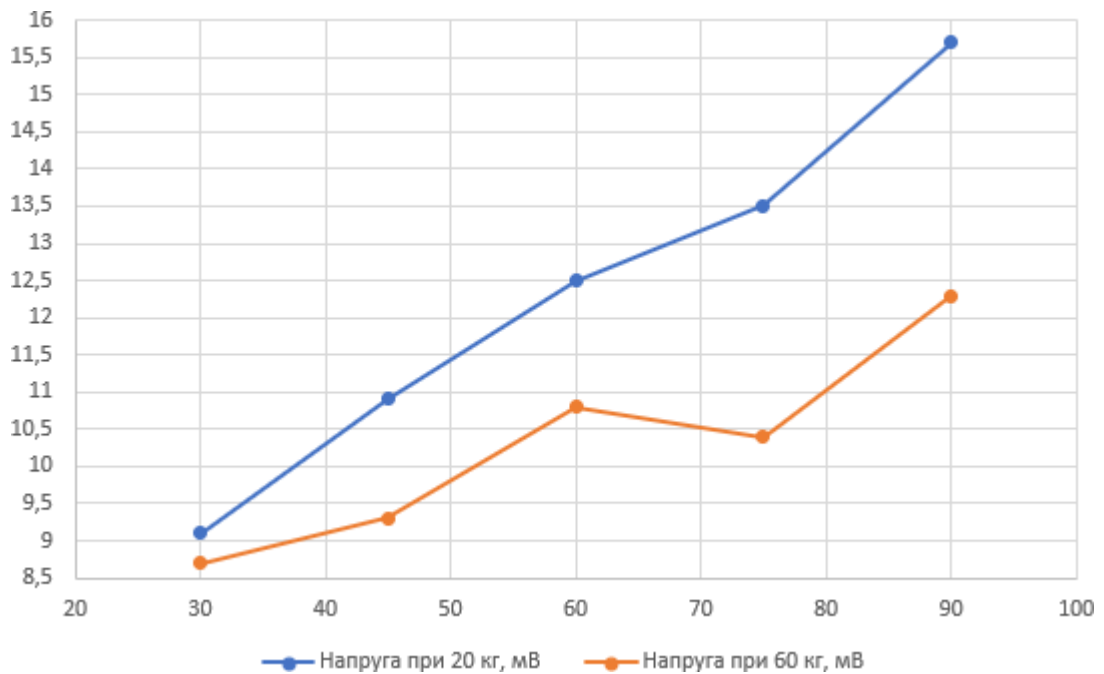


Рисунок 3.12 – Графік залежності максимального навантаження від кута зварювання для листів алюмінію товщиною 6 мм

Аналізуючи дані досліджень залежності міцності зварного шва від кута зварювання для різних товщин алюмінієвих листів (1 мм – 6 мм), можна зробити такі наступні висновки:

- для всіх товщин листів максимальне навантаження досягається при зварюванні під кутом  $90^\circ$ . Це підтверджує, що пряма конфігурація шва забезпечує максимальне зчеплення між зварними поверхнями;

- поступове зменшення кута зварювання призводить до суттєвого зниження міцності шва. Це можна пояснити тим, що при меншому куті площа ефективного зварного шва зменшується, а навантаження розподіляється на меншу площу. Особливо помітне зниження міцності шва при кутах менше  $60^\circ$ , що вказує на різке падіння ефективної площі шва в таких умовах;

- для кожної товщини листа спостерігається аналогічна тенденція: при зменшенні кута міцність шва падає. Однак, чим більша товщина листа, тим повільніше зменшується міцність при тих самих кутах;

- для тонших листів, таких як 1 мм і 2 мм, зміна кута зварювання має

сильніший вплив на міцність шва порівняно з товстими листами. Це може бути пов'язано з тим, що тонкий лист не може так ефективно передавати навантаження через зварний шов, коли площа з'єднання зменшується при зменшенні кута;

– для досягнення максимальної міцності шва, особливо при великих навантаженнях, важливо зварювати під кутом, близьким до  $90^\circ$ . Якщо конструкція або специфіка роботи вимагає зварювання під іншим кутом, слід брати до уваги, що зменшення кута суттєво знижує міцність;

– товстіші листи мають більше запасу міцності, навіть при меншому куті зварювання. Це означає, що у випадках, коли необхідно зварювати під кутом, вибір товстих листів може частково компенсувати втрату міцності.

Отже, зменшення кута зварювання призводить до зниження міцності зварного шва, причому чим менший кут, тим більше падає міцність. Товстіші листи можуть частково компенсувати цей ефект, проте для досягнення максимальних механічних характеристик кут зварювання повинен бути близьким до  $90^\circ$ .

### 3.4 Побудова регресійно-кореляційної моделі

На базі отриманих результатів можливо побудувати регресійно-кореляційну модель впливу параметрів зварювання на міцність зварного шва. Для цього вводимо отримані дані в програму IBM SPSS Statistics для проведення базового лінійного регресійного аналізу параметрів експонування моделі.

Використовуючи розрахунки зведення для моделі «Model Summary», отримуємо значення коефіцієнта детермінації (рисунок 3.13).

Model Summary									
Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	R Square Change	Change Statistics			Sig. F Change
						F Change	df1	df2	
1	,991 <sup>a</sup>	,983	,981	185,065	,983	773,171	4	55	,000

a. Predictors: (Constant), Кут\_заврювання, Товщина\_листів\_мм, Напряга\_В, Зварювальний\_струм\_А

Рисунок 3.13 – Зведення для моделі (Model Summary)

Показник коефіцієнта детермінації представляє собою ступінь кореляції між отриманими значеннями залежної змінної та передбаченим значенням, що характеризує відповідність розрахованих моделлю значень лінії регресії та експериментальних результатів. Коефіцієнт множинної детермінації « $R^2$ » вказує, наприклад, на те, що включені в систему параметри впливають на результат на рівень 99,1%.

Скоригований коефіцієнт « $R^2$ » становить 98,3%, а стандартна помилка оцінки дорівнює 185,065; важливо, щоб цей показник був більший за 0,5. Розглядаючи результати по всіх осях, виявлено, що значення « $R^2$ » перевищує 0,5.

За допомогою таблиці "ANOVA" перевіряється гіпотеза про рівність « $R^2$ » = 0. Якщо рівень значимості «Sig.» менший за 0,05, це підтверджує вірність попередніх результатів, як показано на рисунку 3.14.

ANOVA <sup>a</sup>						
Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	105921576,1	4	26480394,02	773,171	,000 <sup>b</sup>
	Residual	1883700,093	55	34249,093		
	Total	107805276,2	59			

a. Dependent Variable: Максимальне\_навантаження\_кг  
b. Predictors: (Constant), Кут\_заврювання, Товщина\_листів\_мм, Напряга\_В, Зварювальний\_струм\_А

Рисунок 3.14 – Результати розрахунків значимості «ANOVA»

Во всіх випадках значимість «Sig.» менше 0,05, що доводить про вірність попередніх результатів.

Для визначення ваги кожної змінної скористаємося стандартизованими

Beta-коефіцієнтом «Standardized Coefficients Beta», які показують на скільки змінюється значення параметра від збільшення на одиницю одного з факторів (рисунок 3.15).

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	-319,201	143,984		-2,217	,031
	Товщина_листів_мм	239,890	90,951	,306	2,638	,011
	Зварювальний_струм_А	18,907	2,019	,984	9,366	,000
	Напруга_В	-111,972	7,001	-,597	-15,994	,000
	Кут_заврювання	12,121	1,411	,192	8,588	,000

a. Dependent Variable: Максимальне\_навантаження\_кг

Рисунок 3.15 – Значення «Standardized Coefficients Beta»

Значення Beta-коефіцієнтів можливо використовувати як коефіцієнти кореляції. Якщо переглянути попередні розрахунки, вся модель має лінійну залежність, тоді дані коефіцієнти можна підставити в рівняння лінійної регресії (3.6).

$$Y=b_0+b_1x_1+b_2x_2+\dots + b_nx_n. \quad (3.6)$$

де  $Y$  – фактор відхилення геометричних розмірів топології ДП;

$b_0, b_1, b_2, \dots b_n$  – коефіцієнти лінійної регресії впливу параметрів на фактор;

$x_1, x_2, \dots x_n$  – параметри впливу на фактор.

Тепер побудуємо рівняння регресії. На рисунку 3.16 наведені результати кореляції Пірсона.

Таким чином отримуємо, що рівняння міцності зварного шва з урахуванням температури буде мати наступний вигляд (3.7):

$$Y=b_0+b_1x_1+b_2x_2+b_3x_3=0,784+(0,859 \times x_1)+(0,325 \times x_2) +(0,474 \times x_3) \quad (3.7)$$

		Correlations				
		Максимальне навантаження_кг	Товщина_листів_мм	Зварювальний_струм_А	Напруга_В	Кут_зварювання
Pearson Correlation	Максимальне_навантаження_кг	1,000	,784	,859	,325	,474
	Товщина_листів_мм	,784	1,000	,979	,813	,000
	Зварювальний_струм_А	,859	,979	1,000	,743	,101
	Напруга_В	,325	,813	,743	1,000	-,306
	Кут_зварювання	,474	,000	,101	-,306	1,000
Sig. (1-tailed)	Максимальне_навантаження_кг		,000	,000	,006	,000
	Товщина_листів_мм	,000		,000	,000	,500
	Зварювальний_струм_А	,000	,000		,000	,220
	Напруга_В	,006	,000	,000		,009
	Кут_зварювання	,000	,500	,220	,009	
N	Максимальне_навантаження_кг	60	60	60	60	60
	Товщина_листів_мм	60	60	60	60	60
	Зварювальний_струм_А	60	60	60	60	60
	Напруга_В	60	60	60	60	60
	Кут_зварювання	60	60	60	60	60

Рисунок 3.16 – Кореляція Пірсона

### 3.5 Висновки до третього розділу

У результаті проведених досліджень щодо впливу зварювального струму, напруги та кута зварювання на міцність зварного шва можна зробити такі ключові висновки:

– залежність міцності зварного шва від зварювального струму: зі збільшенням зварювального струму міцність зварного шва зростає, оскільки глибина провару збільшується, що сприяє кращому зчепленню матеріалів. Однак перевищення оптимальних значень струму може призвести до перегріву матеріалу і погіршення якості шва;

– залежність міцності від кута зварювання: максимальна міцність зварного шва досягається при зварюванні під кутом  $90^\circ$ , коли навантаження рівномірно розподіляється по площі шва. Чим менший кут зварювання, тим сильніше зменшується ефективна площа шва, що призводить до зниження міцності. Для всіх досліджуваних товщин алюмінієвих листів (1 мм – 6 мм)

зменшення кута зварювання до  $30^\circ$  призвело до значного падіння міцності, яка може знижуватися на 50% і більше порівняно з швами, звареними під кутом  $90^\circ$ . Особливо помітно це при кутах зварювання менше  $60^\circ$ , що демонструє різке зниження міцності шва, оскільки навантаження концентрується на меншій площі.

– вплив товщини листа на міцність зварного шва: зі збільшенням товщини металу міцність зварного шва також зростає. Наприклад, для алюмінієвих листів товщиною 6 мм шов витримує до 3000 кг при куті  $90^\circ$ , тоді як для листів товщиною 1 мм це значення складає 500 кг. При зміні кута зварювання товстіші листи демонструють більш плавне зниження міцності, що можна пояснити їхньою більшою здатністю компенсувати втрати через зміну кута.

Для досягнення найвищих показників міцності шва необхідно враховувати всі три чинники: струм, кут і товщину металу. Оптимальне співвідношення цих параметрів забезпечує максимальну міцність зварного шва.

Для забезпечення максимальної міцності зварних швів необхідно дотримуватись оптимальних параметрів зварювання, які залежать від матеріалу, товщини листів та конфігурації конструкції. Зварювання під кутом  $90^\circ$  забезпечує найбільшу міцність, тоді як зменшення кута зварювання призводить до поступового зниження навантажувальної здатності шва. Правильний вибір зварювального струму також є критичним фактором для отримання якісного і міцного зварного з'єднання.

За табличними даними експериментів була побудована лінійна регресійно-кореляційна модель.

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ

Зварювальні роботи – вид професійної діяльності підвищеної небезпеки. В ході виконання зварювальних робіт мають місце не тільки фізичні, але і хімічні процеси, які несуть у собі реальну загрозу здоров'ю і життю людини у разі недотримання правил техніки безпеки. Наприклад, УФ-випромінювання залишає опіки на руках і пальцях, обпікає очі при прямому впливі.

У процесі зварювання також виділяються випари, в яких містяться мікрочастинки розплаву металів. При потраплянні в організм, вони уражують органи дихання зварювальника і викликають отруєння. Крім того, висока ймовірність отримати сильний опік від бризок розплавленого металу [23].

Незалежно від місця використання зварювального обладнання (у приміщенні або на вулиці), існує ризик отримати травму або опік. При цьому небезпека є як для самого зварювальника, так і людей, що його оточують.

Оскільки зварювальні роботи – процес підвищеної небезпеки, існує безліч факторів ризику отримання травми:

- іскри, що утворюються у процесі зварювання, легко пропалюють всі види тканин, окрім спец захисту. Це призводить до опіків різного ступеню тяжкості;
- бризки розплавленого металу пропалюють взуття зі штучних матеріалів;
- за розплавлення металу утворюються гарячі пари, які призводять до опіків очей або шкіри обличчя;
- під час викидання іскор у процесі зварювання можуть спалахнути горючі матеріали поблизу;
- ризик ураження електричним струмом у разі поганої ізоляції кабелю;
- шуми високого рівня, які генерує зварювальний апарат під час роботи;
- ультрафіолетове та інфрачервоне випромінювання;

- під час дугового зварювання випромінюється яскраве світіння, яке сліпить очі;

- під час плавлення металів у повітря виділяються випари з речовинами, які надають шкідливий вплив на органи дихання: свинець, хром, цинк, кадмій та інші;

- висока ймовірність отримання опіку через тепловий вплив пальника або електричної дуги;

Щоб уникнути будь-яких ризиків потрібне суворе дотримання стандартів безпеки.

Загальні правила з техніки безпеки під час роботи зі зваркою:

- постійно контролюйте формування зварювального шва;
- огорожуйте робочу зону захистом висотою 1,8 м, щоб зварювальна дуга не нашкодила випадковим перехожим;
- на місці проведення робіт не має бути сміття та легкозаймистих предметів;
- використовуйте засоби захисту очей і обличчя;
- під час робіт на висоті використовуйте страхувальні пояси;
- пересувайте зварку тільки після повного припинення подачі електроживлення;
- слідкуйте, щоб зварювальні кабелі не скручувалися в процесі роботи;
- під час виконання кузовних робіт на автотранспорті обов'язково відключайте акумулятор;
- обов'язково носіть спеціальний одяг: краги з вогнетривких матеріалів, взуття зі шкіри та повсті, захисну маску і, у разі необхідності, респіратори і каску.

Навіть якщо зварка може працювати у вологому середовищі, дана операція суворо заборонена. Працювати під дощем або в снігопад небезпечно!

Також не варто забувати, що в процесі плавлення металів утворюється інтенсивне випаровування шкідливих речовин. Тому робота за відсутності

втяжної вентиляції є неприпустимою. У виняткових випадках можна використовувати спеціальні засоби захисту органів дихання, але лише нетривалий час.

Робота з електричними схемами зварювального апарату вимагає підвищеної уваги. Щоб уникнути ураження струмом та отримання електричного опіку слід дотримуватися заходів безпеки:

- обов'язково перевірте заземлення зварювального обладнання перед його увімкненням;
- для освітлення рекомендується використовувати джерела з освітленням у 12 В;
- перевіряйте стан ізоляції кабелів і електродотримачів – на них не має бути тріщин, розривів та інших пошкоджень;
- перевіряйте надійність всіх контактів до початку робіт;
- живлення енергії повинно подаватися через розподільний щит зі встановленими запобіжниками.

Крім того, для забезпечення безпеки:

- довжина кабелю повинна бути не більше 10 м;
- різні з'єднання силового кабелю неприпустимі (за винятком контакту через муфтове з'єднання);
- значення напруги холостого ходу має бути не більше 90 В.

Робота з газозварювальним обладнанням передбачає використання особливих правил. Під час транспортування газові балони мають бути суворо у вертикальному положенні, а всі вентиля – закриті захисними ковпаками.

Перед початком зварювання та різання металу газозварювальним обладнанням уважно огляньте пальник. Особливу небезпеку становить наявність на ньому мастила, оскільки це може призвести до детонації горючої суміші.

У процесі роботи між соплом і заготовкою має зберігатися оптимальний зазор. При цьому тиск газу має бути постійним.

Якщо чути хлопки зворотного удару при зварюванні, то подача газу має бути негайно перекрита. Перш за все, слід перекрити ацетилен і тільки після цього – кисень. Відключати газові магістралі слід виключно згідно з інструкцією.

У процесі роботи газозварювального обладнання велике значення має пожежна безпека. З огляду на ймовірність розбризкування розплавленого металу і шлаку, а також іскри, що летять під час зварювання, резервуари з газом повинні розташовуватися на відстані не менше 5 м від робочої зони. Рекомендується також навісити шланги, щоб вони не стелилися по землі.

Для захисту обличчя та органів зору під час проведення зварювальних робіт слід використовувати спеціальні засоби індивідуального захисту – маски зварювальника. Економити на них небезпечно для життя і здоров'я.

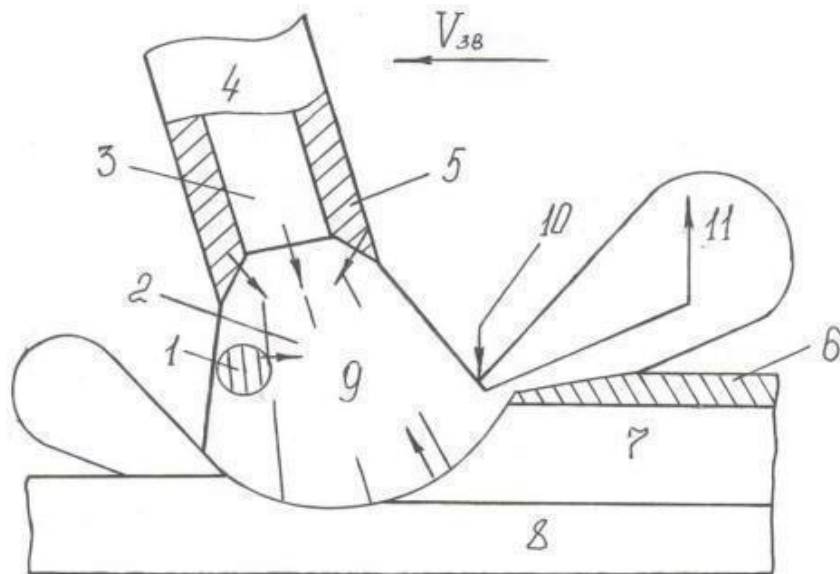
Під час електродугового процесу внаслідок впливу на основний метал і матеріал електрода тепла дуги виникає їх плавлення та часткове випаровування [20]. Пари матеріалів електрода і зварювальної ванни, що утворюються в високотемпературній зоні, виділяються в повітря навколишнього середовища, яке має більш низьку температуру, де, конденсуючись в тверді частинки, утворюють в повітрі зважені дрібнодисперсні частинки, які за рахунок аеродинамічних сил тривалий час можуть знаходитися в зваженому стані (рисунок 4.1).

Таким чином, за механізмом утворення зварювальних аерозолів відносяться до аерозолів конденсації і являють собою дисперсну систему, в якій дисперсною фазою є дрібні частинки твердої речовини, а дисперсійним середовищем – суміш газів. В науковій літературі також зустрічаються такі терміни як тверда та газоподібна фаза, або складова зварювального аерозолу. Хоча, виходячи з визначень колоїдної хімії, аерозолем є саме тверді частинки речовини, що знаходяться в повітрі у зваженому стані.

В залежності від розміру частинок аерозолу вони можуть осідати в трахеї, бронхах та бронхіолах, а потім видалятися з цих органів за допомогою

волосків. Якщо осілий пил погано розчиняється в слизистій оболонці та тканинах органів дихання, то він не викликає пневмоконіозу. Якщо ж осілі частинки пилу розчинні, то їх загальна токсична дія на організм може виявлятися в залежності від хімічного складу цього пилу.

Інтенсивність утворення ЗА визначається швидкістю плавлення електродного матеріалу і залежить від зварювального струму та напруги дуги, від складу зварювальних матеріалів, основного металу і захисного середовища, а також від положення шва у просторі та техніки зварювання. Встановлено, що при зварюванні покритими електродами в ЗА переходить від 1 % до 3 % від маси електрода, а у випадку зварювання плавким електродом в захисних газах – від 0,5 % до 2 % від маси зварювального дроту. Хімічний склад ЗА обумовлено складом зварювальних матеріалів від 80 % до 90 %.



1 – крапля металу; 2 – дуга; 3 – стрижень електрода; 4 – електрод, що плавиться; 5 – покриття електрода; 6 – шлак; 7 – метал шва; 8 – основний метал;

9 – високотемпературна пара; 10 – границя конденсації; 11 – аерозоль

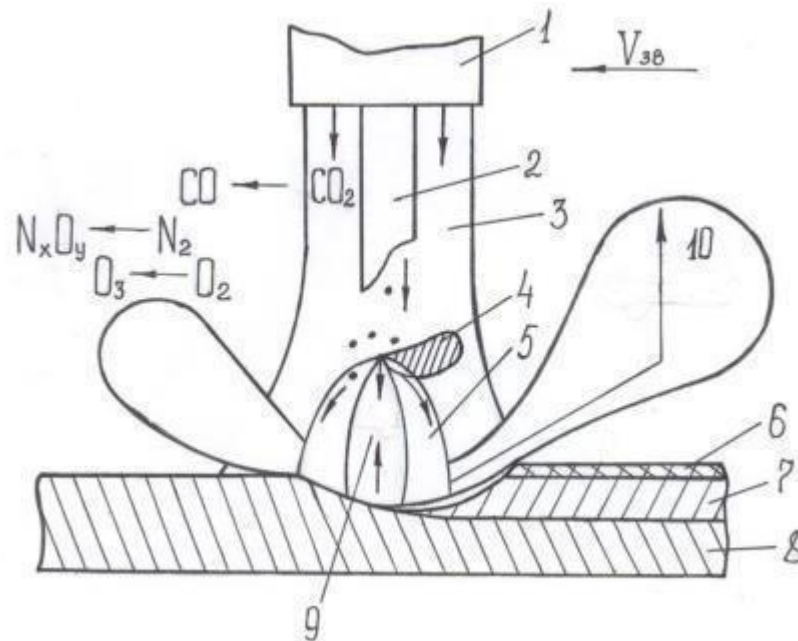
Рисунок 4.1 – Механізм утворення ЗА при зварюванні покритими електродами

Разом з пилом в виробничому середовищі розповсюджуються і шкідливі гази, які за певних умов можуть призвести до раптового отруєння людей. Як правило, вони не визначаються візуально і в багатьох випадках не мають запаху – тому є небезпечними. Деякі досить поширені у виробничому процесі гази мають питому вагу більшу за питому вагу повітря і накопичуються у низьких ділянках приміщень (підвалах, шахтах та ін.), досягаючи значних концентрацій. Це дуже небезпечно, бо може привести до отруєння, а в разі горючого чи вибухового газу – до вибуху або пожежі.

Машинобудівні підприємства, на яких використовується зварювання, пов'язані з використанням таких газів, як діоксид вуглецю, аргон, ацетилен, або з утворенням оксиду вуглецю, оксидів азоту, озону, фтористого водню, тетрафтористого кремнію та інші [21].

Під час зварювального процесу в повітря робочої зони надходить суміш газів, що утворюються в результаті термічної дисоціації газошлакоутворюючих компонентів, які входять до складу зварювальних матеріалів, або в результаті фотохімічної дії ультрафіолетового випромінювання зварювальної дуги на молекули газів захисної атмосфери та оточуючого дугу повітря.

При зварюванні в захисних газах склад газоподібних речовин, що утворюються, визначається складом захисної суміші (рисунок 4.2).



- 1 – сопло пальника для подачі захисного газу; 2 – зварювальний дріт;  
 3 – захисний газ; 4 – крапля металу; 5 – дуга; 6 – шлак; 7 – метал шва; 8 – основний метал; 9 – пара; 10 – аерозоль

Рисунок 4.2 – Механізм утворення газів та ЗА при зварюванні в різних типах газів

Випадки отруєння комплексом газів були зафіксовані в практиці кисневоацетиленового зварювання і різання в невеликих недостатньо вентиляованих приміщеннях та всередині котлів, трубопроводів і т.п. Під дією наркотичного ацетилену на нервову систему зварник непритомнів, отримував отруєння оксидом вуглецю, а дія оксидів азоту призводила до набряку легень. В багатьох випадках це призводило до смертельних наслідків. Слід зазначити, що на організм зварника, який працює в запиленому та загазованому приміщенні також впливає інтенсивність праці та параметри мікроклімату. При цьому посилена дихальна діяльність призводить до поглинання підвищених доз повітря, а разом з ним – шкідливих речовин; високі температури повітря посилюють шкідливу дію отрут на організм людини.

Слід виділити особливий тип маски зварювальника – «Хамелеон». Вони

оснащені функцією автоматичного регулювання прозорості щитка (затемнюється тільки під час запалювання дуги). Сучасні моделі масок дозволяють налаштувати кут нахилу, глибину посадки і окружності. Це не тільки забезпечує надійний захист очей зварювальника, але і робить роботу комфортніше.

Слід пам'ятати, що захисні скельця окулярів забезпечать високий рівень захисту очей зварювальника, але вони не захищають шкіру обличчя від опіків.

Існують суворі вимоги до засобів індивідуального захисту зварювальника. Їх основною функцією є надійний захист від електричної дуги і окалини металу. Засоби захисту включають у себе костюм зварювальника, спецвзуття, маску і краги.

Костюм зварювальника має виготовлятися зі спеціальної вогнетривкої тканини (щільна шкіра, брезент, спилка і т.д.).

Вимоги до засобів захисту:

- перевірити спецодяг на наявність масляних плям та інших виробничих мастил перед початком кожного робочого дня.

- взуття має бути на товстій підошві, що не пропускає струм. Наявність на взутті металевих накладок або цвяхів неприпустима.

- усередині носка взуття має бути щільна вставка для захисту пальців ніг від важких предметів.

- краги підбираються за типом зварювальних робіт. У деяких випадках (наприклад, під час газозварювання) замість захисного костюма можуть використовуватися нарукавники і фартухи.

- у масці зварювальника не має бути дефектів. Вона повинна підбиратися суворо за розміром – кріплення до голови має бути щільним.

- світлофільтр повинен не тільки добре захищати очі, але і забезпечувати хороший огляд зварювальнику, щоб він міг контролювати робочий процес.

За будь-яких порушень вимог до засобів захисту ризик отримання опіку та інших травм значно підвищується.

Освітленість робочої зони має велике значення під час роботи зі зварювальним обладнанням. Важливо забезпечити постійну присутність денного світла або встановити освітлювальні прилади за його відсутності.

Будь-яке обладнання вимагає своєчасної діагностики. Не рекомендується займатися самостійною перевіркою його технічного стану – це може мати негативні наслідки. Краще звернутися до спеціалізованих сервісів.

За вимогами безпеки у процесі зварювання заготовки слід викласти на робочому столі і закріпити між собою спеціалізованими інструментами: струбцинами або магнітними кутниками. При цьому всі зварювальні матеріали, що використовуються, мають бути вогнетривкими.

## ВИСНОВКИ

В ході виконання кваліфікаційної роботи було розглянуто предметну область зварювання. Проаналізовано основні існуючі методи зварювання. В процесі аналізу було методів виявлено їх переваги та недоліки.

Для проведення досліджень впливу параметрів зварювання TIG на міцність зварного з'єднання, був розроблений та створений тестовий стенд, який би дозволяв би змінювати навантаження та тестові зразки. За основу стенда була взято метод перевірки гнучкості за допомогою тензоперетворювача. Були описані його принцип дії та комплектуючі, такі як:

- тензорезистор;
- аналого-цифровий перетворювач;
- плата керування;
- кінцевий вимикач механічний.

Використовуючи розрахунки загального тиску та сили, що діє на балку, була проведена конвертація значень напруги в навантаження. Дані структуровані у відповідній таблиці.

Для калібрування та вимірювань був розроблений та використаний код, наведений в Додатку А.

Для конвертації значень напруги в тиск був розроблений та використаний код, наведений в Додатку Б.

В ході проведення досліджень виявили вплив параметрів зварювання на якість зварного шва. В цих експериментах до моделі залежності чинників, які впливають на якість зварного шва, були включені наступні параметри:

- сила струму;
- товщина металевих заготовок;
- кут під яким відбувається зварювання.

Використовуючи тестовий стенд та відповідне обладнання, провели

дослідження впливу зварювального струму на міцність зварного шва та його граничне навантаження. Дані структурували в таблиці та побудували відповідні графіки.

За допомогою тестового стенду та відповідного обладнання було проведено дослідження впливу кута зварювання на міцність зварного шва та його граничне навантаження. Дані структурували в таблиці та побудували відповідні графіки.

Використовуючи тензорезистор було знайдено максимально допустиме навантаження, що витримують зварені металеві заготовки, в залежності від зміни зварювального струму, товщини матеріалу та кута зварювання.

В ході проведення експериментів була знайдена кореляція та побудована відповідна регресійно-кореляційна модель, що дозволяє виявити відповідну залежність.

Також, отримані результати роботи можна віднести до Цілі сталого розвитку 9 «Промисловість, інновації та інфраструктура», а саме п.9.4 «Високотехнологічне машинобудування».

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Д.М. Максимов. Види зварювання для верстату точкового зварювання з ЧПУ. Виробництво і мехатронні системи 2024 («Manufacturing and mechatronic systems 2024» M&MS2024) [Електронний ресурс] : збірник матеріалів VIII-ої Міжнародної конференції / Харківський національний університет радіоелектроніки ; [редкол.: І.Ш. Невлюдов та ін.]. – Харків : ХНУРЕ, 2024. – 69–71 с.

2. Технічні засоби автоматизації: підручник / І.Ш. Невлюдов, та ін. Кривий Ріг : Криворізький коледж НАУ, 2019. 366 с.

3. Гуменюк І.В. Обладнання та технології зварювальних робіт : навч. посіб. Київ : Грамота, 2019. – 120 с.

4. Биковський О.Г. Зварювання, різання та контроль якості під час виробництва металоконструкцій : Київ : Основа, 2021. – 402 с.

5. ДСТУ 3008–15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. Структура та правила оформлення. Введ. 2015–06–22. К. Держстандарт України, 2017. – 29 с.

6. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка, освітньо-професійних програм: «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. І. Ш. Невлюдов, Р. В. Артюх, В. В. Безкоровайний, Н. П. Демська, В. В. Євсєєв, О. І. Филипенко, О. М. Цимбал. Харків: ХНУРЕ, 2023. 55 с..

7. Лашенко Г.І., Нікітюк Ю.А. Розширення технологічних можливостей зварювального виробництва : Київ, 2019. – 360 с.

8. Lincoln Electric [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.lincolnelectric.com/en-gb/support/welding-howto/Pages/welding-how-to.aspx>

9. Miller Welds [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу:

<https://www.millerwelds.com/resources/welding-resources>

10. American Welding Society Electric [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.aws.org/home>

11. Івченко П.С. Ручне дугове зварювання: навч. посіб. Кам'янське : Дніпровський державний технічний університет, 2018. – 22 с.

12. СварМакс [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://svarmax.com.ua/ua/publ/chto-takoe-tochechnaya-svarka-tehnologicheskij-protsess>

13. Все про зварювання [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://zvarka.info/zagalna-informaciya-pro-tochkove-zvaryuvannya/>

14. Точкове зварювання: сфери застосування та особливості технології [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://mestro.com.ua/uk/tochkove-zvaryuvannya/>

15. Що таке точкове зварювання опором [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.fronius.com/uk-ua/ukraine/zvaryuvalni-tehnolohiyi/svit-zvaryuvannya/stiykist-tochkove-zvaryuvannya>

16. СварМастер [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://svarmaster.com/ua/g148207-kontaktno-tochechnaya-svarka>

17. Гаєвський О.А. Координація зварювальних робіт : Київ : Центр навчальної літератури, 2019. – 168 с.

18. Михайліцин С. В., Шешкеєв М.А. Основи зварювального виробництва : Київ : Основа, 2019. – 261 с.

19. Андрусевич А.О., Пономарьова Г.В., Функендорф А.О. Виробничі процеси та обладнання об'єктів автоматизації: навч. посіб. Кривий Ріг : Криворізький коледж НАУ, 2018. – 332 с.

20. Токарева О.В. Теорія автоматичного управління : Харків : ФОП Панов А.М., 2020. – 346 с.

21. Молтасов А.В., Клочков І.Н., Мотрунич С.І. Розрахунок зусиль при контактному стиковому зварюванні виробів : навч. посіб. Київ : Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України, 2020. – 122 с.

22. Гогіташвілі Г.Г., Лапін В. М. Основи охорони праці : навч. посіб.

Львів : Новий світ–2000, 2008. 232 с.

23. Биковський О.Г. Зварювання, різання та контроль якості під час виробництва металоконструкцій : Київ : Основа, 2021. – 402 с.