

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

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

другого (магістерського) рівня вищої освіти

на тему «Дослідження теплових деформацій деталей під час  
механізованого зварювання в середовищі захисних газів»

Виконав: студент VI курсу групи Маш-62

Спеціальності 133 Галузеве машинобудування  
(шифр і назва)

Юрій ВОВК  
(Ім'я та прізвище)

Керівник: к.т.н., доцент Петро КОРУНЯК  
(Ім'я та прізвище)

Дубляни 2024

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

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

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри машинобудування

\_\_\_\_\_  
(підпис)  
професор Віталій ВЛАСОВЕЦЬ  
(прізвище та ініціали)

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ року

## З А В Д А Н Н Я

на кваліфікаційну роботу студенту

\_\_\_\_\_  
Вовку Юрію Орестовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Дослідження теплових деформацій деталей під час механізованого зварювання в середовищі захисних газів»

Керівник роботи к.т.н., доцент Коруняк Петро Степанович  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

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

2. Строк подання студентом роботи до 19 січня 2024 року

3. Вихідні дані до работ:підручники та навчальна література зі зварювання, наукова література, присвячена вивченню питань теплових зварювальних деформацій, технічні характеристики зварювальних апаратів, методики проектування технологічних процесів зварювання, методики розрахунку величин теплових деформацій, стандарти на оцінку якості зварних з'єднань, інструкції з охорони праці.

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

4.1. Аналіз стану питання в теорії і практиці; 4.2. Теоретична частина; 4.3. Методика та результати експериментальних досліджень; 4.4. Охорона праці; 4.5. Визначення технологічної собівартості виконання робіт.

5. Перелік графічного матеріалу:

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

6. Консультанти розділів роботи

| Розділ     | Прізвище, ініціали та посада консультанта    | Підпис, дата   |                  | Відмітка про виконання |
|------------|--|----------------|------------------|------------------------|
|            |  | Завдання видав | завдання прийняв |                        |
| 1, 2, 3, 5 | Коруняк П.С.<br>доц. каф.<br>машинобудування |                |                  |                        |
| 4          | Городецький І.М.<br>доц. каф. УПБВ           |                |                  |                        |

7. Дата видачі завдання “ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ року

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів роботи                                   | Строк виконання етапів роботи | Відмітка про виконання |
|-------|---|-------------------------------|------------------------|
| 1     | Аналіз стану питання в теорії і практиці              | 02.06.23                      |                        |
| 2     | Теоретична частина                                    | 25.08.23                      |                        |
| 3     | Методика та результати експериментальних досліджень   | 29.09.23                      |                        |
| 4     | Охорона праці   | 27.10.23                      |                        |
| 5     | Визначення технологічної собівартості виконання робіт | 24.11.23                      |                        |
| 6     | Оформлення пояснювальної записки                      | 29.12.23                      |                        |
| 7     | Оформлення графічної частини                          | 19.01.24                      |                        |

Студент

\_\_\_\_\_  
( підпис )

Вовк Ю.О.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_  
( підпис )

Коруняк П.С.

(прізвище та ініціали)

**Вовк Ю.О.** «Дослідження теплових деформацій деталей під час механізованого зварювання в середовищі захисних газів». /Кваліфікаційна робота. Дубляни: Львівський національний університет природокористування, 2024. 72 с.

Проведено аналіз технологічного процесу механізованого зварювання в середовищі захисних газів, розглянуто впливу теплових деформацій, які можуть виникати під час електродугового зварювання на зміну геометрії зварюваних деталей. Розглянуто основні види напружень, які виникають у зварювальних конструкціях та деформації, до яких вони призводять.

Розглянуто параметри технологічного процесу механізованого зварювання та розраховано значення повздовжніх, поперечних та кутових деформацій, які можуть виникати під час зварювання відповідних з'єднань. Отримано теоретичні залежності величин деформацій від технологічних параметрів процесу зварювання та геометричних параметрів зварюваних деталей.

Розглянуто питання охорони праці під час виконання операцій механізованого зварювання.

Визначено собівартість виконання 1 метра зварного з'єднання механізованим зварюванням в середовищі захисних газів.

Табл. 12; рис. 40; бібліогр. джерел 27.

## ЗМІСТ

|  |    |
|--|----|
| ВСТУП  | 7  |
| 1 АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ В ТЕОРІЇ І ПРАКТИЦІ   | 8  |
| 1.1 Загальні відомості про процес механізованого зварювання                              | 8  |
| 1.2 Класифікація зварювальних напружень  | 10 |
| 1.3 Причини виникнення залишкових деформацій   | 12 |
| 1.4 Класифікація видів зварювальних деформацій   | 14 |
| 1.5 Теоретичні способи визначення залишкових напружень                                   | 14 |
| 1.6 Способи попередження напружень та деформації під час зварювання                      | 16 |
| 2 ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА   | 19 |
| 2.1 Параметри процесу зварювання в середовищі захисного газу                             | 19 |
| 2.2 Розрахунок режимів зварювання в середовищі захисного газу                            | 19 |
| 2.3 Теоретичний аналіз виникнення деформацій зварних конструкцій                         | 23 |
| 2.3.1 Поздовжні деформації в зварних конструкціях  | 23 |
| 2.3.2 Поперечні деформації в зварних конструкціях  | 30 |
| 2.3.3 Кутові деформації у зварних конструкціях   | 35 |
| 3 МЕТОДИКАТА РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ                                     | 39 |
| 3.1 Програма експериментальних досліджень  | 39 |
| 3.2 Обладнання для експериментальних досліджень  | 40 |
| 3.2.1 Джерело живлення електричної дуги  | 40 |
| 3.2.2 Робоче обладнання зварювального апарату  | 44 |
| 3.3 Методика експериментальних досліджень  | 47 |
| 3.4 Аналіз теплових деформацій деталей після зварювання                                  | 52 |
| 4 ОХОРОНА ПРАЦІ  | 58 |
| 4.1 Вимоги техніки безпеки під час експлуатації обладнання для механізованого зварювання | 58 |

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 4.2 | Моделювання процесу формування і виникнення<br>травмонебезпечної ситуації під час плазмового механізованого<br>зварювання | 60 |
| 5   | ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СОБІВАРТОСТІ<br>ВИКОНАННЯ РОБІТ  | 63 |
|     | ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ   | 68 |
|     | БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК  | 69 |
|     | ДОДАТКИ   | 72 |

## ВСТУП

Теплові деформації, викликані процесом електродугового зварювання, становлять проблему, яка виникає через невідповідність теплових розширень у зварному шві та навколишньому матеріал. Основна причина зварювальних деформацій – нерівномірне нагрівання матеріалу в ході зварювального процесу, який у свою чергу створює залишкові подовження та залишкове звуження через нерівномірність теплових розширень у зварному шві та зварюваних деталях.

Залишкові напруження поряд зі зварювальними деформаціями значною мірою надають негативний вплив на отримання точних розмірів конструкції, її придатність до застосування і собівартість. Ці фактори відображають повною мірою необхідність використання різних технологій, спрямованих на мінімізацію шкідливих явищ у зварювальних процесах. Дані технології застосовуються для того, щоб забезпечити величини зварювальних залишкових напружень і деформацій нижче за нормативні. Величина деформації може бути мінімізована в результаті обґрунтування оптимальних параметрів роботи зварювального обладнання, правильно вибраних методів підготовки зварювальних робіт, ведення зварювальних робіт та післяопераційного контролю якості проведених робіт. Якісний контроль за змінними параметрами режиму зварювання сприяє усуненню умов, які зумовлюють появу деформацій.

До конструктивних характеристик з'єднань, що впливають на теплову деформацію в основному відносять форму і геометричні розміри зварного шва. До технологічних характеристик, якими оцінюють якість зварювання відносять рівень залишкових напружень, величину деформацій, розміри і кількість дефектів конструкції. Перераховані характеристики в сукупності і будуть визначати якість технологічного процесу.

Викладений у кваліфікаційній роботі результати досліджень спрямовані на визначення впливу режимів і параметрів процесу механізованого зварювання з точки зору вирішення професійного завдання з мінімальною тепловою деформацією елементів зварної конструкції та максимальною якістю зварного шва.

# 1 АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ В ТЕОРІЇ І ПРАКТИЦІ

## 1.1 Загальні відомості про процес механізованого зварювання

Процес механізованого (напівавтоматичного) зварювання передбачає механізацію процесів збудження і підтримання горіння зварювальної дуги, подачі електродного дроту в зону плавлення з визначеною швидкістю, завершення процесу заварювання, заварювання кратера в кінці шва. Обладнання, яке для нього застосовують називають зварювальними півавтоматами. Вони можуть бути універсальними, загального призначення і спеціалізованими.

Класифікація зварювальних автоматів здійснюється за наступними показниками [1, 4, 11]:

- за способом переміщення вздовж зони зварювання – рухомі і стаціонарні;
- за видами електрода – для зварювання суцільним та порошковим дротом;
- за способом захисту дуги – під флюсом, в середовищі захисних газів, без захисту;
- за способом регулювання швидкості подавання електродного дроту – з плавним, ступінчастим і плавно-ступінчастим регулюванням;
- за способом підтримання напруги на дузі – з саморегулюванням або примусовим підтриманням напруги;
- за способом формування металу шва – з вільним або примусовим формуванням;
- за технологічним призначенням – для зварювання і для наплавлення.

Подавальні ролики механізмів подачі приводяться в дію електродвигуном через редуктор і забезпечують стабільну подачу електродного дроту без деформації його поверхні. Найбільш розповсюдженими є циліндричні ролики з рифленою поверхнею, з гладкими канавками, з канавками з насічкою, прогумовані, шестеренчасті з канавкою.

Переміщення пальника зі швидкістю зварювання вздовж зони формування з'єднання здійснюється зварювальником вручну. Струмopовідні



мундштуки та зварювальні пальники направляють електрод в зону зварювання і підводять до нього струм.

В комплект обладнання для подачі захисного газу входять балон з газом, газовий редуктор з манометрами або витратоміром, з'єднувальні шланги. Також в умовах експлуатації апарата в холодну пору року до нього може входити електричний підігрівач газу.

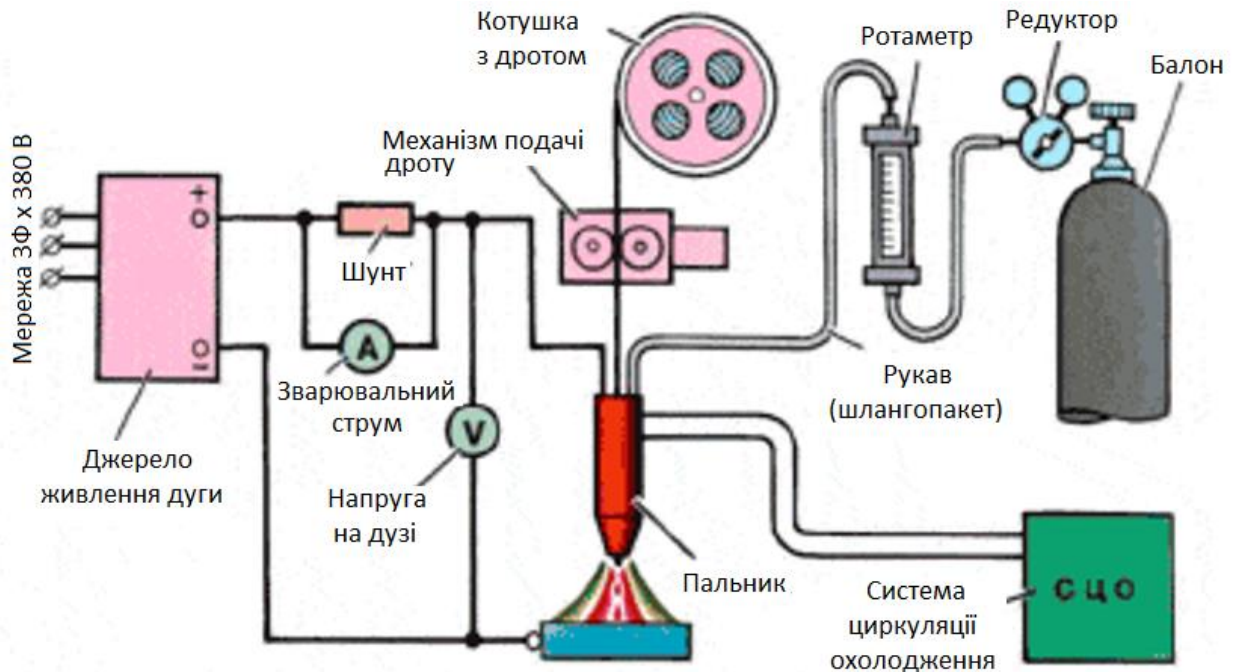


Рисунок 1.1 - Схема установки для зварювання в середовищі захисних газів

Пальник для зварювання плавким електродом у середовищі захисних газів підводить струм до електродного дроту, забезпечує ефективний газовий захист зони зварювання, мінімальне налипання бризок металу на внутрішню поверхню сопла. Для надійного захисту на початку шва газова апаратура забезпечує завчасне подавання захисного газу до моменту збудження дуги і затримку його виключання після припинення горіння дуги для захисту кінцевої частини шва від впливу газів повітря.

Зварювання в середовищі захисних газів з використанням сучасних джерел живлення інверторного типу для механізованого зварювання можна виконувати в 2Т або 4Т режимах роботи обладнання. У режимі 2Т при натисканні кнопки на пальнику дуга запалюється, а при її відпусканні - гасне. У

режимі 4Т обладнання продовжує працювати після відпускання кнопки на пальнику. В процесі роботи параметри зварювання можуть коригуватися за допомогою регуляторів зварювального струму і робочої напруги. При повторному натисканні кнопки на зварювальному пальнику, обладнання переходить в стан загасання дуги [21].

Сигнал від пальника до джерела живлення для початку зварювання подається в ручному режимі. Для закінчення зварювання, в залежності від обраного режиму роботи обладнання подається сигнал на джерело живлення про припинення подачі зварювального струму.

## 1.2 Класифікація зварювальних напружень

Електричне дугове зварювання характеризується різким локальним нагріванням, обумовленим впливом концентрованого джерела тепла, яке переводить метал на ділянці зварювання в пластичний і рідкий стани, і порівняно швидким охолодженням цієї ділянки. В результаті в зварній конструкції виникають тимчасові та залишкові зварювальні напруження. Тимчасові напруження спостерігаються тільки в процесі зварювання при зміні температури і, як правило, зникають після охолодження виробу. Залишкові напруження залишаються в зварювальній конструкції після закінчення зварювання, її повного остигання та зняття закріплювальних навантажень.

Залежно від протяжності силового поля та його фізичної суті залишкові напруження бувають:

- 1 роду – макронапруження, врівноважені в межах областей, розміри яких співмірні з розмірами виробу;
- 2 роду – мікронапруження, врівноважені в межах розміру зерен металу;
- 3 роду – субмікроскопічні напруженості, врівноважені в межах кількох міжатомних відстаней.

У зварних конструкціях з низьковуглецевих та низьколегованих сталей в основному розвиваються зварювальні напруження першого роду. Напруження

другого та третього родів можуть виникнути під час зварювання деяких легованих та високолегованих сталей.

Залежно від просторового розташування та взаємодії розрізняють зварювальні напруження:

- лінійні (одновісні) – діють лише по одній осі в одному напрямку (в елементах стрижневого типу);
- площинні (двовісні) – діють у двох напрямках (у пластинах та оболонках);
- об'ємні (трихвісні) – діють у трьох напрямках (у тривимірних тілах).

Одновісні, двовісні та тривісні напруження показані, відповідно, на рисунках 1.2.

При такому розподілі передбачається, що компоненти напруження, спрямовані відповідно по двох або трьох осях, співмірними між собою.

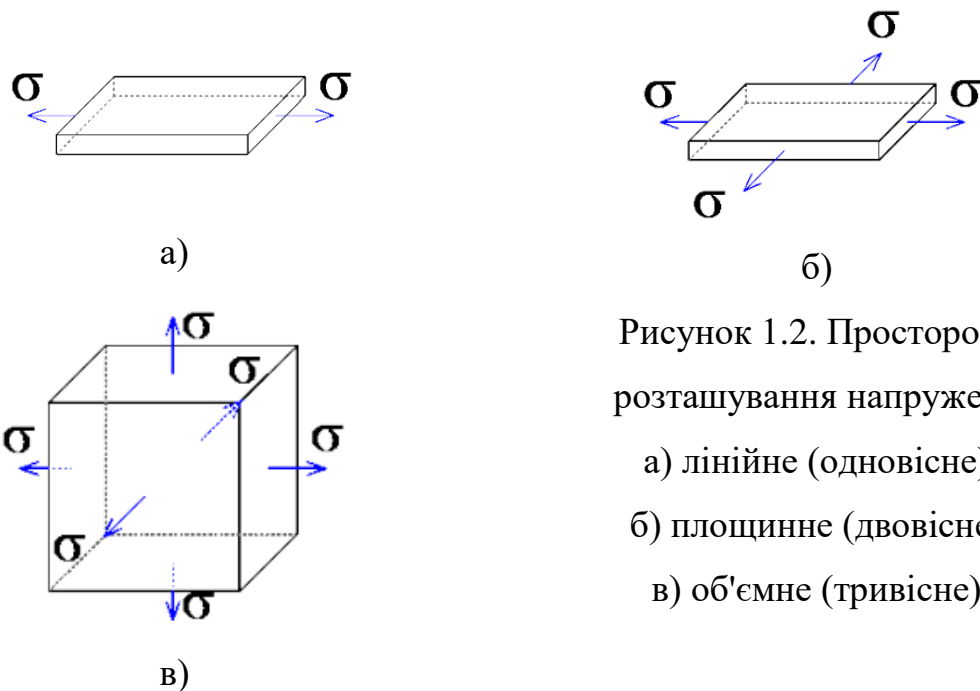


Рисунок 1.2. Просторове розташування напружень  
 а) лінійне (одновісне)  
 б) площинне (двовісне)  
 в) об'ємне (тривісне)

У напрямку дії напруження розрізняють поздовжні - спрямовані паралельно осі шва, та поперечні – спрямовані перпендикулярно до осі шва зварювальні напруження (рисунок 1.3).

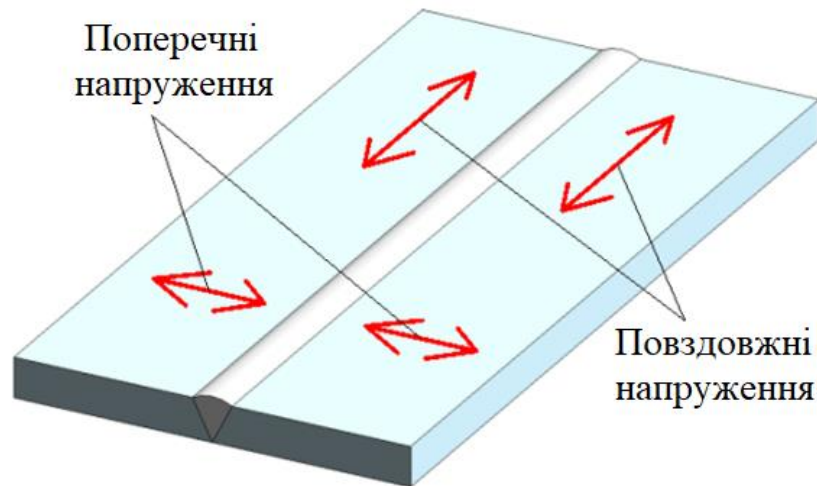


Рисунок 1.3 - Напрямок дії напруги

Остаточне формування зварювальних напружень відбувається після завершення процесу зварювання та звільнення зварної конструкції від кріплень. Разом із цим відбувається перерозподіл напружено-деформованого стану конструкції, виникають залишкові деформації і внаслідок цього перерозподіляються і внутрішні напруження конструкції.

### 1.3 Причини виникнення залишкових деформацій

Виділяють кілька причин утворення внутрішніх залишкових напружень у зварних з'єднаннях та конструкціях:

1. Локальне нерівномірне нагрівання металу. Як відомо, всі метали під час нагрівання розширюються, а при охолодженні стискаються. У процесі зварювання, в результаті місцевого нагрівання металу та його подальшого охолодження, у зварному з'єднанні утворюється нерівномірне температурне поле. Таким чином, в зварюваній деталі виникають термічні стискаючі і (або) розтягуючі внутрішні напруження. Величина цих напружень залежить головним чином від температури нагрівання, коефіцієнта лінійного розширення та теплопровідності зварюваного металу [16].

Під час зварювання жорстко закріпленої конструкції, величина термічних напружень може зростати внаслідок обмеженості її вільного переміщення у процесі нагрівання та охолодження. При цьому спочатку в конструкції, яка

нагрівається, зважаючи на її розширення, виникатимуть стискаючі внутрішні напруження, а при подальшому охолодженні в процесі її укорочення - напруження розтягу.

Коли величина внутрішніх напружень досягне рівня межі текучості, у металі почнуть відбуватися пластичні деформації, які призводять до зміни форми та розмірів зварюваного виробу. Після закінчення процесу зварювання, в областях, які зазнали нерівномірної пластичної деформування, виникнуть залишкові напруження.

2. Нерівномірні структурні перетворення в металі. При зварюванні конструкцій із вуглецевих і легованих сталей при нагріванні вище критичних температур можуть виникнути напруження, обумовлені фазовими перетвореннями зі зміною типу кристалічних ґрат та утворенням фази, яка володіє великим питомим об'ємом та іншим коефіцієнтом лінійного розширення.

Найбільше напруження може виникнути під час зварювання конструкцій з легованих сталей, схильних до загартування. У таких сталях перетворення структур йде з утворенням так званих гартових структур (мартенситу), які володіють великим питомим об'ємом, вищою твердістю, крихкістю та зниженою пластичністю. Таке перетворення супроводжується збільшенням об'єму; прилеглий до нього метал відчуватиме напруження розтягу, а ділянки зі структурою мартенситу - розтягу. У непластичних сплавах це може призвести до утворення тріщин.

3. Ливарне усадження наплавленого металу. При охолодженні та затвердінні розплавленого металу шва відбувається його усадка. Це пояснюється тим, що при затвердінні збільшується щільність металу, у результаті його об'єм зменшується. Внаслідок нерозривного зв'язку наплавленого металу з основним металом, що залишається в незмінному об'ємі та протидіючим усадці, у зварному з'єднанні виникають поздовжні та поперечні внутрішні напруження, які викликають відповідні деформації зварного з'єднання.

В результаті поздовжньої усадки в з'єднанні виникає деформація в поздовжньому напрямку відносно осі шва, а поперечна, як правило, викликає кутові деформації.

#### 1.4 Класифікація видів зварювальних деформацій

Деформації, які виникають під час зварювання, як і напруження, можуть бути тимчасовими і залишковими, а за напрямом дії – поздовжніми та поперечними.

Залежно від характеру, форми та розмірів зварюваних деталей, розрізняють зварювальні деформації [16, 23, 27]:

– загальні – спотворюють форму та розміри всієї конструкції (зміна лінійних розмірів конструкції та викривлення її осей у поздовжньому та поперечному напрямках);

– місцеві – поширюються на окремі елементи конструкції (деформації окремих елементів при втраті стійкості конструкції та кутові деформації).

Величина та характер деформацій в основному визначаються товщиною та властивостями основного металу, режимом зварювання, формою шва та конструктивними особливостями зварюваних деталей. Чим більше товщина металу, тим меншою є величина виникаючих в ньому деформацій, Це пояснюється більшою жорсткістю зварної конструкції.

Значний вплив на величину деформацій має значення коефіцієнта лінійного розширення металу. Чим більше значення цього коефіцієнта, тим більшою є величини, які виникають деформації.

#### 1.5 Теоретичні способи визначення залишкових напружень

В теорії зварювальних деформацій та напружень виділяють два основні методи вирішення задачі визначення зварювальних напружень та деформацій.

Перший метод у літературі відомий як метод фіктивних сил. Цей спосіб заснований на припущеннях одномірності поля напружень та гіпотезі плоских

перерізів. Він базується на припущенні, що в процесі остигання металу в зоні шва виникають усадкові напруження розтягу, які подаються у вигляді активного навантаження, прикладеного до зварюваної деталі. Застосовуючи гіпотезу плоских перерізів і враховуючи, що в даному поперечному перерізі внутрішні сили знаходяться в рівновазі, можна знайти основні параметри для визначення закону розподілу цих усадкових напружень.

Другий метод заснований на вирішенні зворотної температурної задачі деформованого середовища. У процесі дослідження зварювальних напружень і деформацій, які виникають у виробі, встановлюється закон розподілу температури зварювальної деталі для будь-якого моменту часу в залежності від потужності джерела та швидкості його переміщення. Далі, на підставі побудованої температурної кривої та гіпотези плоских перерізів, знаходять як тимчасові, так і залишкові напруження та деформації для даного поперечного перерізу зварної деталі.

У зв'язку з інтенсивним розвитком обчислювальної техніки стало можливим виконання будь-яких розрахунків, у тому числі й визначення залишкових зварювальних напружень. В даний час на передній план виходять універсальніші методики, які характеризуються простотою завдання вихідної інформації. В основі таких методик лежить, зокрема, метод кінцевих елементів, який дозволяє розв'язати це завдання (ANSYS, ABAQUS, SYSWELD) [24].

Чисельним моделюванням за допомогою кінцевого елементного програмного комплексу ANSYS 10.0 було досліджено напружено-деформований стан зварного шва зі сталі 15X5M з урахуванням виникнення у зварному з'єднанні та зоні термічного впливу гартованої структури.

В результаті дослідження було отримано такі результати:

- найбільша концентрація напружень і деформацій виникає в зоні зварного шва та в зоні сплавлення, при цьому еквівалентні залишкові напруження (за Мізесом) досягають межі текучості.

- рівень залишкових колових напружень при зварюванні без підігріву перевищує межу текучості металу шва на 21%.

– у разі зварювання з попереднім підігрівом величина максимальних еквівалентних та колових напружень знижується порівняно зі зварюванням без підігріву на 15% та 17,5% відповідно, за рахунок великих пластичних деформацій у зварному шві (збільшення на 9,8%).

### 1.6 Способи попередження напружень та деформації під час зварювання

Для попередження напружень і деформацій при зварюванні застосовуються конструктивний та технологічний методи.

Конструктивний спосіб базується на раціональному конструюванні зварних вузлів та включає наступні заходи [20]:

1. Призначення мінімальних перерізів зварних швів (за умовами міцності) для зменшення об'ємів, у яких протікають пластичні деформації.

2. Уникнення надмірних скупчень та перетинів зварних швів для зменшення площинних і об'ємних напружень, особливо в конструкціях, які сприймають ударні і змінні навантаження.

3. Розташування зварних швів симетрично до центру ваги виробу з метою взаємного врівноваження згинальних моментів.

4. Застосування переважно стикових швів, які є менш жорсткими та характеризуються меншою концентрацією силових напружень порівняно з кутовими швами.

5. Уникнення застосування накладок, косинок тощо, що веде до збільшення площинних деформацій.

6. Застосування допоміжних елементів (наприклад ребер жорсткості) з метою запобігання втрати стійкості елементів та утворення вигнутостей у просторово-розвинених конструкціях коробчатого перерізу. Для зменшення поперечної усадки ребра жорсткості необхідно розташовувати так, щоб при зварюванні нагріву піддавалися одні й ті ж місця основного металу.

7. Додавання до номінальних розмірів деталі припусків на усадку, рівних усадці металу для врівноваження деформацій.



8. Розташування зварювальних швів таким чином, щоб воно не заважало механізації зварювальних робіт.

Технологічний спосіб заснований на раціональному виборі теплового режиму, способу складання та технології зварювання та включає наступні заходи [20, 23]:

1. Застосування оптимального теплового режиму зварювання, при якому зона нагріву зварюваних деталей (ширина активної зони) мінімальна.

Для зменшення піків залишкових напружень та уникнення тріщин при зварюванні вільних деталей і, особливо, загартовуваних сталей тепловий режим слід підвищувати для збільшення об'єму розігрітого металу і зменшення швидкості його охолодження. Зварювання деталей великої товщини та гартованих сталей слід здійснювати з попереднім або супутнім підігрівом.

При зварюванні встик жорстко закріплених деталей з метою уникнення тріщин і розривів, навпаки, необхідно застосовувати знижені теплові режими. Зварювання жорстко закріпленої деталі великої товщини слід здійснювати багат шаровими швами, причому спочатку необхідно покласти шарі поперемінно по краях оброблення і потім заповнювати середину шва.

2. Підвищення щільності струму при зварюванні для рівномірного нагрівання металу за товщиною. За рахунок цього відбувається глибокий провар кореня шва і тим самим зменшуються зазори в стикових швах, що призводить до зменшення впливу поперечної усадки.

3. Уникнення скріплення вузлів і деталей прихватками, які утворюють жорстке закріплення.

4. Забезпечення рухомого стану закріплених деталей за допомогою клинових, центрувальних та інших складальних пристроїв. При цьому складальні пристрої повинні забезпечувати вільне переміщення деталей у напрямку поперечної усадки і утримувати їх від повороту, тобто, перешкоджати кутовій деформації.

5. Попереднє взаємне розташування деталей з урахуванням їхньої майбутньої деформації, а також попередні прогини, які зникнуть від деформації після зварювання.

6. Застосування такої послідовності накладання швів, за якої врівноважуються внутрішні напруження щодо центру ваги зварної конструкції, що зварюється, і не відбувається значний перегрів і усадка металу. Послідовність, яка застосовується під час накладання швів має забезпечувати рівновагу напружень та деформацій. Деформування від накладення попереднього шва має компенсуватись деформацією після накладання наступного шва. Протилежні паралельні шви у багатьох випадках доцільно виконувати одночасно чи поперемінно ділянками.

7. Забезпечення свободи переміщення зварних елементів. Особливо це стосується стикових швів, які мають велику поперечну усадку. Тому спочатку зварюються стикові шви, а потім кутові. Так, при зварюванні двотаврових балок спочатку виконується зварювання стиків стінок і полиць, а потім виконують зварювання поясів кутовими швами.

8. Застосування проковування у процесі зварювання для зменшення деформації. Проковування ущільнює шов шляхом розплющення остигаючого шару наплавлення і в результаті зменшує дію усадки шва. Останній облицювальний шар проковувати не рекомендується, щоб не викликати появу тріщин на поверхні шва.

## 2. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

### 2.1 Параметри процесу зварювання в середовищі захисного газу

Зварювання в середовищі захисних газів широко застосовується при виготовленні конструкцій з вуглецевих, низьколегованих, теплотривких сталей, середньолегованих, хромонікелевих і аустенітних сталей.

Основні типи з'єднань, виконувані в середовищі захисних газів, регламентовані ДСТ 14771-76.

Основними параметрами режиму зварювання газу є:

1. Діаметр електродного дроту,  $d_{ел}$ , мм.
2. Сила зварювального струму,  $I_{зв}$ , А.
3. Напруга на дузі,  $U_д$ , В.
4. Швидкість подачі зварювального дроту,  $V_{пд}$ , м/год.
5. Швидкість зварювання,  $V_{зв}$ , м/год.
6. Витрата захисного газу,  $q_г$ .

Додатковими параметрами режиму є:

7. Рід струму.
8. Полярність при зварюванні на постійному струмі.

### 2.2 Розрахунок режимів зварювання в середовищі захисного газу

Марку електродного дроту вибирають в залежності від хімічного складу і властивостей матеріалу зварних деталей. В якості електрода під час зварювання сталей в середовищі захисних газів застосовують леговані (Св-08ГС, Св-08Г2С, Св-08ГСМТ, Св-18ХГСА, Св-30ХГСА, Св-25ХМА і ін.) і високолеговані (Св-08Х20Н10Г6Т, Св-08Х10Н15Т та ін.) дроти [6, 21].

Діаметр електродного дроту  $d_{ел}$  вибирають в залежності від товщини зварюваного металу і положення шва в просторі з урахуванням забезпечення високої продуктивності процесу і усунення проплавів в процесі зварювання.

Під час вибору діаметра електродного дроту при зварюванні швів у нижнім положенні варто керуватися даними таблиці 2.1

Таблиця 2.1 - Параметри вибору діаметра електродного дроту для зварювання швів стикових з'єднань

| Товщина металу, мм    | Форма підготовки кромки   | Зазор у стику, мм | Діаметр електродного дроту, мм | Число проходів |   |
|-----------------------|---------------------------|-------------------|--------------------------------|----------------|---|
| 0,8-1,0               | Встик, без обробки кромки | 0-1,0             | 0,8                            | 1              |   |
| 1,5-2,0               |                           | 0-1,0             | 1,0                            | 1              |   |
| 2,5-3,0               |                           | 0-1,5             | 1,2                            | 1              |   |
| 3,5-4,0               |                           | 0-1,5             | 1,2                            | 2              |   |
|                       |                           |                   |                                | 0,6            | 1 |
| 4, 5-6,0              |                           | 0-1,5             | 2,0                            | 1              |   |
|                       |                           | 0,5-2,0           | 2,0                            | 2              |   |
| 7, 0-8,0              |                           | 0,5-2,0           | 2,0                            | 2              |   |
| 9, 0-10,0             |                           | 0, 5-2,5          | 2,0                            | 2              |   |
| 11,0-12,0             |                           | 1,0-3,0           | 2,0                            | 2              |   |
| 13, 0-14,0 15, 0-16,0 | V – подібна одностороння  | 1,0-2,5           | 2,0                            | 2              |   |
|                       |                           | 1,0-2,5           | 2,0                            | 3              |   |
| 17,0-18,0             | V – подібна двостороння   | 1,0-2,5           | 2,0                            | 4              |   |
| 19,0-20,0             |                           | 1,5-2,5           | 2,0                            | 4              |   |
| 21,0-22,0             |                           | 1,5-2,5           | 2,0                            | 5              |   |
| 23,0-24,0             |                           | 1,5-2,5           | 3,0                            | 5              |   |
| 25,0-28,0             |                           | 1,5-2,5           | 3,0                            | 6              |   |

При зварюванні кутових швів діаметр електродного дроту обирається залежно від товщини металу по таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 - Вибір діаметра електродного дроту для зварювання кутових швів

| Товщина металу, мм | Форма підготовки крайок               | Катет шва, мм | Зазор у стику, мм | Діаметр електродного дроту, мм | Число проходів |
|--------------------|---------------------------------------|---------------|-------------------|--------------------------------|----------------|
| 0,8-1,0            | Кутове без оброблення кромки          | 1             | 1                 | 0,5-1,0                        | 1              |
| 1,5-2,0            |                                       | 2-3           | 1                 | 0,8-1,2                        | 1              |
| 3,0-4,0            |                                       | 3-6           | 1                 | 1,2                            | 1              |
| 4,0-5,0            |                                       | 5-6           | 1                 | 1,2                            | 2              |
|                    |                                       |               |                   | 1,6                            | 1              |
| 5,0-6,0            |                                       | 5-6           | 1                 | 2,0                            | 1              |
| 7,0-8,0            |                                       | 6-9           | 1                 | 2,0                            | 2              |
| 9,0-10,0           |                                       | 9-1           | 1                 | 2,0                            | 2              |
| 11,0-13,0          |                                       | 11-14         | 1                 | 2,0                            | 3              |
| 14,0-16,0          |                                       | 13-16         | 1                 | 2,0                            | 5              |
|                    |                                       |               | 2,5               | 4                              |                |
| 17,0-20,0          | Кутове з V – подібною обробкою кромки | 20-22         | 1,5               | 2,0                            | 9              |
|                    |                                       |               |                   | 2,5                            | 8              |
| 21,0-28,0          |                                       | 24-27         | 1,5               | 2,0                            | 12             |
|                    |                                       |               |                   | 3,0                            | 9              |

Шви стикових з'єднань можуть виконуватися як з обробленням, так і без оброблення кромки.

Сила зварювального струму розраховується за формулою

$$I_{зв} = \frac{\pi \cdot d_{ел}^2}{4} \cdot j, \text{ А} \quad (2.1)$$

де  $j$  – допустима щільність струму в електродному дроті при зварюванні кутових швів (табл. 2.3);

$d_{ел}$  – діаметр електродного дроту, мм.

Таблиця 2.3 - Допустима щільність струму в електродному дроті

| Діаметр електродного дроту, мм      | 1,2                | 1,6                | 2,0                | 3,0                |
|-------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Щільність струму, А/мм <sup>2</sup> | 88-195<br>310-440  | 90-160<br>200-350  | 60-140<br>160-240  | 45-70<br>78-110    |
| Зварювальний струм, А               | 100-220<br>350-500 | 180-320<br>400-700 | 200-450<br>500-750 | 300-500<br>550-800 |

$$I_{зв} = \frac{3,14 \cdot 1,2^2}{4} \cdot 130 = 146,95 \text{ А}$$

Напруга на дузі ( $U_d$ ) визначається за формулою

$$U_d = 15 + \frac{50 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{d_{ел}}} \cdot I_{зв}, \text{ В} \quad (2.2)$$

$$U_d = 15 + \frac{50 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{1,2}} \cdot 150 = 21,84 \text{ В}$$

Швидкість подачі електродного дроту визначається за формулою

$$V_{пд} = \frac{4 \cdot \alpha_p \cdot I_{зв}}{\pi \cdot d_{ел}^2 \cdot \rho}, \text{ м/ГОД} \quad (2.3)$$

де  $\alpha_p$  - коефіцієнт розплавлення дроту, г/А · год;

$\rho$  - щільність металу електродного дроту, г/см<sup>3</sup>, (для сталі  $\rho = 7,8$  г/см<sup>3</sup>) [8].

Значення  $\alpha_p$  розраховується за формулою

$$\alpha_p = 3,0 + 0,08 \cdot \frac{I_{зв}}{d_{ел}} \quad (2.4)$$

$$\alpha_p = 3,0 + 0,08 \cdot \frac{150}{1,2} = 13$$

Тоді

$$V_{\text{пд}} = \frac{4 \cdot 13 \cdot 150}{3,14 \cdot 1,2^2 \cdot 7,8} = 221,16 \text{ м/год}$$

Швидкість зварювання обчислюється за формулою

$$V_{\text{зв}} = \frac{\alpha_n \cdot I_{\text{зв}}}{100 \cdot F_n \cdot \rho}, \text{ м/год} \quad (2.5)$$

де  $\alpha_n$  - коефіцієнт наплавлення, г/А год;

$$\alpha_n = \alpha_p \cdot (1 - \psi) \quad (2.6)$$

де  $\psi$  - коефіцієнт втрат металу на угар і розбризкування ( $\psi = 0,02 \dots 0,03$ ) [22];

$F_n$  - площа поперечного перерізу шва;

$$\alpha_n = 13 \cdot (1 - 0,02) = 12,74$$

Тоді

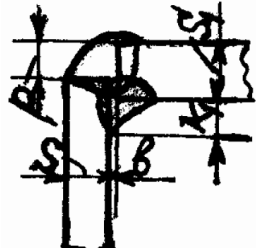
$$V_{\text{зв}} = \frac{12,74 \cdot 150}{100 \cdot 0,14 \cdot 7,85} = 17,4 \text{ м/год}$$

Площа поперечного перерізу зварного шва залежить від його виду. Її можна визначити користуючись таблицями конструктивних елементів швів (табл. 2.4, 2.5) [8].

Таблиця 2.4 - Конструктивні елементи стикових швів

| Умовне позначення шва                            | Конструктивні елементи шва  | $S = S_1$ | b   | e | g   |
|--|---|-----------|-----|---|-----|
| С2   |  | 1 - 2     | 1-2 | 5 | 1   |
|  |   | 3 - 4     |     | 7 | 1,5 |
|  |   |           |     | 9 |     |
| Площа шва $F = S \cdot b + 0,75 \cdot e \cdot g$ |   |           |     |   |     |

Таблиця 2.5 - Конструктивні елементи кутових швів

| Умовне позначення шва | Конструктивні елементи шва  | $S = S_1$ | b     | P             | e | g | $K_1$ |
|-----------------------|---|-----------|-------|---------------|---|---|-------|
| У3                    |  | 1 - 2     | 1-1,5 | Від 0 до 0,5S | 5 | 1 | 2-3   |
|                       |   | 3 - 4     |       |               | 7 |   |       |
|                       |   | 5-6       |       |               | 9 |   |       |
| Площа шва             | $F = S \cdot b + 0,5p^2 + 1,05p + 0,5K_1^2 + 1,05K_1$                               |           |       |               |   |   |       |

Витрата вуглекислого газу ( $q_2$ ) вибирають за даними таблиці 2.6 залежно від товщини металу та швидкості зварювання.

Таблиця 2.6 - Питомі норми витрачання вуглекислого газу при зварюванні сталей

| Товщина сталі, мм | Витрата газу, л/хв | Витрата газу на 1 м шва, л, при швидкості зварювання, м/год |     |     |    |    |      |    |      |    | Додаткова витрата на підготовчі операції |
|-------------------|--------------------|---|-----|-----|----|----|------|----|------|----|--|
|                   |                    | –   | –   | 72  | 48 | 36 | 28,8 | 24 | 20,4 | 18 |  |
| 3                 | 12                 | –   | –   | 72  | 48 | 36 | 28,8 | 24 | 20,4 | 18 | 0,6                                      |
| 4–5               | 14                 | –   | 140 | 84  | 56 | 42 | 33,6 | 28 | 23,8 | 21 | 0,7                                      |
| 6–8               | 16                 | 240   | 160 | 96  | 64 | 48 | 38,4 | 32 | 27,2 | 24 | 0,8                                      |
| 10–20             | 18                 | 270   | 180 | 108 | 72 | 54 | 43,3 | 36 | 30,6 | 27 | 0,9                                      |
| 14–16             | 20                 | 300   | 200 | 120 | 80 | 60 | 48   | 40 | 34   | 30 | 1  |
| 18–20             | 22                 | 330   | 220 | 132 | 88 | 66 | 52,8 | 44 | 37,4 | 33 | 1,1                                      |

Інші параметри процесу зварювання кутових швів визначаються аналогічно, як і для стикових швів.

### 2.3. Теоретичний аналіз виникнення деформацій зварних конструкцій

У процесі виготовлення зварних конструкцій спостерігаються зміни форми окремих елементів або всієї конструкції і відхилення від передбачених проектом розмірів. Ці відхилення, що також є дефектами, викликані деформацією (викривленням) виробу та усадкою швів. Для визначення причин виникнення деформацій зварних конструкцій проаналізуємо основні їх види.

#### 2.3.1. Поздовжні деформації в зварних конструкціях

Для прикладу розглянемо таврову балку, зварену з двох штаб (рис. 2.1). Матеріал конструкції – сталь Ст3. Балка має наступні геометричні параметри: довжина балки  $l = 6$  м; висота стінки  $h = 200$  мм; ширина полиці  $b = 100$  мм;

товщина стінки  $t_1 = 8$  мм; товщина полиці  $t_2 = 12$  мм; тип з'єднання ТЗ (ГОСТ 8713–79); катет шва  $k = 5$  мм.

Загальним видом деформації балки після її зварювання буде укорочення нейтральної осі та вигин опуклістю вгору. Причиною цього є нерівномірне нагрівання в поперечному перерізу, внаслідок чого виникають пластичні деформації скорочення металу в зоні нагріву до високої температури. Кількісно ці деформації вимірюються об'ємом поздовжнього вкорочення, а їх вплив на балку – поздовжньою силою усадки. Остання і спричиняє вкорочення по нейтральній осі. Оскільки лінія дії цієї сили дуже часто не збігається з нейтральною віссю (не проходить через лінію центру ваги перерізу балки), виникає згинальний момент, який і буде викликати деформацію згину в балці.

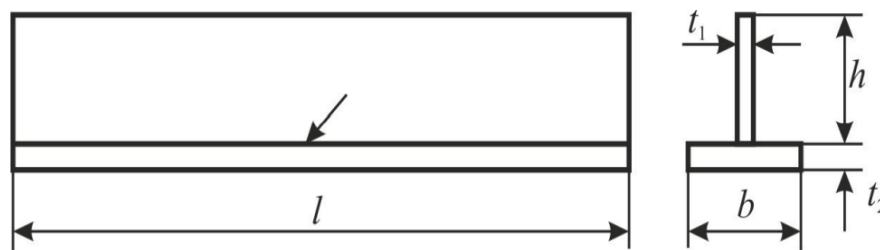


Рисунок 2.1 - Зварна таврова балка

Для визначення величини загальних деформацій розраховують об'єм поздовжнього вкорочення одного шва. Для сталі він визначається за формулою:

$$V = -0,335 \frac{\alpha}{c\rho} q_n l, \quad (2.7)$$

Після підстановки значень теплофізичних властивостей для низьковуглецевої сталі (температурного коефіцієнта лінійного розширення  $\alpha = 13,25 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$  і об'ємної теплоємності  $c\rho = 4,1 \text{ Дж}/(\text{см}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ ) отримаємо [14]

$$V = -1,08 \cdot 10^{-6} q_n \cdot l, \quad (2.8)$$

де  $q_n$  – погонна енергія зварювання, Дж/см;

$l = 600$  см – довжина шва.

Погонну енергію зварювання можна визначити в залежності від площі поперечного перерізу наплавленого металу за формулою:

$$q_n = A \cdot F_n. \quad (2.9)$$



У даному випадку коефіцієнт пропорційності  $A$  для зварювання в середовищі захисних газів складає  $64500 \text{ Дж/см}^3$ , а площа поперечного перерізу шва визначається за формулою:

$$F_H = k_o(k^2/2), \quad (2.10)$$

де  $k_o = 1,1$  – коефіцієнт, що враховує опуклість шва;

$k = 5 \text{ мм}$  – катет шва.

Тоді матимемо

$$F_H = 1,1(5^2/2) = 13,75 \text{ мм}^2 = 0,14 \text{ см}^2,$$

а погодинна погонна енергія становитиме

$$q_n = 64500 \cdot 0,14 = 9030 \text{ Дж/см}.$$

Об'єм поздовжнього вкорочення від одного шва становитиме

$$V = -1,08 \cdot 10^{-6} \cdot 9030 \cdot 600 = -5,85 \text{ см}^3.$$

Другий шов при послідовному зварюванні за рахунок часткового перекриття зон ППД буде збільшувати об'єм поздовжнього вкорочення менше ніж в два рази. Коефіцієнт збільшення приблизно приймають  $m_{1,2} = 1,3$  [15]. Тоді об'єм поздовжнього укорочення від двох швів буде рівний

$$V_{1,2} = m_{1,2} \cdot V = -1,3 \cdot 5,85 = -7,6 \text{ см}^3.$$

Сила усадки для двостороннього шва буде рівна

$$P = 21,6 \cdot q_n \cdot m_{1,2} = 21,6 \cdot 9030 \cdot 1,3 = 254000 \text{ Н} = 254 \text{ кН}.$$

Поздовжнє вкорочення нейтральної осі визначають як

$$\Delta l = \frac{V_{1,2}}{F} \quad (2.11)$$

де  $F = 100 \cdot 12 + 200 \cdot 8 = 2800 \text{ мм}^2 = 28 \text{ см}^2$  – площа поперечного перерізу балки.

Тоді

$$\Delta l = \frac{-7,6}{28} = -0,27 \text{ см} = -2,7 \text{ мм}.$$

Кут повороту кінцевих перерізів балки під час її вигину

$$\varphi = V_{1,2} \cdot z / I_y, \quad (2.12)$$

де  $I_y$  – момент інерції перерізу балки відносно осі  $y$ , перпендикулярної до площини згину;

$z$  – відстань від осі шва до осі балки (див. рис. 2.2).

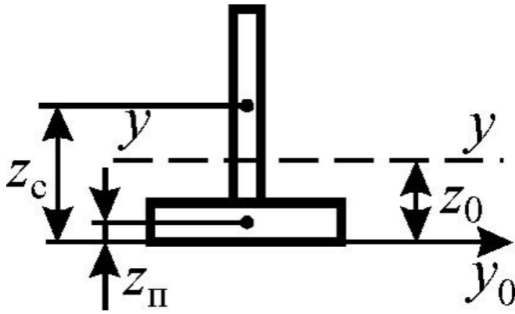


Рисунок 2.2 - Поперечний переріз балки:  
 $z_c$  і  $z_n$  – відповідно положення центрів ваги стінки та полиці балки відносно осі порівняння  $y_0$

Провівши вісь порівняння  $y_0$  через нижню кромку полиці визначимо геометричні характеристики перерізу (положення центру ваги і власний момент інерції відносно осі  $y$ ) [14].

Результати розрахунків наведені в таблиці 2.7.

Таблиця 2.7 – Результати розрахунку геометричних характеристик перерізу зварної балки

| Елемент перерізу | Положення центру ваги перерізу елемента $z_i$ , см | Площа перерізу елемента $F_i$ , см <sup>2</sup> | Статичний момент перерізу елемента $S_i$ , см <sup>3</sup> | Переносний момент інерції перерізу елемента $I_{yi}$ , см <sup>4</sup> | Власний момент інерції перерізу елемента $I_{0i}$ , см <sup>4</sup> |
|------------------|--|---|--|--|---|
| Стінка           | 11,2   | 16  | 179,2  | 2007   | 533   |
| Полиця           | 0,6  | 12  | 7,2  | 4  | 1   |
| Сума             |  | $F = 28$  | $\Sigma S = 186,4$   | $\Sigma I_{yi} = 2011$   | $\Sigma I_{0i} = 534$   |

Знайдемо положення центру ваги перерізу балки відносно осі порівняння:

$$z_0 = \frac{\Sigma S}{F} = \frac{186,4}{28} = 6,66 \text{ см} \quad (2.13)$$

Власний момент інерції перерізу балки:

$$I_y = \Sigma I_{yi} + \Sigma I_{y0} - F \cdot z_0^2 = 2011 + 534 - 28 \cdot 6,66^2 = 1303 \text{ см}^4 \quad (2.14)$$

Відстань між осями шва та перерізу балки становитиме:

$$z = z_0 - t_2 = 6,66 - 1,2 = 5,46 \text{ см.} \quad (2.15)$$

Кут повороту кінцевих перерізів балки буде рівний:

$$\varphi = V \cdot z / I_y = -7,6 \cdot 5,46 / 1303 = -0,232. \quad (2.16)$$

Стрілка прогину балки від повздовжньої деформації становитиме:

$$f = \varphi \cdot l / 8, = -0,032 \cdot 600 / 8 = -2,4 \text{ см.} \quad (2.17)$$

Схема деформації балки наведено на рис. 2.3.



Рисунок 2.3 - Схема деформування балки після зварювання

Для подальшого аналізу необхідно визначити розміри зони пружно-пластичних деформацій.

Площа деформації становитиме:

$$F_T = \frac{1}{1/F + z^2/I_z + 1200/q_n} \quad (2.18)$$

$$F_T = \frac{1}{1/28 + 5,4^2/1303 + 1200/9030} = 5,2 \text{ см}^2$$

Протяжність деформації від осі шва у всіх напрямках елементів поперечного перерізу балки:

$$b_T = \frac{F}{t_1 + 2t_2} = \frac{5,2}{0,8 + 2 \cdot 1,2} = 1,6 \text{ см.} \quad (2.19)$$

З урахуванням знайдених розмірів зони можна уточнити коефіцієнт впливу перекриття зон ППД у двосторонньому шві за формулою:

$$m_{1,2} = 1 + \frac{(t_1 + k)t_2}{F_{T1}} = 1 + \frac{(0,8 + 0,5) \cdot 1,2}{5,2} = 1,39 \quad (2.20)$$

тобто деформації від двостороннього шва будуть дещо більші від розрахованих (приблизно на 7 %) [15].

У стінці балки напруження будуть сумуватися внаслідок дії стиску силою усадки  $P$  і згину моментом  $M = P \cdot (z_0 - t_2)$ . Напруження, які утворюються під дією сили стиску розподіляються рівномірно по всьому перерізу балки: напруження згину - вище від нейтральної осі балки, а напруження розтягу - нижче від неї. Визначимо їх величину за формулою:

$$\sigma = \frac{P_{yc}}{F} + \frac{M_{yc} \cdot y}{I} \quad (2.21)$$

На нейтральній осі балки  $y_0 = 0$ , тому

$$\sigma_0 = \frac{P_{yc}}{F} = \frac{-254}{28} = -9,07 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} = -91 \text{ МПа}$$

На верхній кромці стінки  $y_1 = h + t_2 - z_0 = 20 + 1,2 - 6,7 = 14,5$  см.

Тоді напруження становитимуть

$$\sigma_1 = -254/28 + (-254 \cdot (6,7 - 1,2) \cdot (-14,5))/1303 = 6,45 \text{ кН/см}^2 = 64,5 \text{ МПа.}$$

У зоні ППД на нижній кромці стінки ці напруження розтягу досягають границі текучості матеріалу балки, тобто 240 МПа.

В полиці балки діють напруження стиску, оскільки вона розташована нижче від нейтральної осі балки на відстані  $y_2 = z_0 - t_2/2 = 6,7 - 1,2/2 = 6,1$  см. Величина цих напружень становитиме:

$$\sigma_2 = -254/28 + (-254 \cdot (6,7 - 1,2) \cdot (6,1))/1303 = -15,6 \text{ кН/см}^2 = -156 \text{ МПа.}$$

У зоні ППД напруження розтягу досягають границі текучості матеріалу балки, тобто 240 МПа.

На рис. 2.4 наведені епюри напружень

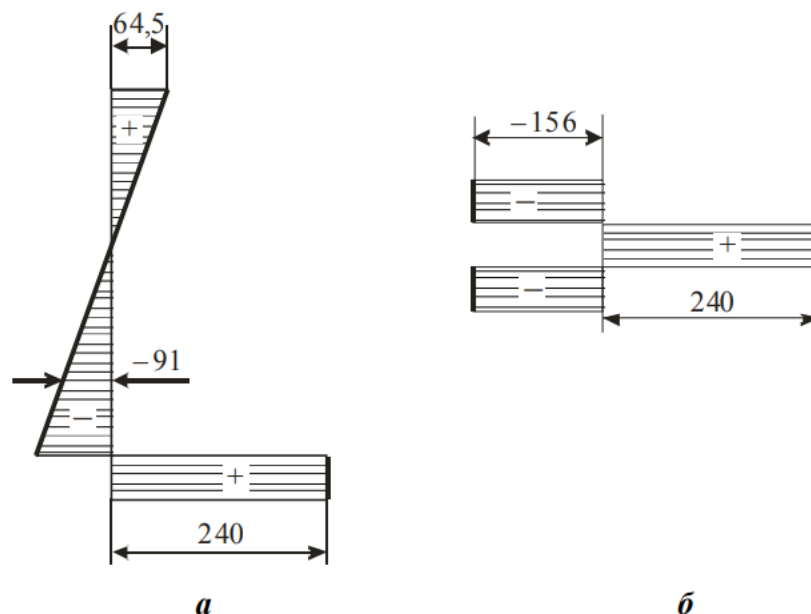


Рисунок - 2.4 Епюри напружень у стінці (а) та полиці (б) балки

Залежності повздовжніх деформацій зварної металоконструкції від геометричних параметрів її елементів наведено на рис. 2.5.

З рис. 2.5,а бачимо, що зі збільшенням товщини деталей величина повздовжніх деформацій зменшується. До зниження деформацій призводить також збільшення ширини полиці та висоти стінки балки (рис. 2.5,б). Однак,

збільшення довжини балки призводить до зростання сумарних повздовжніх деформацій (рис. 2.5,б).

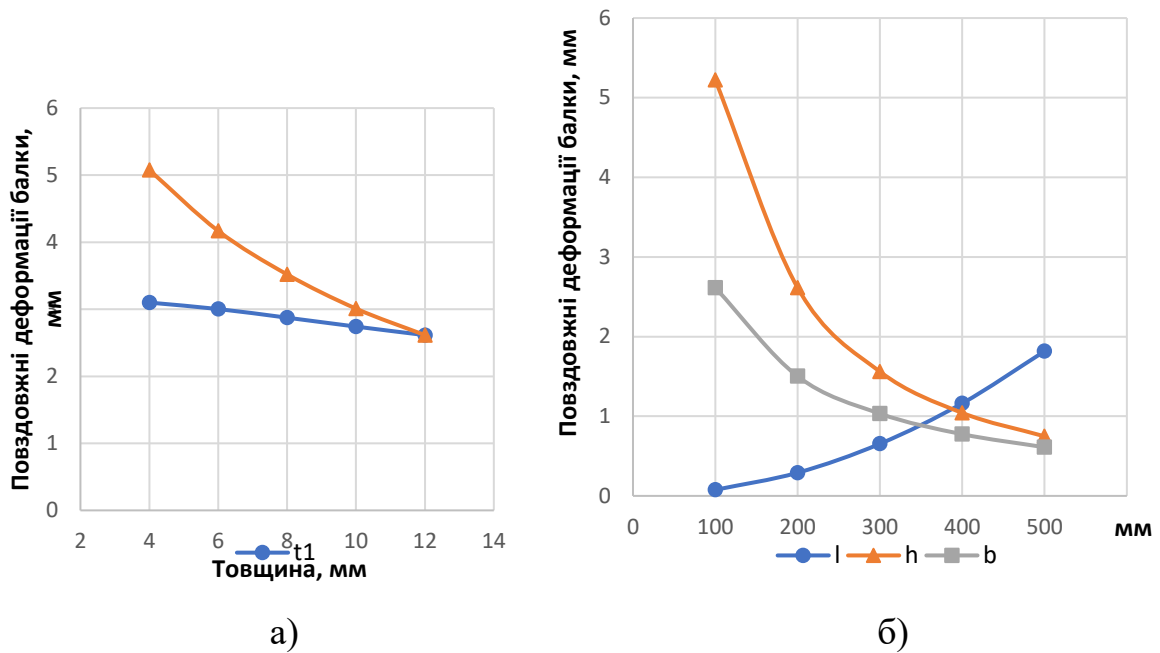


Рисунок 2.5 – Залежності повздовжніх деформацій балки від товщини деталей (а) та їх розмірів (б)

Результати впливу геометричних параметрів зварного шва, виражених через його катет  $k$  на величину повздовжніх деформацій відображає рис. 2.6.

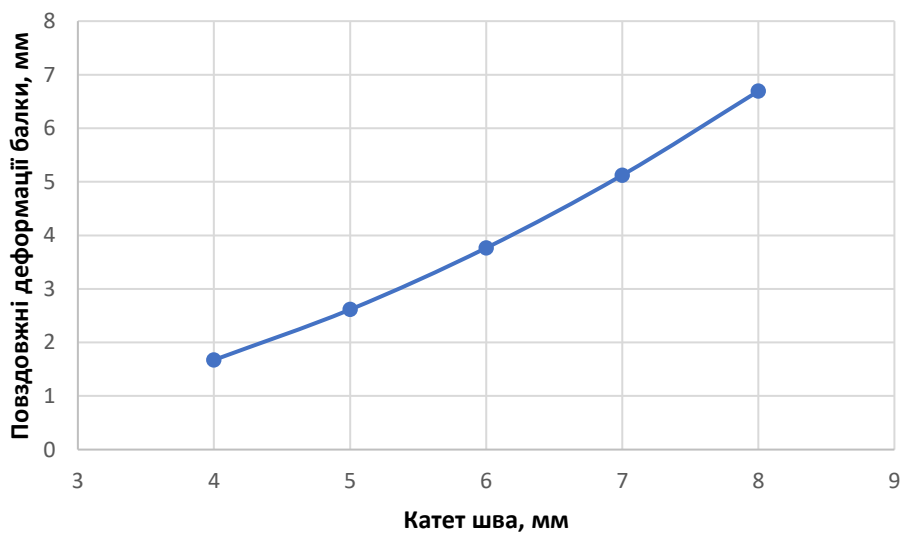


Рисунок 2.6 – Залежність повздовжніх деформацій балки від катета шва

Так, для більших значень катета шва деформації є більшими. Це можна пояснити тим, що в такому випадку збільшується об'єму наплавленого металу, а отже й тепловий вплив на деталі конструкції.

Враховуючи отримані результати можна стверджувати, що при виборі способу зварювання слід призначати ті способи, які дають менше нагрівання на одиницю об'єму наплавленого металу, і типи з'єднань, що передбачають менший об'єм наплавленого металу.

### 2.3.2. Поперечні деформації в зварних конструкціях

Для аналізу випадку виникнення поперечних деформацій розглянемо конструкцію таврової балки, до якої приварені приварюються косинки (рис. 2.7). Матеріал конструкції – сталь Ст3. Розміри балки такі: довжина  $l = 6$  м, висота стінки  $h = 400$  мм, ширина полиці  $b = 200$  мм, відстань між косинками  $a = 0,5$  м, товщина стінки  $s_1 = 6$  мм, полиці  $s_2 = 12$  мм, косинки  $s_3 = 5$  мм, тип з'єднань ТЗ (ГОСТ 5264–80), катет шва  $k = 5$  мм.

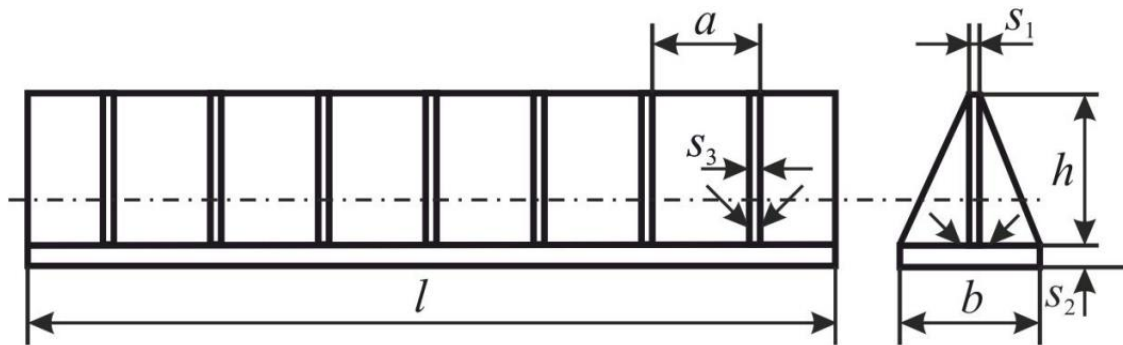


Рисунок 2.7 - Таврова балка з косинками

В такій балці загальними видами деформації від приварювання косинок до полиці будуть вкорочення нейтральної осі та вигин опуклістю вгору. Причиною їх виникнення ті ж самі, що і в попередньому варіанті.

Для визначення загальних деформацій необхідно розрахувати об'єм поперечного вкорочення від накладання одного шва. Для сталі воно визначається за формулою:

$$W = - \xi q_{n.n} l_{ш}, \quad (2.22)$$

де  $\xi = \alpha/c_p[0,25 + 0,75k_s(0,1 + k_{ж})]$ .

Для сталі Ст3 прийmemo  $\alpha/c_p = 3 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{Дж}$ , тоді

$$W = -3 \cdot 10^{-6} \cdot [0,25 + 0,75k_s(0,1 + k_{ж})] \cdot q_{n.n} \cdot l_{ш}. \quad (2.23)$$

Частка погонної енергії, яка витрачається на нагрівання полиці становить:

$$q_{n.n} = k_n \cdot q_n, \quad (2.24)$$

де  $q_n$  – погонна енергія зварювання, яку можна розрахувати через площу поперечного перерізу наплавленого металу  $F_n$  ( $q_n = \theta \cdot F_n$ );

$$k_n = 0,82 - 0,2s_p/s_n.$$

Для кутового зварного шва з катетом  $k$  площа наплавленого металу:

$$F_n = k_o \cdot k_2 / 2. \quad (2.25)$$

Прийнявши коефіцієнт, який враховує опуклість шва  $k_o = 1,4$ , отримаємо

$$F_n = 1,4 \cdot 5^2 / 2 = 17,5 \text{ мм}^2 = 0,175 \text{ см}^2.$$

Коефіцієнт пропорційності  $\theta$  для дугового зварювання дорівнює 64500, тоді повна погонна енергія складатиме:

$$q_n = 64500 \cdot F_n = 64500 \cdot 0,175 = 11300 \text{ Дж/см}^2.$$

Оскільки товщина косинки  $s_p = 5$  мм і товщина полиці  $s_n = 12$  мм, то коефіцієнт  $k_n = 0,82 - 0,2s_p/s_n = 0,82 - 0,2 \cdot 5/12 = 0,74$ .

Тоді частка погонної енергії, яка йде на нагрівання полиці під час приварювання до неї косинки, становитиме:

$$q_{n.n} = 0,74 \cdot 11300 = 8400 \text{ Дж/см}^2.$$

Коефіцієнт впливу ступеня прогрівання по товщині  $k_s$  визначають за допомогою графіка (рис. 2.8) в за відношенням  $q_{n.n}/s_n^2$ .

У нашому випадку  $q_{n.n}/s_n^2 = 11300 / 1,22 = 7800 \text{ Дж/см}^3$ , тоді  $k_s = 0,6$ .

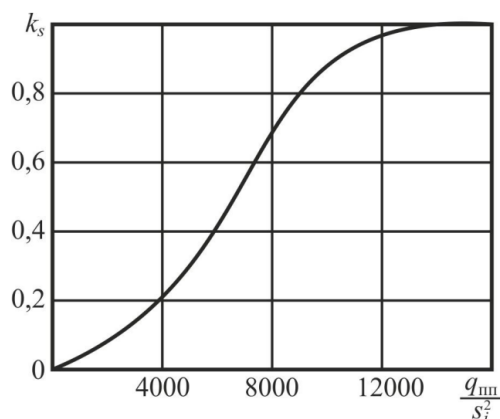


Рисунок 2.8 - Залежність коефіцієнта впливу ступеня прогрівання по товщині від питомої погонної енергії

Враховуючи те, що стінка балки, яка перетинає шов є ребром жорсткості, коефіцієнт впливу жорсткості приймають за рис. 2.9 за відношенням  $a/(2s_n)$ .

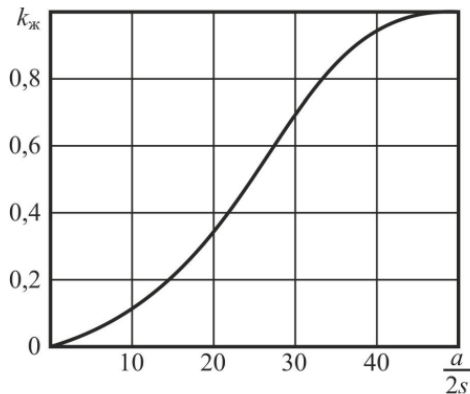


Рисунок 2.9 - Залежність коефіцієнта жорсткості від відносної відстані між ребрами

Для  $a/(2s_n) = 20/(2 \cdot 1,2) = 8,3$  (де  $a = 20$  см – ширина полиці);  $k_{жс} = 0,1$ .

Тоді об'єм поперечного вкорочення одного одностороннього шва, яким приєднується пара косинок до полиці, становить:

$$W = -3 \cdot 10^{-6} \cdot [0,25 + 0,75 \cdot 0,6 (0,1 + 0,1)] \cdot 8400 \cdot 20 = -0,202 \text{ см}^3.$$

Сумарний об'єм поперечного вкорочення для випадку з 12 парами косинок, які приварюються двостороннім швом (на довжині 6 м через кожних 0,5 м), становитиме:

$$W = -12 \cdot 2 \cdot 0,202 = -4,85 \text{ см}^3.$$

Геометричні характеристики перерізу наведені в (табл. 2.8).

Таблиця 2.8. Геометричних характеристик зварної балки

| Елемент перерізу | Положення центру ваги перерізу елемента $z_i$ , см | Площа перерізу елемента $F_i$ , см <sup>2</sup> | Статичний момент перерізу елемента $S_i$ , см <sup>3</sup> | Переносний момент інерції перерізу елемента $I_{yi}$ , см <sup>4</sup> | Власний момент інерції перерізу елемента $I_{0i}$ , см <sup>4</sup> |
|------------------|--|---|--|--|---|
| Стінка           | 21,2   | 24  | 518,4  | 10990  | 3200  |
| Полиця           | 0,6  | 24  | 14,4   | 9  | 3   |
| Сума             | -  | 48  | 532,8  | 10999  | 3203  |

Положення центру ваги перерізу відносно осі порівняння рівне (2.13):



$$z_0 = \frac{532,8}{48} = 11,1 \text{ см}$$

Власний момент інерції перерізу (2.14):

$$I_y = 10999 + 3203 - 48 \cdot 11,1^2 = 8290 \text{ см}^4.$$

Відстань між осями шва та балки (2.15):

$$z = 11,1 - 1,2 = 9,9 \text{ см.}$$

Загальне вкорочення балки вздовж осі та кут повороту кінцевих перерізів при вигині балки визначимо за формулами:

$$\Delta l = \frac{\Sigma W}{F} = \frac{-4,85}{48} = -0,1 \text{ см} = -1 \text{ мм} \quad (2.26)$$

$$\varphi = \frac{\Sigma W \cdot z}{I_y} = \frac{-4,85 \cdot 9,9}{8290} = -5,8 \cdot 10^{-3} \text{ рад} \quad (2.27)$$

Прогин буде спрямований угору, оскільки зварні шви знаходяться нижче від осі балки.

Враховуючи те, що всі поперечні шви будуть рівномірно розподілені вздовж балки, форма прогину осі близька до дуги, а отже стрілку прогину можна визначити за формулою:

$$f = \varphi \cdot \frac{l}{8} = -5,8 \cdot 10^{-3} \frac{600}{8} = -0,435 \text{ см} = -4,35 \text{ мм} \quad (2.28)$$

Після приварювання косинок ще й до стінки балки вкорочення осі балки збільшиться у декілька разів, оскільки довжина і кількість цих швів у два рази більші, крім того більшу величину мають коефіцієнти прогріву  $k_s$  і жорсткості  $k_{жс}$  [2].

Вигин зменшиться і змінить знак на протилежний, оскільки за практично тієї ж величини плеча  $z$  останнє має зворотний знак (ЦВ шва вищий за ЦВ перерізу балки).

На рис. 2.10 наведено залежність величини поперечних деформацій балки від товщини косинок, які до неї приварюються. З цього рисунка бачимо, що зі збільшенням товщини косинок величина поперечних деформацій зменшується.

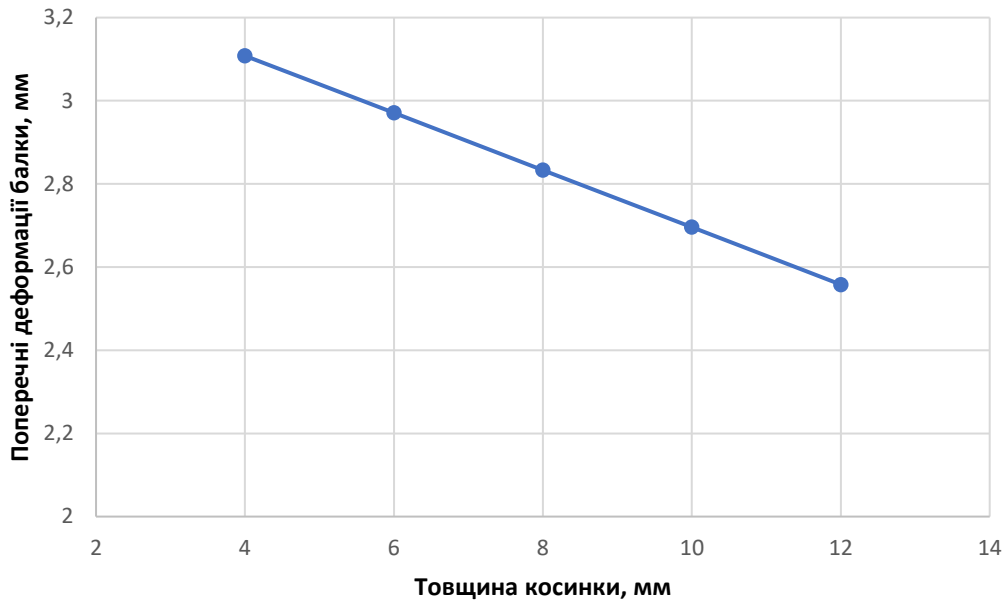


Рисунок 2.10 – Залежність поперечних деформацій балки від товщини косин

Вплив відстані між привареними косинками (їх кількості) характеризує крива на рис. 2.11.

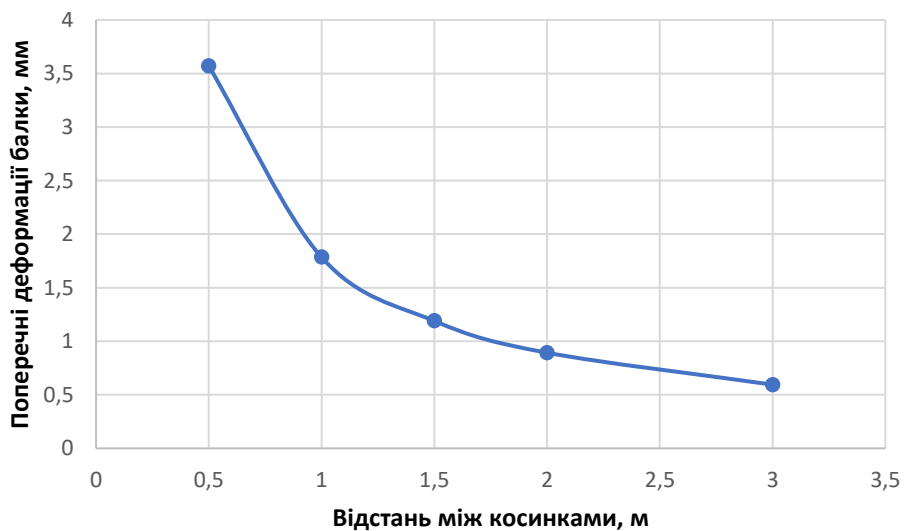


Рисунок 2.11 – Залежність поперечних деформацій балки від відстані між косинками (кількості косинок)

Аналізуючи рис. можна зробити висновок, що зі зменшенням відстані між косинками (збільшення їх кількості) значення деформацій зростає, причому,

якщо їх кількість стає більшою 2 на 1 метр, величина поперечних деформацій зростає інтенсивніше.

### 2.3.3. Кутові деформації у зварних конструкціях

Для аналізу кутових деформацій у зварних конструкціях розглянемо випадок приварювання ребра висотою  $h = 200$  мм і товщиною  $t_p = 6$  мм до пластини шириною  $a = 400$  мм і товщиною  $t_n = 8$  мм зі сталі Ст3 кутовим швом Т1 (рис. 2.12) з катет шва  $k = 5$  мм. Погонна енергія зварювання становитиме  $q_n = 10000$  Дж/см.

Після виконання кутового зварного шва буде виникати поворот ребра відносно пластини на кут  $\beta_0$ , що дорівнює приблизно 0,02 рад, за рахунок поперечного вкорочення (усадки) наплавленого металу. Крім того буде виникати кутовий злом пластини з утворенням грибоподібності. Причина такого злому – нерівномірне нагрівання по товщині пластини. Характер деформації показано на рис. 2.13.

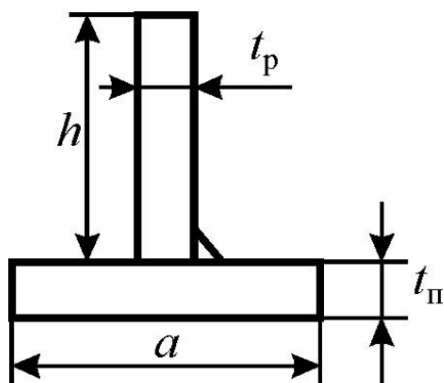


Рисунок 2.12 –Схема таврового зварного з'єднання

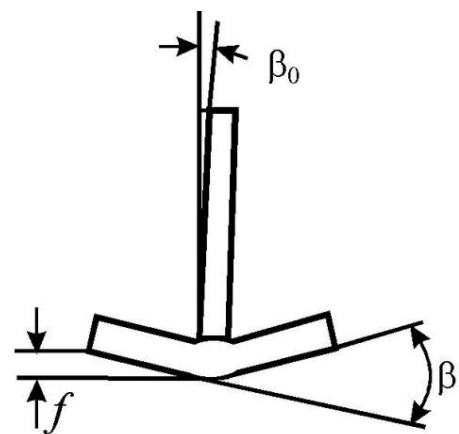


Рисунок 2.13 - Форма кутових деформацій таврового з'єднання

Основними чинниками, які впливають на величину кутового зламу, є погонна енергія зварювання  $q_n$ , товщина пластини  $t_n$  і співвідношення товщин ребра  $t_p$  та пластини  $t_n$ . Останнє визначає частку енергії, яка витрачається безпосередньо на нагрівання листа.

$$q_{п.п} = \frac{2t_{п}}{t_{р} + 2t_{п}} q_{п} \quad (2.29)$$

При збільшенні товщини ребра буде зменшуватися частка погонної енергії, яка витрачається на нагрівання пластини. Відповідно буде зменшуватися глибина прогрівання та буде змінюватися кутовий злам пластини. При збільшенні товщини пластини буде збільшуватися частка погонної енергії  $q_{п.п}$ , яка витратиться на її нагрівання, змінюватиметься відносна глибина прогрівання пластини, а отже, і кут її зламу. За одночасного пропорційного збільшенні товщини ребра і пластини частка погонної енергії  $q_{п.п}$  змінюється не значно, але за рахунок збільшення товщини пластини зменшуватиметься відносна глибина прогрівання й змінюватиметься кут зламу.

Величина кута повороту ребра відносно пластини обумовлена трикутною формою перерізу наплавленого металу і не залежить від катета (при виконанні зварювання за один прохід). Кутовий злам пластини зміниться, коли при збільшенні катета збільшується погонна енергія, в тому числі та її частка, яка йде на нагрівання пластини, а отже буде збільшуватися глибина її прогрівання відповідно.

Кут повороту ребра відносно пластини на 0,02 рад призведе до переміщення верхньої кромки ребра на відстань:

$$\Delta_p = \beta_0 \cdot h = 0,02 \cdot 200 = 4 \text{ мм.}$$

Знаючи товщини ребра і пластини можна визначити частку погонної енергії, яка йде на нагрівання останньої:

$$q_{п.п} = \frac{2 \cdot 8}{6 + 2 \cdot 8} \cdot 10000 = 7270 \text{ Дж/см}$$

Питома погонна енергія прогрівання пластини

$$\frac{q_{п.п}}{t^2} = \frac{7270}{0,8^2} = 11400 \text{ Дж/см}^3 \quad (2.30)$$

Ширину прогрівання приймають:

$$b = 1,7 \cdot k = 1,7 \cdot 0,5 = 0,85 \text{ см,} \quad (2.31)$$

Відносна ширина прогрівання складатиме:

$$b/s = 0,85/0,8 = 1,1.$$

З рис. 2.14 знаходимо кут зламу  $\beta = 0,017$  рад [2].

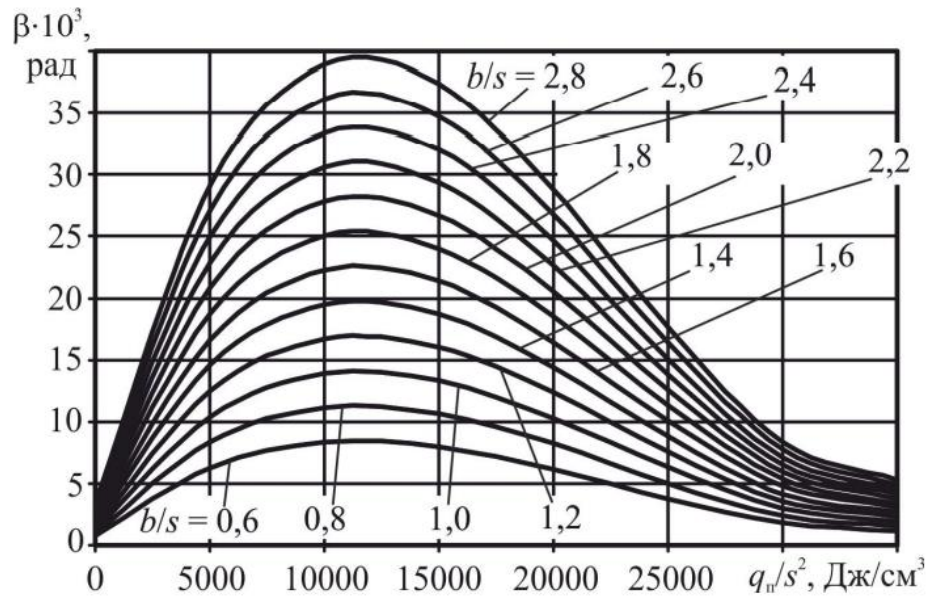


Рисунок 2.14 - Залежність кутових деформацій від питомої погонної енергії

Для  $b/s = 1,1$  кут зламу  $\beta = 0,017$  рад.

Максимальне відхилення кромки пояса від площини

$$\Delta_n = \beta \cdot a/4 = 0,017 \cdot 400/4 = 1,7 \text{ мм.}$$

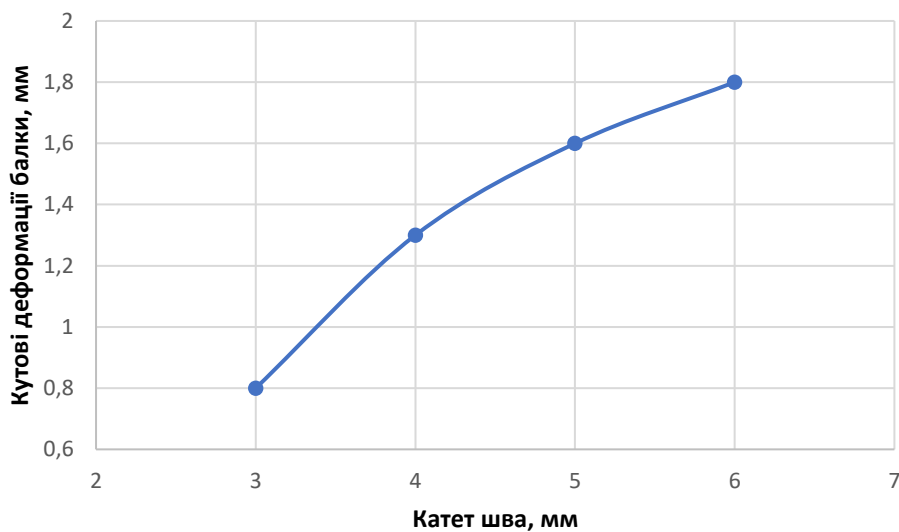


Рисунок 2.15 - Залежність кутових деформацій від катета зварного шва

З рис. 2.15 бачимо, що як і в попередніх випадках, збільшення катета зварного шва призводить до збільшення кутових деформацій.

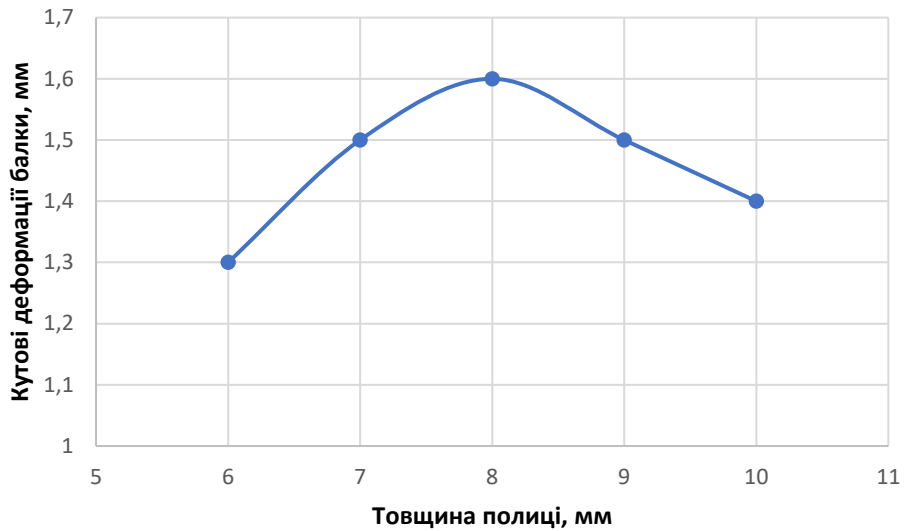


Рисунок 2.16 - Залежність поперечних деформацій в кутовому з'єднанні від товщини полиці

Вплив геометричних параметрів зварюваних деталей на кутові деформації має свою особливість. Як свідчить крива на рис. 2.16, збільшення товщини основи в порівнянні з товщиною стінки більш як 30 % призводить до зменшення кутових деформацій.

Для зменшення відхилення ребра від вертикального положення необхідно використовувати принцип компенсації, тобто встановлювати ребро під час зварювання з нахилом у зворотний бік.

### 3. МЕТОДИКАТА РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 3.1. Програма експериментальних досліджень

Програма експериментальних досліджень складена з метою визначення впливу параметрів технологічного процесу механізованого зварювання на теплові деформації зварюваних деталей і передбачає виконання наступних завдань:

- Проаналізувати технологію механізованого зварювання металоконструкцій;
- Визначити основні технологічні параметри процесу механізованого зварювання в середовищі захисних газів;
- Проаналізувати основні види деформацій, які можуть виникати під час електродугового зварювання металів;
- Підібрати необхідне обладнання та устаткування для експериментальних досліджень.
- Виконати зварювання стикових, напускових та таврових швів на різних режимах роботи зварювального півавтомата;
- Оцінити вплив режимів зварювання на деформацію деталей при їх зварюванні;
- Обґрунтувати оптимальні режими технологічного процесу зварювання.

Експериментальні дослідження будуть проводитись з використанням зварювального обладнання фірми ESAB, яке дозволяє виконувати процеси MIG/MAG зварювання.

Оптимізація процесу полягатиме у визначенні параметрів процесу зварювання (зварювального струму, напруга на дузі, полярність, витрата захисного газу) за якої деформація деталей буде мінімальною, а якість зварювання - максимальною.

## 3.2. Обладнання для експериментальних досліджень

### 3.2.1. Джерело живлення електричної дуги

Зварювальний напівавтомат Mig C200 3ph –це компактне зварювальне джерело живлення із ступінчастим регулюванням, призначене для зварювання суцільним сталевим дротом, дротом з нержавіючої сталі або алюмінію в середовищі захисного газу, а також трубчастим флюсовим дротом без використання газу.



Рисунок 3.1 – Комплект обладнання для MIG/MAG зварювання  
 1 – газований балон; 2 – джерело живлення; 3 – палик з шлангопакетом;  
 4 – газовий редуктор; 5 – котушка з дротом; 6 – захисний спрей

Джерело живлення комплектується наступними пристроями:

- зварювальний пістолет (палик);
- зворотний кабель з затискачем;
- візок для балона з газом (підставка).

Апарат має ступінь захисту IP 23. Це говорить про те, що він призначений для зовнішньої і внутрішньої установки і може використовуватися в зонах з підвищеною небезпекою ураження електрострумом.



На робочому місці встановлювати джерело зварювального струму необхідно таким чином, щоб наявні в ньому отвори для підведення і відведення охолоджуючого повітря не були загороджені.

Для його живлення використовують електричну мережу з повним опором 0,268 Ом або нижче. Якщо повний опір мережі вищий, то в процесі експлуатації може виникати ризик миготіння освітлювальних приладів.

Органи керування та контролю зварювального апарата ESABMig C200 наведені на рис. 3.2.

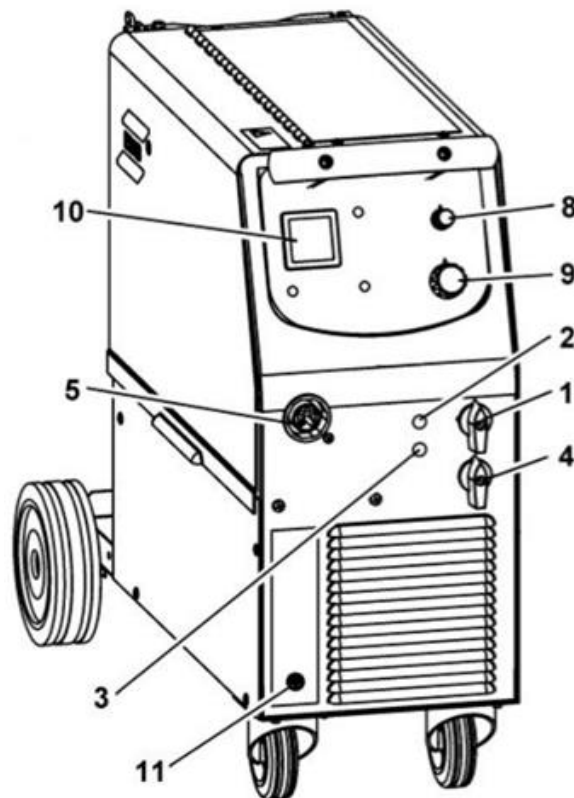


Рисунок 3.2 - Схеми розташування органів керування зварювальними апаратами

1 - перемикач живлення; 2 - індикаторна лампа - живлення ВКЛ./ВИКЛ.;  
 3 - помаранчева індикаторна лампа перегріву; 4 - вимикач зварювальної напруги; 5 - роз'єм ЄВРО (для зварювального пістолета); 6 - з'єднувач зворотного кабелю (-) високої індуктивності; 7 - з'єднувач зворотного кабелю (-) низької індуктивності; 8 - ручка точкового зварювання - ВКЛ./ВИКЛ. і налаштування часових параметрів; 9 - ручка регулювання швидкості подачі дроту; 10 - цифровий вимірювальний прилад - В/А; 11 - зворотний кабель з затискачем

Можливість зварювання суцільним дротом в середовищі захисного газу і зварювання без використання захисного газу порошковим флюсовим дротом забезпечується переключенням з'єднань « + » і « - » на клемовій панелі, розташованій поруч з блоком подачі дроту для зміни полярності зварювання.

Під час зварювання флюсовим дротом обов'язково необхідно дотримуватися умови підключення полярності на пальник і на «масу». На пальнику повинен бути мінус, а на самому виробі - плюс. Таке підключення називається прямим. При зварюванні в середовищі захисного газу використовується зворотна полярність. Обумовлено це тим, що при подачі флюсового дроту необхідно більш висока температура для утворення захисного газу.

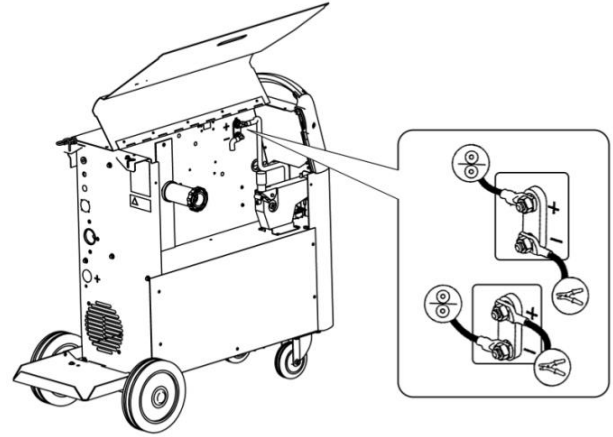


Рисунок 3.3 – Схема зміни полярності

Для подачі в зону горіння дуги плавкого електродного дроту із заданою швидкістю в апараті передбачений механізм подачі електродного дроту (рис. 3.4). Він складається з котушки з дротом, механізму подачі з роликками та механізму гальмування котушки.



Рисунок 3.4 – Котушка та механізм подачі дроту

Ролики подаючого механізму мають відповідати діаметру дроту, а форма їх канавки – типу дроту.

Зусилля притискання роликів регулюється притискним механізмом. Під час перевірки тиску подачі дроту перш за все, слід переконатись в тому, що дріт безперешкодно рухається через напрямні. Після цього регулюють зусилля, яке створюється роликами подачі дроту. Для перевірки правильності встановлення зусилля подачі помістіть який-небудь твердий предмет, наприклад, дерев'яний брусок на шляху подачі дроту. При відстані приблизно 5 мм від пістолета для подачі дроту до дерев'яного бруска подаючий ролик повинні проковзувати. При відстані приблизно 50 мм дріт повинна подаватися і згинатися при упорі в брусок.

Для заміни і вставлення котушки з дротом необхідно виконати наступні операції:

- відкрити бічну панель;
- від'єднати притискач, відкинувши його назад, при цьому натискні ролики пересунуться вгору;
- випрямити новий дріт на довжину 10-20 см. Перш ніж вводити його в блок подачі дроту, слід видалити напилком з торця дроту задирки і гострі кромки;
- переконатися в тому, що дріт правильно подається в канавку ролика, в випускную насадку і направляючу для дроту;
- закріпити притискач;
- закрити бічну панель.

Гальмівна втулка механізму подачі (котушки дроту) регулюється під час підготовки апарату до роботи. При правильно відрегульованій гальмівній втулці дріт повинна дещо провисати після зупинки подачі.

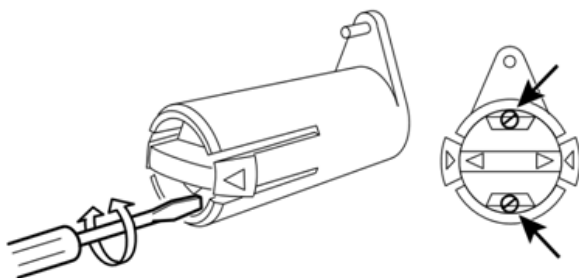


Рисунок 3.5 – Схема регулювання гальмівної втулки

Регулювання гальмівного зусилля здійснюється в такій послідовності:

- Встановити червону рукоятку в положення блокування
- Для зменшення гальмівного зусилля повернути пружини за

допомогою викрутки за годинниковою стрілкою. Для збільшення гальмівного зусилля повернути пружини проти годинникової стрілки. Обидві пружини слід повертати на однакове число обертів.

Коли апарат увімкнений за допомогою перемикача електроживлення 1 (рис. 3.2), індикаторна лампа 2 буде включена, а лампа 3 вимкнена - машина готова до роботи. Якщо внутрішня температура стає дуже високою, зварювання переривається і живлення вимикається. Даний стан відображається свіченням помаранчевої індикаторної лампи 3 на передній панелі пристрою. Коли температура знизиться, лампа автоматично вимикається.

### 3.2.2 Робоче обладнання зварювального апарату

Зварювальний пальник призначений для направлення в зону горіння дуги електродного дроту, підведення до неї зварювального струму, подачі захисного газу і керування процесом зварювання.

Зазвичай, зварювальні пальники для зварювання МІГ/МАГ мають природне повітряне охолодження. Однак, для зварювання на підвищених режимах використовуються також пальники з примусовим водяним охолодженням силового кабелю, шлангів пальника і головної частини зварювального пальника аж до газового сопла.

На одному кінці шланга пальника встановлений роз'єм для підключення до механізму подачі. Через роз'єм підключення зварювального пальника і механізму подачі забезпечується підведення в зону зварювання електродного дроту і захисного газу, підведення струму зварювання до дуги, а також проводиться підключення кнопки "Пуск - Стоп" на пальнику до схеми управління механізму подачі. У самому шлангу є спіраль, по якій подається зварювальний дріт, зварювальний (силовий) кабель, газовий шланг і кабель керування.

Інший кінець шланга підключається до рукоятки зварювального пальника, в головній частині якої є дифузор з отворами для захисного газу, струмопідвідний наконечник та газове сопло.

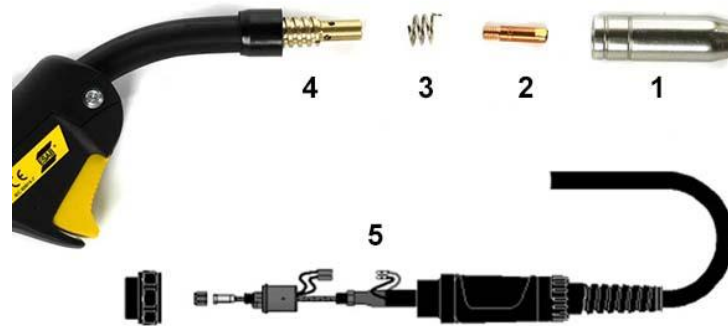


Рисунок 3.6 - Зварювальний пальник ESAB MXL 180 для MIG/MAG зварювання

1 - стандартне газове сопло; 2 - контактна насадка; 3 - пружина сопла;  
4 - перехідник насадки М6; 5 – стальна або тифлонова обшивка

Струмopрoвідні наконечники призначені для підведення струму зварювання до електродного дроту. Вони бувають різної конструкції і виготовляються зі сплавів на основі міді. Наконечники необхідно підбирати відповідно до діаметру використовуваного електродного дроту.



Рисунок 3.7 - Струмopрoвідні наконечники



Рисунок 3.8 - Газові сопла

Залежно від конструкції зварювального пальника газові сопла також мають різну форму і розміри.

На рукоятці зварювального пальника знаходиться кнопка "Пуск - Стоп". На деяких сучасних типах зварювальних пальників там же можуть розміщуватися і деякі органи управління (в першу чергу, напругою дуги і швидкістю подачі електродного дроту), а також індикатори параметрів режиму зварювання.

Для з'єднання пальника зі зварювальним апаратом використовується стандартний євро-роз'єм ( рис. 3.9).



Рисунок 3.9 - Євро-роз'єми для з'єднання пальника з апаратом

Через роз'єм під'єднання зварювального пальника забезпечується підведення в зону зварювання електродного дроту від механізму подачі і захисного газу, а також здійснюється підключення кнопки "Пуск - Стоп" на пальнику до схеми керування механізмом подачі. На практиці можуть зустрітися і інші типи роз'ємів.

До зварювального апарату газовий шланг підключається через газовий редуктор, який встановлюється на газовому балоні.

Редуктори мають кольорове маркування, що відповідає кожному виду газу. Тиск газу контролюється манометром високого тиску. Витрата газу регулюється редукційним клапаном. Манометр низького тиску визначає тиск газу на виході з пальника.



Рисунок 3.10 - Редуктори типу аргон/вуглекислий газ ( $Ar/CO_2$ ) з двома манометрами (а) та з ротаметром (б)

Газовий редуктор служить для підтримки вихідного тиску газу (газової суміші) і контролю за їх витратою. Інтенсивність подачі захисного газу регулюється легкорухомим вентиляем і вимірюється в літрах за хвилину в діапазоні регулювання 3-30 л/хв.

Для визначення витрати газу використовуються також витратоміри (ротаметри).

Витратомір поплавкового типу (ротаметр) (рис. 3.10,б) складається зі скляної трубки із конічним отвором. Трубка при вимірюванні витрати газу має розташовуватись вертикально, отвором більшого діаметру догори. Усередині трубки розміщується поплавок. При проходженні газу поплавок підіймається настільки, поки зазор між ним і стінкою трубки не досягне величини, при котрій напір струменя газу урівноважує вагу поплавка.

На трубку ротаметра нанесено дві окремих шкали для контролю витрат захисної зварювальної газової суміші (аргон/вуглекислота) і для контролю витрат 100% вуглекислого газу (л/хв.)

### 3.3 Методика експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження процесу механізованого зварювання в середовищі захисних газів проводяться для визначення впливу режиму зварювання на величину деформації деталей.

Регульованими параметрами процесу автоматизованого зварювання були:

зварювальний струм  $I_{зв}$ , А;

форсування дуги;

положення пальника.

Параметрами оптимізації під час експериментальних досліджень було вибрано:

деформація деталі  $f$ , мм;

якість зварного шва.

Для досліджень використовували металеві пластини зі сталі Ст-3 товщиною 4 мм.

Схема процесу вимірювання деформації деталей при зварюванні наведено на рис. 3.11.

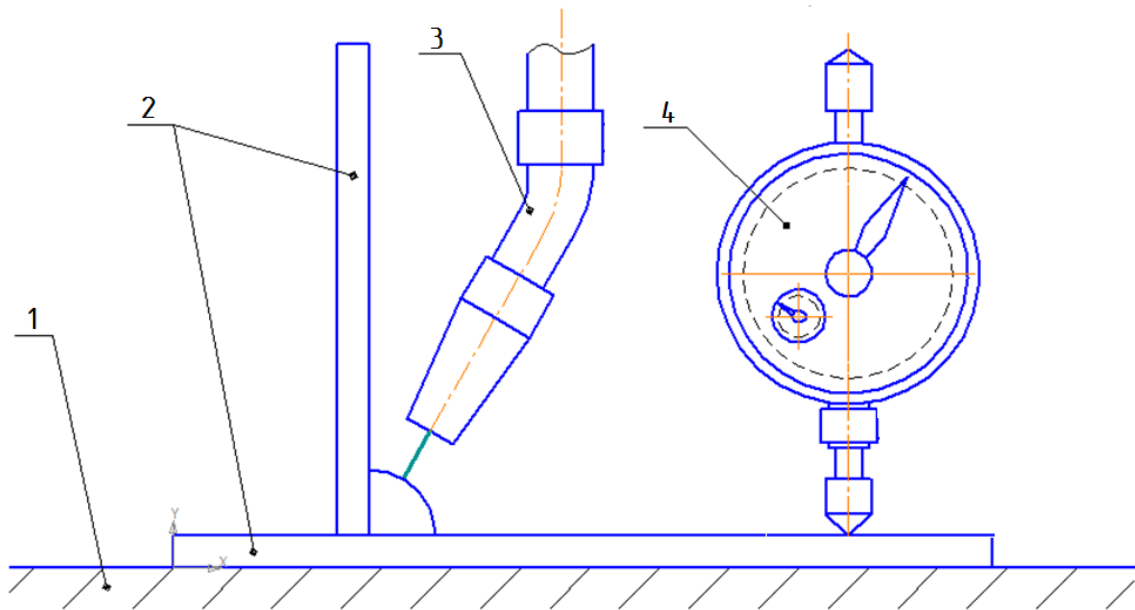


Рисунок 3.11 – Схема виконання експерименту

1 – стіл; 2 – деталі; 3 – зварювальний пальник; 4 – індикатор годинникового типу

Вимірювання деформацій виконували після завершення процесу зварювання та охолодження деталей до кімнатної температури. Для вимірювання деформацій використовували індикатор годинникового типу, який був встановлений на штативі в точці прогнозованої максимальної деформації.

Суть експерименту полягала в наступному.

На джерелі живлення зварювального автомата вибирався



Рисунок 3.12 – Робоче місце проведення експериментів



відповідний режим зварювання та задавались відповідні значення зварювального струму і напруги.

Деталь фіксували на зварювальному столі відповідно до схеми зварного шва так, щоб одна з деталей була нерухомою а інша мала можливість переміщення під дією сил деформації. Далі встановлювали індикатор ніжкою в тому місці, де за теоретичними даними відбуватиметься найбільша та найпомітніша деформація.

Після налаштування індикатора на нуль виконували зварювання шва довжиною 100...200 мм.



а)



б)



в)

Рисунок 3.13 – Вимірювання деформацій деталей при зварюванні таврових (а), напусккових (б) та стикових (в) зварних з'єднань

При MIG/MAG зварюванні велике значення має положення пальника відносно зварюваної деталі та напрям зварювання. Зварювання може виконуватися вертикально, кутом вперед і кутом назад [21].

При зварюванні кутом назад пальник позиціонується так, що напрямок подачі електродного дроту був протилежним до напрямку переміщення пальника. Зварювання кутом вперед означає, що напрямок подачі електродного дроту збігається з напрямком руху пальника. Вертикальне зварювання – напрям подачі електродного дроту перпендикулярний до напрямку руху пальника. Слід зазначити, що для зміни способу зварювання не потрібно змінювати напрямок переміщення пальника, досить змінити його нахил.

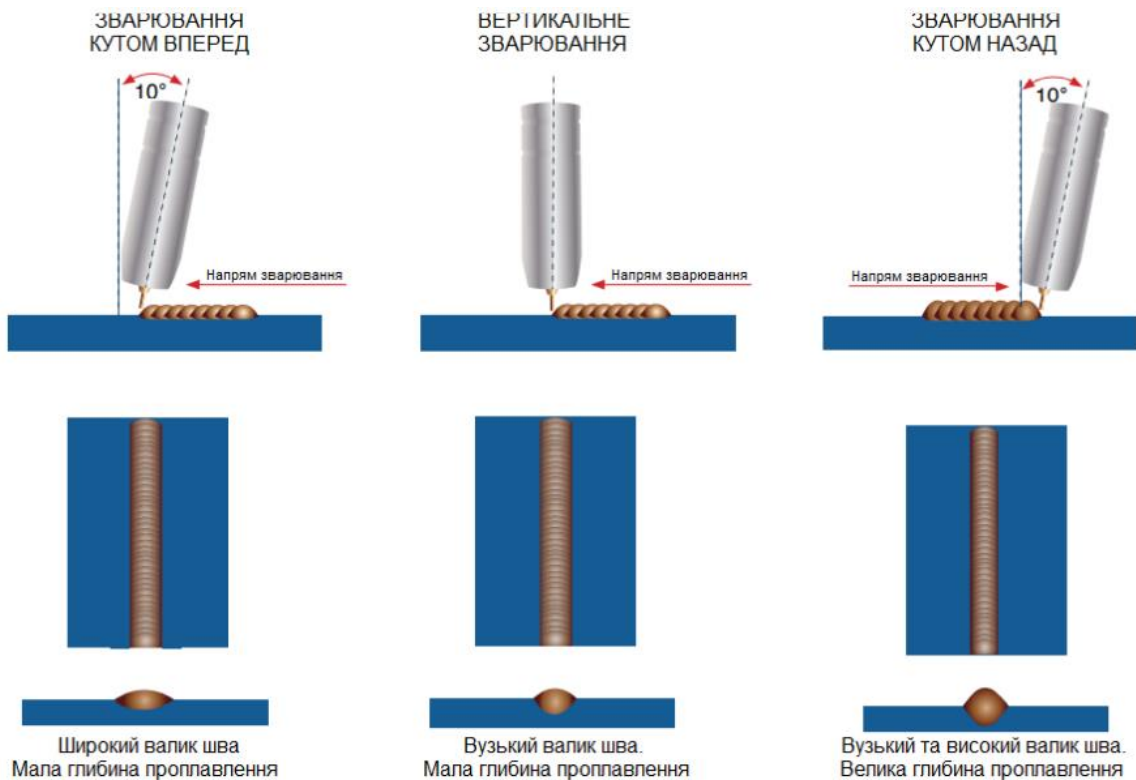


Рисунок 3.14 – Вплив нахилу пальника на формування валика та провар шва

При зварюванні кутом назад досягається висока стабільність дуги і знижується розбризування металу. Зварювання кутом назад застосовується для з'єднання товстого металу, при цьому досягається велика глибина проплавлення, за рахунок концентрації тепла у зварювальній ванні. Крім того, зварювальник бачить зварювальну ванну, що дозволяє підвищити якість зварювання.

Зварювання кутом вперед застосовується для з'єднання тонкого металу, при цьому досягається менша глибина проплавлення, зварний шов більш широкий, зварювання відбувається з більшою швидкістю завдяки спеціальному розподіленню тепла.



а)

б)

Рисунок 15 – Положення пальника під час зварювання

а – кутом вперед; б – кутом назад

Вертикальне зварювання використовується переважно в автоматичному обладнанні або в умовах необхідності. Утворюється вузький зварний шов при малій глибині проплавлення

Зварювання виконували зварювальним дротом Св-08Г діаметром 0,8 мм в середовищі суміші газів 80 % Ar + 20 % CO<sub>2</sub>.

План експериментальних досліджень наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – План експериментальних досліджень

| Спосіб зварювання | Струм зварювання $I_{зв}$ , А | Положення перемикача напруги | Деформація деталі $f$ , мм |
|-------------------|-------------------------------|------------------------------|----------------------------|
| Кутом вперед      | 60...180                      | 0...10                       | $f_1$                      |
| Вертикальне       |                               |                              | $f_2$                      |
| Кутом назад       |                               |                              | $f_3$                      |

Контроль якості зварного шва виконували за стандартними методиками [17], описаними в наступному пункті.

За оптимальний режим зварювання приймався той, при якому забезпечувалась максимальна швидкість зварювання, мінімальні деформації деталей та максимальна якість зварного шва.

### 3.4 Аналіз теплових деформацій деталей після зварювання

Під час проведення експериментальних досліджень процесу механізованого зварювання було встановлено три основних види деформацій деталей:

- повздожня (рис. 3.18,а);
- кутова (рис. 3.18,б);
- поперечна (рис. 3.18,в).



а)

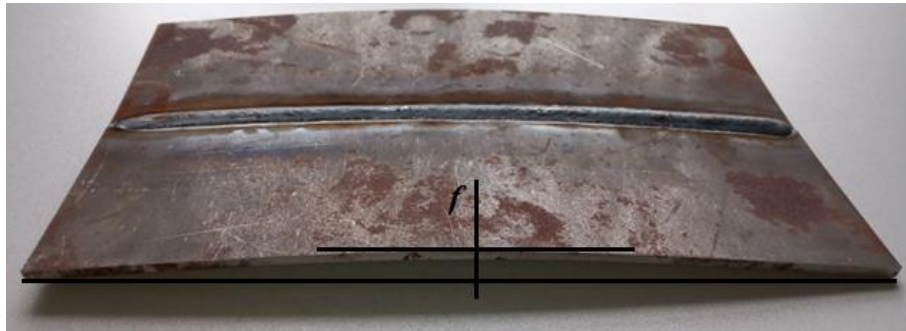


б)

Рисунок 3.16 – Зварні деталі, деформовані після зварювання



Рисунок 3.17 – Зразок деформованих деталей таврового зварного з'єднання



а)



б)



в)

Рисунок 3.18 – Основні види

деформацій

а) повздовжня;

б) кутова;

в) поперечна

### 3.5 Результати експериментальних досліджень

Результати експериментальних вимірювань деформацій деталей під час їх механізованого зварювання на різних режимах наведені в таблиці (Дод. А).

Результати залежності залишкових теплових деформацій від сили зварювального струму відображають графічні залежності, наведені на (рис. 3.19 - 3.21).

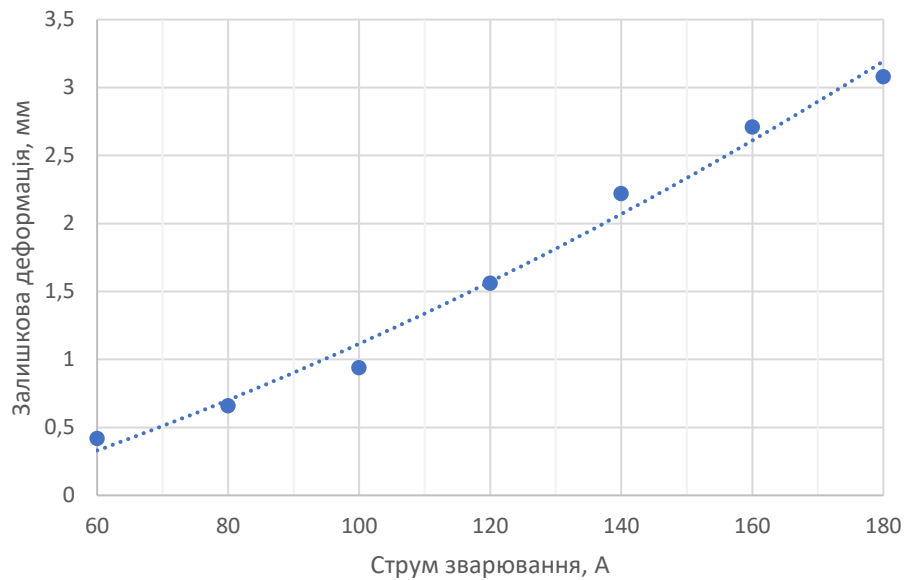


Рисунок 3.19 – Залежність поздовжніх деформацій деталі від струму зварювання при положенні перемикача напруги «0»

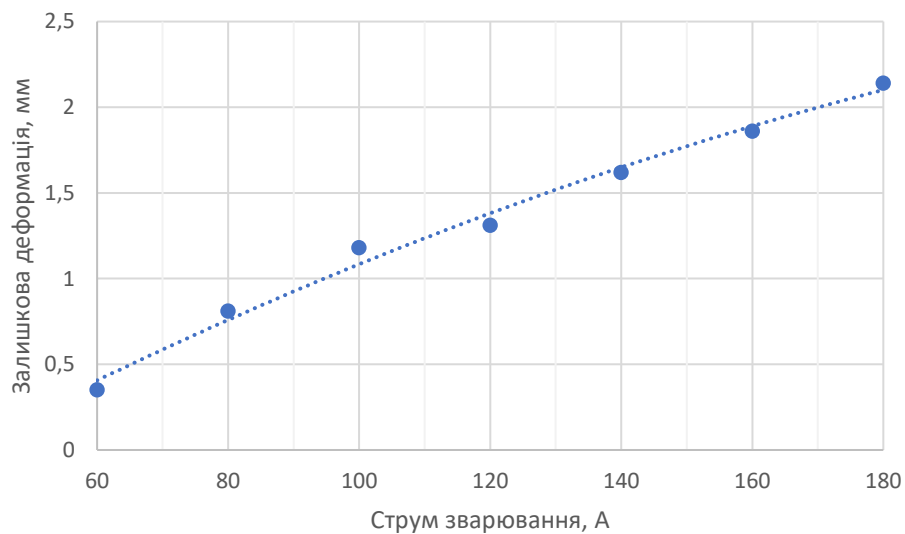


Рисунок 3.20 – Залежність поперечних деформацій деталі від струму зварювання при положенні перемикача напруги «5»

З отриманих результатів досліджень, які відображені кривими на рис. 3.19...3.21 бачимо, що максимальні значення деформацій деталі більш інтенсивно проявляються у вигляді поздовжніх деформацій під час зварювання стикових швів. Зі збільшенням струму деформації зростають. Так при струмі зварювання в 180 А максимальні значення деформацій досягали  $f = 3$  мм.

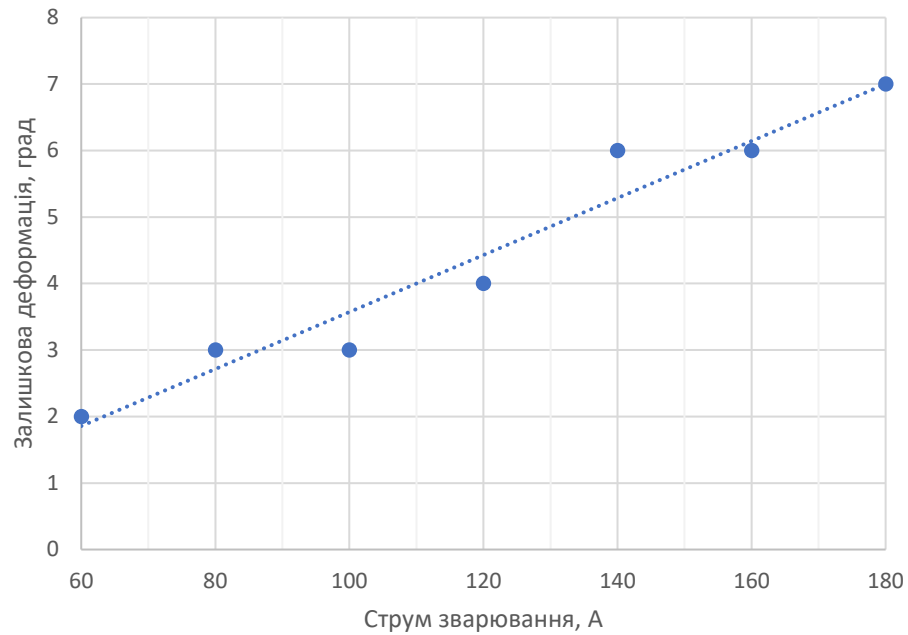


Рисунок 3.21 – Залежність кутових деформацій деталі від струму зварювання при положенні перемикача напруги «10»

Під час виконання напускових зварних з'єднань визначали поперечні деформації деталей. Під час досліджень їх максимальні значення досягали  $\Delta = 2,2-2,5$  мм. Як і в попередньому випадку, зі збільшенням струму величина деформації зростала, хоч і з меншою інтенсивністю.

Величину кутових деформацій визначали на таврових зварних з'єднаннях кутувими швами. Максимальне відхилення деталі від горизонтальної площини під час досліджень становило  $\beta = 7$  градусів. Встановлено, що різке зростання деформацій настає при збільшенні струму зварювання понад 120 А.

Результати досліджень впливу параметрів форсування електричної дуги (напруги зварювання) за різних значень величини струму зварювання відображають криві, представлені на рис. 3.19.

Аналізуючи рис. 3.19 можна стверджувати, що при збільшенні зварювального струму величина поточних деформацій деталей під час механізованого зварювання зростають для всіх досліджуваних режимів форсування дуги. Найбільше це проявляється при зварюванні з максимальним значенням напруги зварювання.

Так при збільшенні струму зварювання понад 120 А форсування дуги призводить до зростання деформацій майже на 30 %.

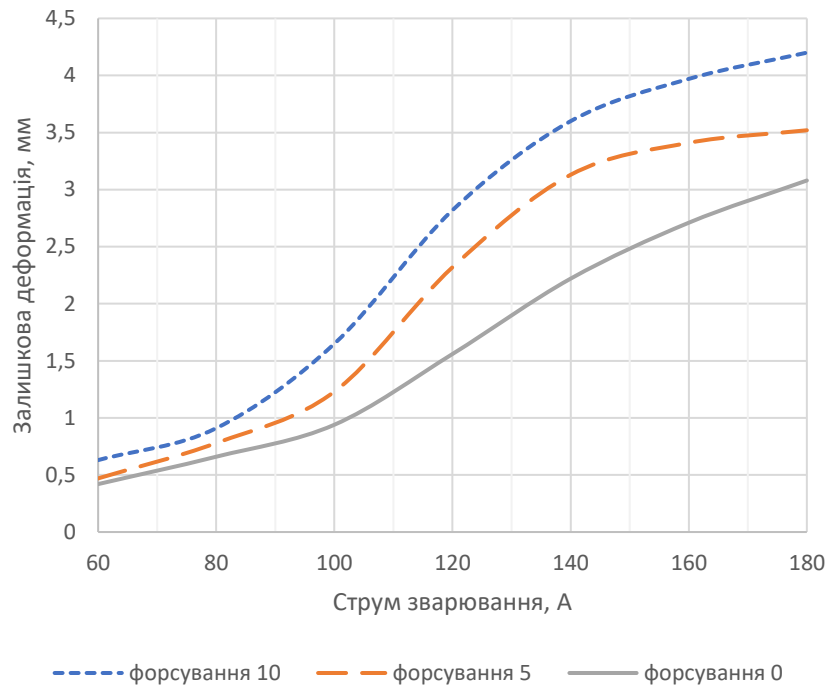


Рисунок 3.22 – Криві залежності залишкових деформацій деталі від величини струму зварювання при різних параметрах форсування дуги

Результати експериментальних досліджень впливу положення пальника на деформацію деталей наведені в таблиці (Дод. Б). Для зручності аналізу результати, наведені в табл. (дод. Б) відображені діаграмою (рис. 3.23).

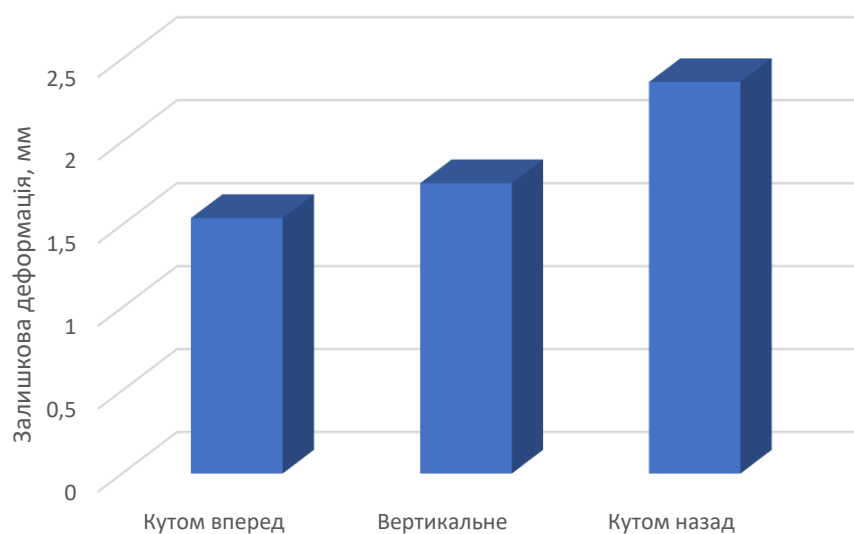


Рисунок 3.23 – Діаграма залежності залишкових деформацій деталі від положення пальника (способу зварювання) при  $I_{зв} = 100$  А без форсування дуги



З аналізу діаграми, представленої на рис. 3.23 бачимо, що положення пальника відносно площини деталі та напрямку його переміщення також впливає на деформацію зварних деталей. Мінімальні деформації були досягнуті під час зварювання кутом вперед, а максимальну деформацію дає спосіб кутом назад. Отже, змінюючи кут нахилу пальника та спосіб його переміщення можна добитись зниження залишкових теплових деформацій на 25-30 %.

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ

### 4.1 Вимоги техніки безпеки під час експлуатації обладнання для механізованого зварювання

Користувачі, які експлуатують обладнання для механізованого зварювання в середовищі захисних газів відповідають за виконання правил техніки безпеки, які повинні відповідати вимогам безпечної експлуатації обладнання цього типу. Крім стандартних правил техніки безпеки і охорони праці на робочому місці рекомендується наступне.

Всі роботи повинні виконуватися підготовленими особами, знайомими з правилами експлуатації обладнання.

1. Усі особи, які використовують зварювальне обладнання, повинні знати:

- призначення обладнання;
- інструкції по експлуатації;
- розташування органів аварійної зупинки;
- правила техніки безпеки;
- технологію зварювання і різання.

2. Оператор забезпечує:

- відсутність сторонніх осіб в робочій зоні обладнання при його запуску;
- захист усіх осіб від впливу зварювальної дуги.

3. Робоче місце повинно:

- відповідати умовам експлуатації;
- не мати протягів.

4. Засоби захисту персоналу:

- у всіх випадках використовуйте рекомендовані засоби індивідуального захисту, такі як захисні окуляри, вогнетривкий одяг, захисні рукавиці.
- під час зварюванні забороняється носити вільний одяг, прикраси і ін. (наприклад шарфи, браслети, кільця) які можуть потрапити в зварювальне обладнання або викликати опіки.

5. Запобіжні заходи загального характеру:

- перевірте надійність підключення зворотного кабелю;

- роботи на обладнанні з високою напругою повинні проводитися тільки кваліфікованим електриком;
- в межах доступу повинні знаходитися відповідні засоби пожежогасіння, що мають чітке маркування;
- забороняється проводити мащення і технічне обслуговування обладнання під час експлуатації.

#### 6. Небезпека ураження електричним струмом

- агрегат встановлюється і заземлюється відповідно до чинних норм і правил;
- не допускайте контакту деталей, які знаходяться під напругою і електродів з незахищеними частинами тіла, мокрими рукавицями і мокрим одягом;
- забезпечте електричну ізоляцію від землі і деталей, що зварюються;
- забезпечте дотримання безпечних робочих відстаней.;
- дими і гази можуть бути небезпечні для людини. Виключіть можливість впливу димів.
- для виключення вдихання димів під час зварювання організовується загальна вентиляція приміщення, а також витяжна вентиляція із зони зварювання.

#### 7. Випромінювання дуги

Випромінювання дуги викликає ураження очей і опіки шкіри, тому необхідно:

- використовувати захисні щитки, кольорові лінзи і захисний спецодяг для захисту очей і шкіри.
- для захисту сторонніх осіб застосовуються захисні екрани або завіси.

#### 8. Пожежонебезпека

- іскри (бризки металу) можуть викликати пожежу. Перевірте, чи не має горючих матеріалів поблизу від місця зварювання.

#### 9. Шум

- надмірний шум може привести до пошкодження органів слуху. Прийміть заходи для захисту слуху. Використовуйте беруші для вух або інші засоби захисту слуху.
- попередьте сторонніх осіб про небезпеку.

Устаткування класу А не призначене для використання в житлових приміщеннях, де електропостачання здійснюється з побутових мереж низької напруги. У таких місцях можуть з'явитися потенційні труднощі забезпечення електромагнітної сумісності обладнання класу А внаслідок кондуктивних і радіаційних перешкод.

#### 4.2 Моделювання процесу формування і виникнення травмонебезпечної ситуації під час плазмового механізованого зварювання

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

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

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

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

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

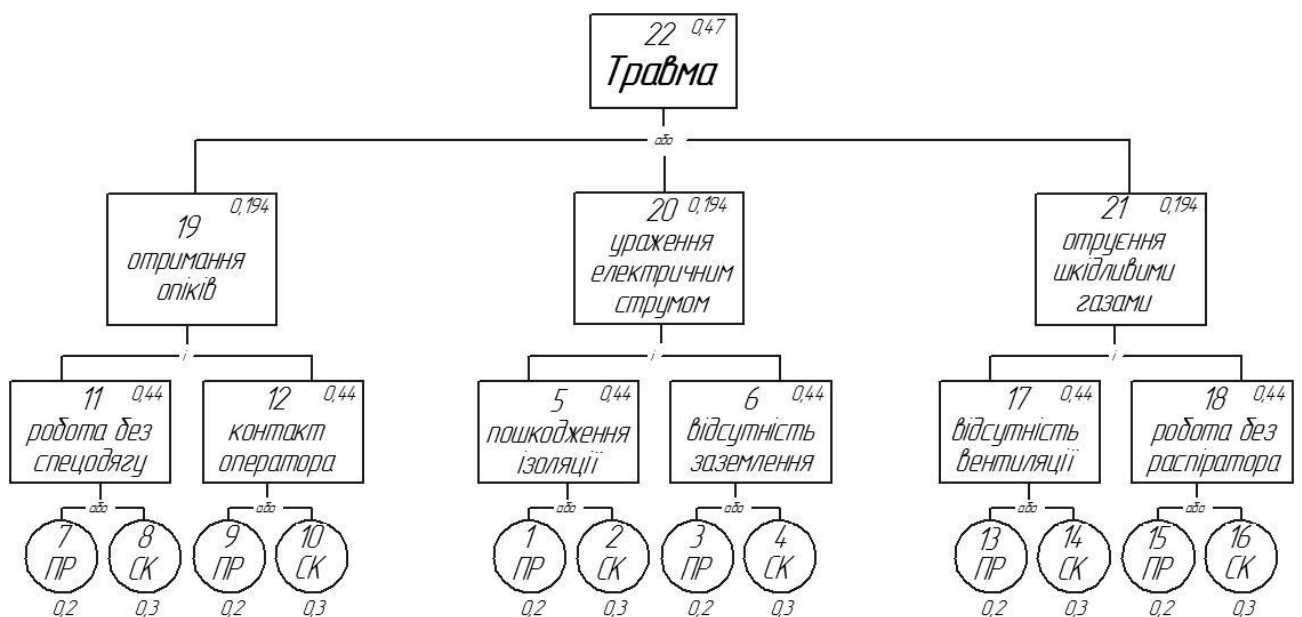


Рисунок 4.1. Модель процесу формування та виникнення травм

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

Ймовірність події  $P_5$  визначаємо наступним чином

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

Ймовірність подій  $P_6$ ,  $P_{11}$ ,  $P_{12}$ ,  $P_{17}$  і  $P_{18}$  буде рівною події  $P_5$ , оскільки базові події для них є однаковими.

Ймовірність події  $P_{19}$

$$P_{19} = P_{11} \cdot P_{12} = 0,44 \cdot 0,44 = 0,194 \quad (4.2)$$

Ймовірності подій  $P_{20}$  і  $P_{21}$  будуть рівною події  $P_{19}$ , оскільки події  $P_5, P_6, P_{17}, P_{18}$  рівні між собою.

Ймовірність події  $P_{22}$

$$P_{24} = P_{19} + P_{20} + P_{21} - P_{19} \cdot P_{20} - P_{19} \cdot P_{21} - P_{20} \cdot P_{21} \quad (4.3)$$

$$P_{24} = 0,194 + 0,194 + 0,194 - 0,194 \cdot 0,194 - 0,194 \cdot 0,194 - 0,194 \cdot 0,194 = 0,47$$

Таким чином, на робочому місті під час виконання операцій механізованого зварювання конструкцій в середовищі захисних газів за наявності і можливості виникнення існуючих небезпек та небезпечних діях на 100 робочих місць ймовірність виникнення травмонебезпечної ситуації становить 0,47 (47 %).

Якщо знизити значення коефіцієнтів першого рівня до мінімуму шляхом підвищення стану контролю за дотриманням вимог техніки безпеки та підвищення кваліфікації працівників щодо знань правил і умов безпеки праці, то ймовірність виникнення травм стане суттєво меншою.

## 5 ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СОБІВАРТОСТІ ВИКОНАННЯ РОБІТ

В економічному розділі кваліфікаційної роботи визначаємо технологічну собівартість виконання механізованого зварювання в середовищі захисних газів.

Економічне обґрунтування проєктованих технологічних процесів передбачає виконання розрахунку технологічної собівартості операції. Якщо не враховувати вартість конструкційних матеріалів, то до її складу будуть входити:

- зварювальні матеріали (електродний дріт і захисний газ);
- електрична енергія для технологічних цілей;
- заробітна плата робітників з відрахуваннями;
- амортизація обладнання;
- затрати на поточний ремонт та технічне обслуговування обладнання;
- зношення спеціальної оснастки;
- затрати на утримання та амортизацію площі будівлі, яку займає робоче місце.

Розрахуємо технологічну собівартість виконання 1 м зварного шва зварювальним апаратом ESAB Mig C200 3ph.

Витрати на зварювальний дріт  $C_{ел}$  визначають за формулою:

$$C_{ел} = M_{н} \cdot K_{ел} \cdot Ц_{ел} \cdot K_{тр} \quad (5.1)$$

де  $M_{н}$  – маса наплавленого металу, кг;

$K_{ел}$  – коефіцієнт витрати зварювального дроту, який враховує втрати на угар і розбризкування;

$Ц_{ел}$  – ціна зварювального дроту, грн/кг;

$K_{тр}$  – коефіцієнт, який враховує додаткові транспортно-заготівельні витрати, ( $K_{тр} = 1,04 \dots 1,06$ ).

Масу наплавленого металу  $M_{н}$  в кг можна визначити за формулою:

$$M_{н} = 0,001 \cdot \alpha_{н} \cdot I_{зв} \cdot T_{о} \quad (5.2)$$

де  $\alpha_{н}$  – коефіцієнт на плавки, г/А · год;

$I_{зв}$  – сила струму зварювання, А;

$T_o$  – час горіння електричної дуги, год.

Таблиця 5.1 - До визначення маси наплавленого металу

| Товщина металу, мм | Довжина шва, м | Швидкість зварювання, м/год | Струм дуги, А | Час горіння дуги, год |
|--------------------|----------------|-----------------------------|---------------|-----------------------|
| 4                  | 1,0            | 17,4                        | 150           | 0,06                  |

Для розрахунків приймаємо  $K_{ел}$  для технології механізованого зварювання у захисних газах дротом суцільного перерізу  $K_{ел}=1,15$ .

Коефіцієнт наплавки для зварювання у середовищі захисних газів згідно (2.6) приймаємо  $\alpha_n = 12,74$  г/А·год.

Середня ринкова ціна дроту СВ-08Г діаметром 1,2 мм становить 110 грн/кг.

Для розробленої технології:

$$C_{ел} = 0,001 \cdot 12,74 \cdot 150 \cdot 0,06 \cdot 1,15 \cdot 110 \cdot 1,04 = 15,08 \text{ грн.}$$

Витрати на захисний газ  $C_r$  визначимо за формулою:

$$C_r = P_r \cdot T_o \cdot C_g \cdot K_{тр} \quad (5.3)$$

де  $P_r$  – норма витрат газу, м<sup>3</sup>;

$T_o$  – норма основного часу, год;

$C_g$  – ціна одиниці об'єму захисного газу, грн;

Значення  $P_r$  за параметрами режимів зварювання (табл. 2.6) приймаємо  $P_r = 450$  л/год.

Ціна суміші зварювального газу  $A_r + CO_2$  становить 0,024 грн/л. Отже, для пропонованої технології:

$$C_r = 450 \cdot 0,06 \cdot 0,024 \cdot 1,04 = 0,67 \text{ грн.}$$

Розрахунок затрат коштів на технологічну електроенергію для проектного процесу виконаємо на основі середніх затрат на 1 кг наплавленого металу.

З довідкової літератури вибираємо норму витрат електроенергії на 1 кг наплавленого металу 5 кВт · год/кг.

Ціна електроенергії для машинобудівних підприємств становить 2,64 грн/кВт · год.



Отже, витрати на електроенергію становлять:

$$C_{ел} = 5 \cdot 2,64 \cdot 0,06 = 0,79 \text{ грн.}$$

Витрати на заробітну плату зварювальників з відрахуваннями на соціальні потреби  $C_3$  визначаються за формулою:

$$C_3 = \sum_{i=1}^n C_{Ti} \cdot T_{ki} \cdot K_d \cdot K_c, \quad (5.4)$$

де  $i$  – номер операції технологічного процесу;

$n$  – кількість операцій;

$C_{Ti}$  – годинна тарифна ставка зварювальника, грн.;

$T_{ki}$  – норма часу на виконання  $i$ -тої операції, год;

$K_d$  – коефіцієнт, який враховує доплати за пророблений час та додаткову зарплату (становить 1,4);

$K_c$  – коефіцієнт відрахувань на соціальні потреби ( $K_c=1,22$ ).

Тарифна ставка зварювальника становить 98 грн/н-год. Отже, витрати на заробітну плату становитимуть:

$$C_3 = 98 \cdot 0,06 \cdot 1,4 \cdot 1,22 = 10,04 \text{ грн.}$$

Амортизаційні відрахування на обладнання  $C_a$  визначають за формулою:

$$A = B_B / T, \quad (5.5)$$

де  $A$  – сума амортизаційних відрахувань;

$B_B$  – вартість обладнання, яке амортизується;

$T$  – термін корисного використання об'єкта - 4 року.

$$B_B = Ц \cdot K_{TM}, \quad (5.6)$$

де  $Ц$  – ціна устаткування, грн;

$K_{TM}$  – коефіцієнт транспортно-монтажних витрат ( $K_{TM} = 1,1 - 1,15$ ).

Первісна вартість обладнання становить

$$B_B = 79700 \cdot 1,15 = 91655 \text{ грн.}$$

Отже, ліквідаційна вартість - 91655 грн.,

Строк корисного використання - 4 роки,

Вартість обладнання, що амортизується,

$$91655 - 9165,57 = 82489,5 \text{ грн,}$$

Річна сума амортизації дорівнює

$$82489,5 / 4 = 20622,4 \text{ грн.}$$

Річний обсяг виробництва при часі зміни 8 год., виражений у довжині виконаних зварних швів для механізованого зварювання становить 20...25 тис.м.

Таким чином відрахування по амортизації обладнання становитимуть:

$$C_a = 20622,4 / 23100 = 0,89 \text{ грн.}$$

Витрати на поточний ремонт та технічне обслуговування обладнання можна визначити за формулою:

$$C_z = \frac{\sum_{i=1}^n B_{6i} \cdot K_p \cdot T_{ki}}{\Phi_d \cdot K_B} \quad (5.7)$$

де  $K_p$  – коефіцієнт витрат на ремонт та технічне обслуговування ( $K_p = 0,05$ ).

Значення  $\Phi_d$  визначаємо за формулою:

$$\Phi_d = D_p \cdot r_{zm} \cdot T_{zm} \cdot K_p \quad (5.8)$$

де  $D_p$  – кількість робочих днів за рік, становить 220,

$r_{zm}$  – кількість робочих змін за день, становить 1;

$T_{zm}$  – тривалість зміни, год, становить 8 год;

$K_p$  – коефіцієнт, який враховує планові простої обладнання ( $K_p = 0,93$ ).

$$\Phi_d = 220 \cdot 1 \cdot 8 \cdot 0,93 = 1636,8 \text{ год.}$$

Тоді

$$C_a = \frac{79700 \cdot 0,05 \cdot 0,06}{1636,8 \cdot 0,7} = 0,21 \text{ грн.}$$

Витрати, пов'язані з утриманням та амортизацією площі будівлі, яку займає устаткування  $C_{\Pi}$  визначають за формулою:

$$C_o = \frac{\sum_{i=1}^n F_i \cdot K_f \cdot Y_f \cdot T_{ki}}{\Phi_d \cdot K_B}, \quad (5.9)$$

де  $i$  – номер операції технологічного процесу;

$n$  – кількість операцій процесу;

$F$  – площа будівлі, яку займає обладнання,  $m^2$ ;

$K_f$  – коефіцієнт додаткової площі;

$Y_f$  – річні витрати на утримання 1  $m^2$  площі будівлі, грн (2500 грн).

Зварювання виконується на одній ділянці.

Площа ділянки становить  $F = 6 \cdot 3 = 18 m^2$ .

З довідкової літератури вибираємо  $K_f = 1,5$ . Отже, витрати на утримання площі буде становити:

$$C_o = \frac{18 \cdot 1,5 \cdot 2500 \cdot 0,06}{1636,8 \cdot 0,7} = 3,53 \text{ грн.}$$

Результати розрахунку технологічної собівартості зводимо в таблицю 5.2.

Таблиця 5.2 - Результати визначення технологічної собівартості механізованого зварювання 1 м шва

| Стаття витрат   | Сума витрат, грн. |
|---|-------------------|
| Електродний дріт  | 15,08             |
| Захисний газ  | 0,67              |
| Електроенергія  | 0,79              |
| Заробітна плата робітників із доплатами та відрахуваннями | 10,04             |
| Амортизаційні відрахування по устаткуванню                | 0,89              |
| Поточний ремонт та технічне обслуговування устаткування   | 0,21              |
| Утримання та амортизація площі зварювальної ділянки       | 3,53              |
| Технологічна собівартість                                 | 31,21             |

## ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ

В процесі електродугового зварювання зварювані деталі можуть змінювати свою форму та геометрію під дією теплового впливу електричної зварювальної дуги та внутрішніх напружень, викликаних металургійними процесами, що відбуваються під час формування та застигання зварного шва.

Основними видами деформацій, які можуть виникати в зварних з'єднаннях є поперечні, поздовжні та кутові деформації деталей.

Теоретичними дослідженнями встановлено, що зі збільшенням товщини деталей величина поздовжніх деформацій зменшується. До зниження деформацій також призводить збільшення ширини полиці та висоти стінки балки в таврових та двотаврових зварних конструкціях. Однак, збільшення довжини таких конструкцій призводить до зростання сумарних поздовжніх деформацій

Встановлено, що для більших значень катета шва деталі отримували значено більші деформації. Це можна пояснити збільшенням об'єму наплавленого металу, а отже й тепловий вплив на деталі конструкції.

Експериментальні дослідження показали, що максимальні значення деформацій деталей більш інтенсивно проявляються у вигляді поздовжніх деформацій під час зварювання стикових швів.

Результати досліджень впливу параметрів форсування електричної дуги дозволяють стверджувати, що при збільшенні зварювального струму величина поточних деформацій деталей під час механізованого зварювання зростають для всіх досліджуваних режимів форсування дуги. Найбільше це проявляється при зварюванні з максимальним значенням напруги зварювання.

Положення пальника відносно площини деталі та напрямку його переміщення також впливає на деформацію зварних деталей. Мінімальні деформації досягаються під час зварювання кутом вперед, а максимальну деформацію дає спосіб кутом назад. Змінюючи кут нахилу пальника та спосіб його переміщення можна добитись зниження залишкових теплових деформацій на 25-30 %.

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Биковський О.Г. Зварювання, різання й контроль якості під час виробництва металоконструкцій: підручник. Київ: Основа, 2021. 400 с.
2. Гасило Ю.А. Конспект лекцій з дисципліни «Напруження та деформації при зварюванні» для студентів денної форми навчання з напрямку 7.050504 - Технологія та устаткування зварювання. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2015., 48 с.
3. Городецький І. В., Тимочко В. О. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. Методичні рекомендації до виконання розділу у роботах ОКР "Магістр" студентами факультету механіки та енергетики. Львів : Львівський НАУ, 2011. 16 с.
4. Гуменюк І.В., Іваськів О.В., Гуменюк О.В. Технологія електродугового зварювання: Підручник. Київ: Грамота, 2006. 512 с.
5. Деформації та напруження при зварюванні.[https://obrobka.pp.ua/207-deformacyi-ta-naprugi-pri-zvaryuvann A.V..html](https://obrobka.pp.ua/207-deformacyi-ta-naprugi-pri-zvaryuvann-A.V..html)
6. Драган С.В., Лабарткава Практикум зі зварювання: Навчальний посібник. Миколаїв: НУК, 2008. 68 с.
7. Доценко Е.Р. Дослідження методу визначення напруження плинності конструкцій сталей за визначенням їх питомого опору//Методи та прилади контролю якості. -2010. -№24. – С.105-111.
8. ДСТУ ISO 3834.1-2001 Вимоги до якості зварювання. Зварювання плавленням металевих матеріалів. Частина 1. Настанови щодо вибирання та застосовування.
9. Єрмолаєв Г.В., Лой С.А., Лабарткава А.В. Збірник лабораторних робіт з дисципліни «Напруження та деформації при зварюванні». Миколаїв: НУК, 2004. 52 с.
10. Залежність деформації металу від напруги при зварювальних роботах. <https://zvarka.info/zalezhnist-deformatsiyi-metalu-vid-naprugi-pri-zvaryuvalnih-robotah/>

11. Квасницький В. В. Спеціальні способи зварювання. Навчальний посібник. Миколаїв: УДМТУ, 2003. 437 с.
12. Конспект лекцій з дисципліни «Зварні конструкції» для студентів напряму 6.050504 «Зварювання»/ Укладач Ю.А.Гасило. Кам, янське: ДДТУ, 2016. 72 с.
13. Левченко О. Г. Охорона праці у зварювальному виробництві: Навчальний посібник. Київ: Основа, 2010. 240 с.
14. Мінаков С.М. Визначення напруженого стану зварних магістральних трубопроводів магнітоанізотропним методом: дис.. на здобуття науков. ступеня канд. технічних наук спеціальності 05.03.06 - «Зварювання та споріднені процеси і технології» НТУУ «КПІ»- Київ. 2012. 195 с.
15. Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи № 2 «Дослідження деформацій зварних з'єднань у процесі зварювання та охолодження» з дисципліни «Напруження та деформації при зварюванні» для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка» всіх форм навчання / Укл.: І.М. Білоник, О.Є. Капустян – Запоріжжя: ЗНТУ, 2019. - 20 с.
16. Напруження та деформації при зварюванні і паянні: підручник / за заг. ред. Л. М. Лобанова. – Миколаїв: НУК, 2016. 246 с.
17. Неруйнівний контроль і технічна діагностика. Т. 5/ Під ред.. З.Т. Назарчука. – Львів: ФМІ ім. Г.В. Карпенка, 2001. -1134 с.
18. Основи охорони праці : навч. посібник / за ред. проф. В. В. Березуцького. Харків: Факт, 2005. 480 с.
19. Постольник Ю.С., Огурцов А.П., Решетняк І.С. Основи металургійної термомеханіки. Дніпродзержинськ, Вид ДДТУ. 1998. 360с.
20. Способи зменшення зварювальних деформацій і напружень. <https://jak.bono.odessa.ua/articles/7-sposobi-zmenschennja-zvarjuvalnih-deformacij-i.php>
21. Швець О.П., Власюк І.В., Федорина. Д.І. Вивчення обладнання для механізованого зварювання в середовищі захисних газів (MIG/MAG). Методичні рекомендації до виконання лабораторної роботи з дисципліни «Технології та обладнання зварювання металів і пластмас» студентами ОС

«Бакалавр» спеціальностей 133 «Галузеве машинобудування», 208 «Агроінженерія», 274 «Автомобільний транспорт», 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Львів: ЛНАУ, 2018. 19 с.

22. Швець О.П. Зварювання сталей в середовищі вуглекислого газу: методичні рекомендації до виконання лабораторної роботи з дисципліни «Технології та обладнання зварювання металів і пластмас» студентами ОС «Бакалавр» спеціальностей 133 «Галузеве машинобудування», 208 «Агроінженерія», 274 «Автомобільний транспорт», 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Львів: ЛНАУ, 2020 р. 10 с.

23. Яремчук В. Методи зменшення і усунення залишкових зварювальних напружень та деформацій. Матеріали V Всеукраїнська студентська науково - технічна конференція "Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання". Тернопіль, ТНТУ ім. І. Пулюя. С. 237.

24. Paul Colegrove, Chukwugozie Ikeagu, Adam Thistlethwaite, Stewart Williams, Tamas Nagy, Wojciech Suder, Axel Steuwer, Thilo Pirling. The welding process impact on residual stress and distortion // Science and Technology of Welding and Joining. 2009. Vol. 14(8). pp. 717-725.

25. Kordisch, H., Boschen, R., Blauel, J.G., Schmitt, W., Nagel, G. Experimental and numerical investigations of the warm-prestressing (WPS) effect considering different load paths // Nuclear Engineering and Design. 2000. Vol. 84(3). pp. 447-450.

26. Stoney G.G. The tension of metallic films, deposited by electrolysis // Proc. Roy. Soc. London Ser. A. 1909. Vol. 82. № 553. pp. 172-175.

27. Michaleris P., Dantzig J., Tortorelli D. Minimization of welding residual stress and distortion in large structures // Welding Journal. 1999. Vol. 78(11). pp. 361-366.

## ДОДАТКИ

Дод. А

Результати експериментальних вимірювань деформацій деталей під час їх механізованого зварювання на різних режимах

| № | Струм зварювання, А | Деформація (мм) при положенні перемикача напруги |      |      |
|---|---------------------|--|------|------|
|   |                     | 0  | 5    | 10   |
| 1 | 60                  | 0,42   | 0,47 | 0,63 |
| 2 | 80                  | 0,66   | 0,78 | 0,91 |
| 3 | 100                 | 0,94   | 1,23 | 1,65 |
| 4 | 120                 | 1,56   | 2,32 | 2,82 |
| 5 | 140                 | 2,22   | 3,13 | 3,6  |
| 6 | 160                 | 2,71   | 3,41 | 3,97 |
| 7 | 180                 | 3,08   | 3,52 | 4,2  |

Дод. Б

Результати експериментальних досліджень впливу положення пальника під час механізованого зварювання на деформацію деталей

| Спосіб зварювання      | Кутом вперед | Вертикальне | Кутом назад |
|------------------------|--------------|-------------|-------------|
| Теплова деформація, мм | 1,54         | 1,75        | 2,36        |