

Міністерство освіти та науки України
Львівський національний університет природокористування
Навчально-науковий інститут заочної та післядипломної освіти
Кафедра машинобудування

Кваліфікаційна робота

другого «магістерського» рівня вищої освіти

на тему «Дослідження процесу автоматичного зварювання
металоконструкцій»

Виконав: студент групи Маш-71з

Спеціальності 133 Галузеве машинобудування
(шифр і назва)

Костик Павло Ігорович
(Прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., доцент Швець Олексій Петрович
(Прізвище та ініціали)

Дубляни 2024

Міністерство освіти та науки України
Львівський національний університет природокористування
Навчально-науковий інститут заочної та післядипломної освіти
Кафедра машинобудування

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри
Машинобудування
(назва кафедри)

_____ (підпис)

професор Віталій ВЛАСОВЕЦЬ.
(ім'я та прізвище)

“ _____ ” _____ 20__ року

З А В Д А Н Н Я

на кваліфікаційну роботу студенту

Костику Павлу Ігоровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Дослідження процесу автоматизованого зварювання метаоконструкцій»

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

затверджені наказом № _____ від _____ 20__ року

2. Строк подання студентом роботи до _____ 20__ року

3. Вихідні дані до работ: довідкова література, каталоги та технічні характеристики установок та обладнання для автоматичного зварювання, патенти на корисні моделі та винаходи, наукові статті та монографії, методики експериментальних досліджень, ДСТУ, інструкції з охорони праці.

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

4.1. Стан питання та задачі дослідження;

4.2. Теоретична частина;

- 4.3. Методика експериментальних досліджень;
4.4. Результати експериментальних досліджень;
4.5. Охорона праці;
4.6. Економічна частина.

5. Перелік графічного:

Графічна частина до кваліфікаційної роботи оформляється у вигляді презентації.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата		Відмітка про виконання
		Завдання видав	завдання прийняв	
1, 2, 3, 4, 6	Швець О.П. доц. каф. машинобудування			
5	Городецький І.М. доц. каф. ФІМ та БВ			

7. Дата видачі завдання “ ____ ” _____ 20__ року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Відмітка про виконання
1	Стан питання та задачі дослідження		
2	Теоретична частина		
3	Методика експериментальних досліджень		
4	Результати експериментальних досліджень		
5	Охорона праці		
6	Економічна частина		
7	Оформлення пояснювальної записки		
8	Оформлення графічної частини		

Студент _____
(підпис)

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

_____ (прізвище та ініціали)

УДК 621.791

Костик П. І. «Дослідження процесу автоматизованого зварювання металоконструкцій» // Кваліфікаційна робота. – Дубляни: Львівський національний університет природокористування, 2024 р. 93 с.

В роботі наведені результати аналізу технологічного процесу автоматичного зварювання металоконструкцій електродуговим зварюванням в середовищі захисних газів. Встановлено основні проблеми та недоліки електродугового зварювання, а також напруження і деформації деталей, які можуть виникати при зварюванні та причини їх виникнення.

Здійснено теоретичний розрахунок параметрів процесу електродугового зварювання в середовищі захисних газів та аналіз чинників, які призводять виникнення деформацій при зварюванні.

Розроблено методики, підібрано обладнання та проведено експериментальні дослідження впливу технологічних параметрів процесу зварювання (режиму, струму та швидкості зварювання) на виникнення та величину повздовжніх, поперечних та кутових деформацій у зразках зварних металоконструкцій.

Здійснено техніко економічний аналіз формування витрат технологічних матеріалів та електроенергії для функціонування поста автоматичного зварювання металоконструкцій протягом року.

Табл. 10; рис. 51; бібл. джерел 33; Дод. 3.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1. СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ	7
1.1. Загальні відомості про процес автоматичного зварювання	7
1.2. Короткий опис роботи зварювальних автоматів	9
1.3. Установки для автоматичного зварювання	10
1.4. Аналіз процесу зварювання в середовищі захисних газів	17
1.5. Напруження і деформації при зварюванні та причини їх виникнення	24
2. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА	27
2.1. Продуктивність електродугового зварювання	27
2.2. Теоретичне обґрунтування та розрахунок режимів зварювання в середовищі захисного газу	28
2.3. Теоретичний аналіз виникнення деформацій зварних конструкцій	32
2.3.1. Поздовжні деформації в зварних конструкціях	32
2.3.2. Поперечні деформації в зварних конструкціях	38
2.3.3. Кутові деформації у зварних конструкціях	43
3. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	47
3.1. Програма експериментальних досліджень	47
3.2. Обладнання для експериментальних досліджень	48
3.2.1. Характеристика зварювального апарата	48
3.2.2. Характеристика зварювальної колони	51
3.2.3. Характеристика зварювального пальника	54
3.3. Методика експериментальних досліджень	55
3.4. Контроль процесу зварювання	59
4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	61
4.1. Аналіз теплових деформацій деталей після зварювання	61
4.2. Результати експериментальних досліджень поточних деформацій деталей	62

4.3. Результати експериментальних досліджень залишкових деформацій деталей	65
5. ОХОРОНА ПРАЦІ ПІД	69
5.1. Санітарно-гігієнічні характеристики зварювального виробництва	69
5.2. Електробезпека під час зварювального виробництва	70
5.3. Пожежна безпека під час зварювання	72
5.4. Моделювання процесу формування і виникнення травмонезбезпечної ситуації під час зварювання	73
6. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	77
6.1. Методика розрахунку норм витрати зварювальних матеріалів	77
6.2. Методика розрахунку норм витрати зварювальних матеріалів при зварюванні в сумішах захисних газів	78
6.3. Методика розрахунку норм витрати електроенергії при зварюванні в сумішах захисних газів	80
6.4. Результати розрахунку норм витрати зварювальних матеріалів та електроенергії	81
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	83
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК	85
ДОДАТКИ	89

ВСТУП

Результатом діяльності будь яких підприємств зварювального напрямку є виготовлення зварних виробів. Продукція зварювального виробництва характеризується різноманіттям номенклатури, типів і розмірів, вимогами щодо забезпечення якості зварних з'єднань, випуском зварних виробів з різним технічним рівнем і серійністю, потребує високої кваліфікації робітників і фахівців.

Значна кількість зварних виробів (каркасно-листові, рамні, балочні) в умовах великих підприємств виготовляються в умовах автоматизованого виробництва. До них пред'являють певні вимоги, від виконання яких залежить їх якість і придатність до використання.

Якість зварних конструкцій є комплексним поняттям. Її формує ціла низка характеристик. Показниками якості процесу є надійність, технологічність, продуктивність та ін. Всі вони значною мірою визначаються властивостями зварних з'єднань, які кількісно оцінюють міцністю і герметичністю. Ці властивості визначають вимоги до зварних з'єднань, які забезпечуються певними конструктивними і технологічними характеристиками зварного з'єднання. До конструктивних характеристик в основному відносять форму і геометричні розміри зварного шва. До технологічних характеристик 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 та технологічних параметрів процесу автоматичного зварювання металоконструкцій в середовищі захисних газів з точки зору вирішення професійного завдання отримання максимальної продуктивності зварювання з мінімальною тепловою деформацією елементів зварної конструкції та максимальною якістю зварного шва.

1. СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Загальні відомості про процес автоматичного зварювання

Автоматичне зварювання передбачає механізацію процесів збудження і підтримку зварювальної дуги, подачі електрода в зону плавлення і переміщення дуги вздовж зварюваних кромek деталей з визначеною швидкістю, завершення процесу заварювання, заварювання кратера в кінці шва. Обладнання, яке застосовується в таких процесах називається зварювальними автоматами. Вони можуть бути універсальними, загального призначення і спеціалізованими.

Класифікація зварювальних автоматів здійснюється за наступними показниками [2, 5, 24]:

- за способом переміщення вздовж кромek – самохідні і несамохідні;
- за видами електрода – для зварювання плавким або неплавким електродом;
- за способом захисту дуги – без захисту, в середовищі захисних газів, під флюсом;
- за способом регулювання швидкості подачі електродного дроту – з плавним, ступінчастим або плавно-ступінчастим регулюванням;
- за способом підтримання напруги зварювання на дузі – з саморегулюванням або примусовим підтриманням напруги;
- за способом формування шва – з вільним або примусовим формуванням;
- за кількістю дуг з роздільним живленням – одно-, дво- і багатодугові;
- за кількістю електродів із загальним живленням струмом – одно-, дво- і багатоелектродні;
- за технологічним призначенням – для зварювання та для наплавлення.

Конструктивно зварювальні автомати складаються із наступних вузлів і агрегатів [13]:

- механізмів подавання електродного дроту і переміщення дуги вздовж кромek, налаштувальних, допоміжних, корегувальних переміщень;
- струмопідвідних мундштуків;

- правильних механізмів;
- касет для електродного дроту;
- флюсової апаратури або газопідвідних пристроїв;
- систем керування і засобів безпеки.

Подаючі ролики приводяться в дію від електродвигуна через редуктор і забезпечують стабільну подачу електродного дроту без деформації його поверхні. Найбільш розповсюдженими є циліндричні, рифлені, з гладкою канавкою, з канавкою із насічкою, прогумовані, шестеренчасті з канавкою.

Переміщення самохідних зварювальних автоматів зі швидкістю зварювання вздовж з'єднання, і переміщення їх у вихідне положення з маршовою швидкістю здебільшого здійснюється роздільними електродвигунами. Самохідні візки являють собою корпус автомата з колісним ходом. У зварювальних автоматах встановлений окремий електродвигун з плавним регулюванням швидкості переміщення візка і двигун подачі дроту (в моторизованих тракторах). В тракторах з одним двигуном швидкість його переміщення і подачі електродного дроту регулюється ступінчасто.

Струмопровідні мундштуки та зварювальні пальники призначені для направлення електрода в зону зварювання і підведення до нього зварювального струму. Конструктивно мундштуки бувають трубчастими, роликовими або колодковими.

Правильні механізми зварювальних автоматів – це система вільно роликів, розташованих таким чином, щоб при їх вільному обертанні способом зворотного згинання компенсувати кривизну електродного дроту під час його подавання з касети в зону зварювання.

В комплект газоподавальних пристроїв зварювальних автоматів для зварювання в середовищі захисних газів входять такі ж складові, що і для механізованого зварювання [15].

Пальник для автоматичного зварювання плавким суцільним електродом в середовищі захисних газів слугує для підведення струму до електродного дроту, забезпечення ефективного газового захисту зони зварювання. Для надійного

захисту дуги і шва на початку газова апаратура забезпечує попереднє подавання захисного газу до початку збудження дуги і затримку його вимикання після припинення горіння дуги для захисту кінця шва від впливу повітря.

Система керування зварювальними автоматами забезпечує переміщення електродного дроту в вертикальній площині (вверх, вниз) і самого автомата (вперед, назад), початок і завершення зварювання за допомогою кнопок і кінцевих вимикачів, заварювання кратера, включення і виключення газової апаратури, підтримує в заданих межах значення зварювального струму, напругу на дузі, швидкість зварювання, швидкість подачі електродного дроту.

Основні елементи систем керування зварювальними автоматами розташовані в шафах керування. В них розташовуються силовий контактор, проміжні реле, засоби захисту силової мережі. Управління автоматами і контроль за параметрами режиму зварювання здійснюється з пульта керування, розташованого на їх корпусі.

1.2. Короткий опис роботи зварювальних автоматів

Підведення зварювальних автоматів до місця зварювання виконується вручну, спеціальними механізмами з візуальним контролем. У разі значних відстаней для переміщення використовуються маршові швидкості. Для спрямування автомата вздовж з'єднання використовуються спеціальні напрямні (пересувні або стаціонарні рейки) [6].

При автоматичному зварюванні в середовищі захисних газів після натискання оператором кнопки "Пуск. Зварювання" або після надходження сигналу від автоматичної системи керування циклом зварювання виконуються такі дії: подається захисний газ, після чого через певний час затримки, який необхідний для витіснення повітря із зони зварювання, вмикається зварювальний струм і електродвигун приводу механізму подачі зварювального дроту [11].

Під час автоматичного зварювання в середовищі захисних газів електродним дротом 0,6...2,0 мм дугу запалюють на швидкості подачі дроту, підібраній для даного режиму зварювання.

При використанні дроту діаметром 1,6...2,5 мм дугу запалюють на швидкості подачі дроту в 2...3 рази меншій, ніж при основному зварюванні. Після збудження дуги електродвигун подачі електродного дроту переходить на частоту обертання, яка відповідає швидкості подачі електрода у відповідності до вибраного режиму.

Після команди на закінчення зварювання і заварювання кратера виконуються наступні дії: вимикають джерело живлення зварювальної дуги, припиняється подача електродного дроту і переміщення пальника. Подача захисного газу припиняється з деякою затримкою після згасання зварювальної дуги з метою забезпечити захист кінцевої частини шва від дії газів повітря в процесі її охолодження.

1.3. Установки для автоматичного зварювання

Установки для автоматичного зварювання призначені для встановлення та переміщення зварювальних апаратів, а також переміщення зварювальників. Вони забезпечують розташування зварювальних апаратів на початку шва, розміщення самохідних апаратів впродовж зварювання, повернення апаратів у вихідне положення після зварювання з метою забезпечення простору для зняття звареного виробу й встановлення нових заготовок, переміщення несамохідних зварювальних апаратів з робочою швидкістю зварювання, підйом і опускання зварювальних апаратів під час зварювання виробів, різних по висоті, переміщення зварювального пальника від одного виробу до іншого під час зварювання кількох швів на одному виробі.

До цього устаткування відносяться колони, візки і напрямні для зварювальних апаратів; пристрої для переміщення зварювальної апаратури під час механізованого зварювання, майданчики для зварювальників.

Зварювальне устаткування (колони, велосипедні, глагольні і порталні візки) компонується з уніфікованих вузлів і деталей, що дозволяє мінімізувати їхню номенклатуру [12, 14].

Колони служать для встановлення і переміщення зварювальних апаратів під час зварювання кільцевих і лінійних швів. При зварюванні кільцевих швів застосовуються консольні колони, на яких кріплять несамохідні зварювальні апарати. Швидкість зварювання в них забезпечується обертанням виробу на обертачі або роликовому стенді.

Під час зварюванні лінійних швів застосовуються колони із самохідними зварювальними апаратами, які можуть переміщуватися вздовж консолі колони. Зварюваний виріб при цьому залишається нерухомим.

На рис. 1.1. представлено конструкцію поворотної колони типу ПК. Вона призначена для установчих переміщень зварювальних апаратів (підвісних головок).

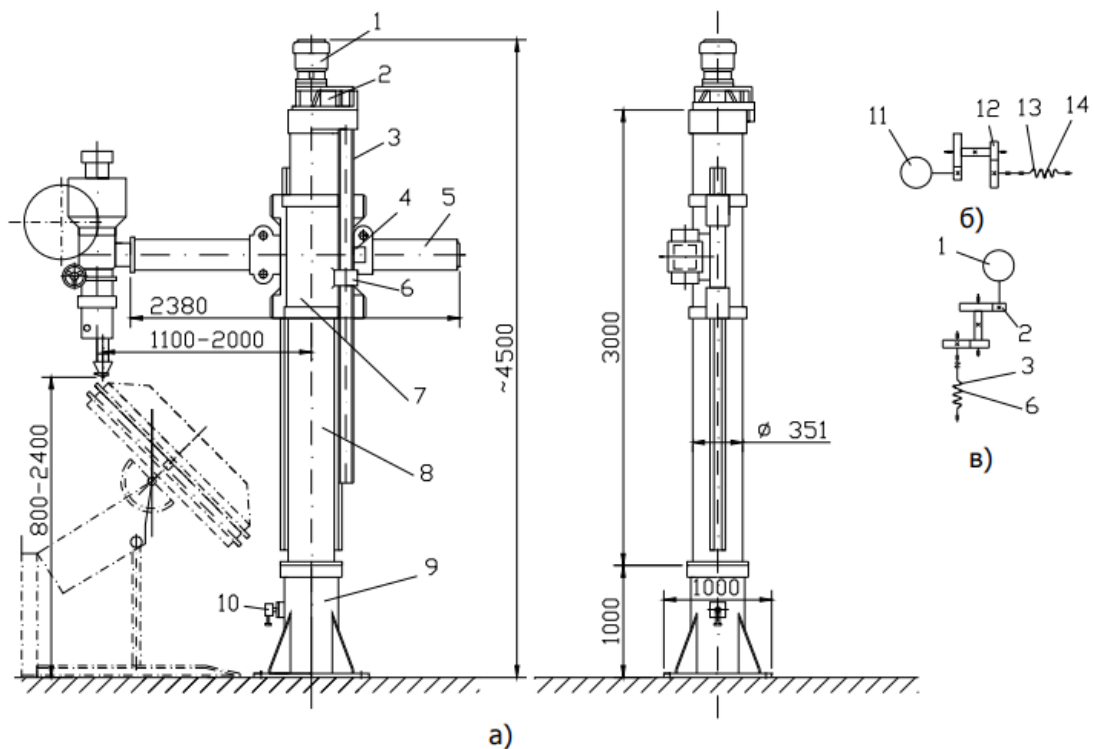


Рисунок 1.1 - Загальний вигляд і конструктивні особливості поворотної колони ПК-1

Колона (рис. 1.1,а) складаються з основи 9, стояка 7, консолі 4, каретки 6, приводу підймання й опускання консолі. Вертикальне переміщення каретки з консоллю отримують від електродвигуна 1 через двоступінчасту зубчасту передачу 2, ходовий гвинт 3 і гайку 5, закріплену на каретці. Каретка переміщається по вертикальним напрямним стояка на чотирьох роликах. Стояк з консоллю повертають навколо осі основи вручну і закріплюють фрикційним затискачем 8 [13].

Візки для зварювання кільцевих швів (для несамохідних зварювальних апаратів) і коротких прямолінійних швів (для самохідних зварювальних апаратів) мають тільки маршову швидкість пересування. Візки для зварювання кільцевих і довгих прямолінійних швів мають поряд із маршовою і робочу (зварювальну) швидкість пересування. По конструкції візки поділяють на три основні групи:

Велосипедні візки - переміщуються по двох рейках, розташованих у вертикальній площині одна над одною. Візки складаються з колон, встановлених на самохідних двоколісних платформах, які переміщаються по нижній рейці; у верхній частині колони розташовані ролики, які переміщаються по верхній рейці і утримують візок від перекидання.

Такі візки займають порівняно невелику виробничу площу, але можуть встановлюватися тільки біля стін цеху, оскільки для їхнього розміщення в середині цеху потрібно монтувати спеціальної металоконструкції для кріплення верхньої рейки. У деяких випадках верхня рейка закріплюється на цехових колонах.

Велосипедний візок ВТ - 1 (рис. 1.2) складається з платформи 9, стояка 8, консолі 5, каретки 7 і трьох електроприводів - пересування візка, вертикального і горизонтального переміщення консолі. Візок переміщається електродвигуном 11 через редуктор 10, зубчасту 17 та черв'ячну 18 передачі, що встановлені на платформі. Візок рухається по нижній рейці на котках 12 і верхнім напрямним, закріпленим на колонах.

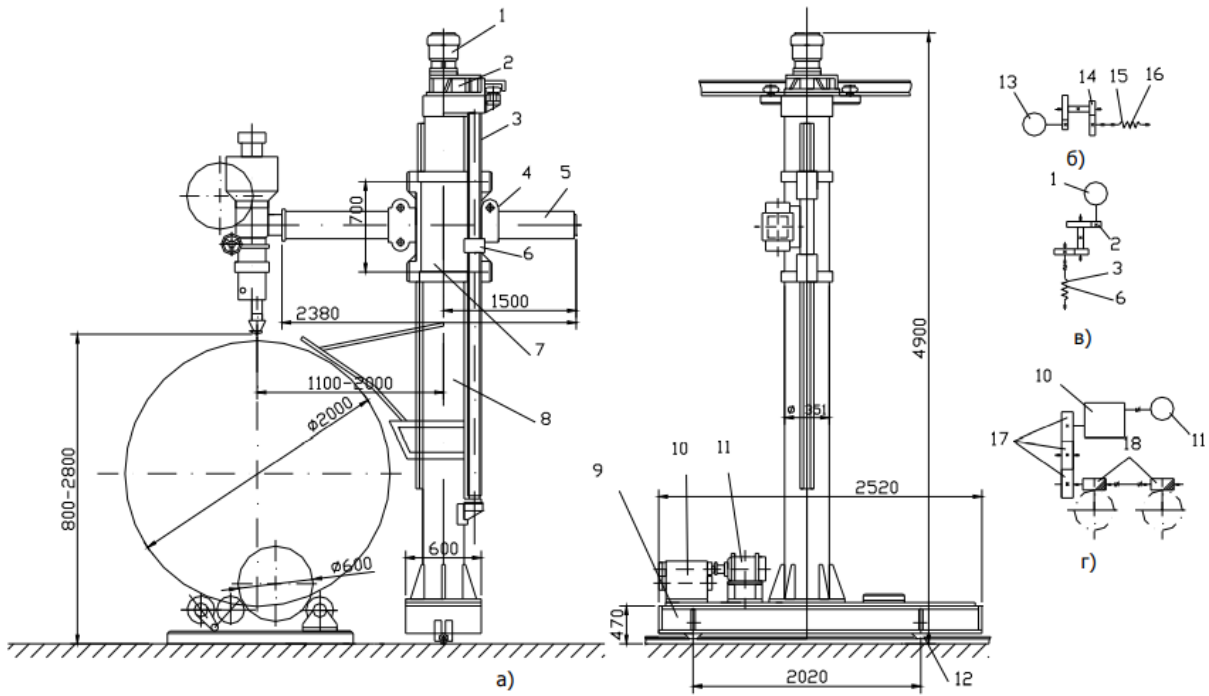


Рисунок 1.2 - Конструкція велосипедного візка ВТ-1

Вона може переміщуватися з робочою зварювальною і маршовою швидкостями. Робоча швидкість плавно регулюється зміною частоти обертання електродвигуна постійного струму за допомогою реостату. Перемикання руху з робочої швидкості на маршову здійснюється за допомогою електромагнітної муфти з дистанційним керуванням. Вертикальне переміщення каретки з консоллю виконується електродвигуном 1 через двоступінчасту зубчасту передачу 2, ходовий гвинт 3 і гайку 6, закріплену на каретці. Каретка переміщується по вертикальним напрямним стійки на чотирьох роликах. Горизонтальне переміщення консолі здійснюється електродвигуном 13, через двоступінчасту передачу 14, ходовий гвинт 15 і гайку 16, закріплену на напрямній 4. Консоль переміщається по напрямній на роликах. Прямолінійні шви можна зварювати за рахунок переміщення візка разом зі зварювальним апаратом по рейковому шляху з робочою швидкістю зварювання. Кільцеві шви зварюють без переміщення візка при обертанні виробу, встановленому на обертачі або роликовому стенді з робочою швидкістю зварювання.

В загальному велосипедний візок являє комплект устаткування, де на двоколісний самохідний візок установлена поворотна колона.

Глагольні візки – це візки, які відрізняються від велосипедних тим, що пересуваються по двох паралельних рейках, розташованих на підлозі цеху. Глагольні візки складаються із колон, встановлених на самохідні платформи. Вони досить універсальні і можуть встановлюватись в будь-якому місці цеху, однак мають два істотних недоліки - займають більшу виробничу площу, а також мають недостатню жорсткість. Глагольні візки можуть бути поворотними і неповоротними [19, 20].

Візки типу ГТ призначені для переміщення несамохідних зварювальних апаратів АБ, А-184 та інших під час зварюванні прямолінійних і кільцевих швів. Візок ГТ-1 (рис. 1.3) складається з платформи 9, стояка 8, каретки 7, консолі 5 і трьох електроприводів - переміщення візка, вертикального і горизонтального пересування консолі. Візок переміщається на котках 12 електродвигуном 11 через редуктор 10, зубчасту 17 і черв'ячну 18 передачі, які встановлені на платформі колони.

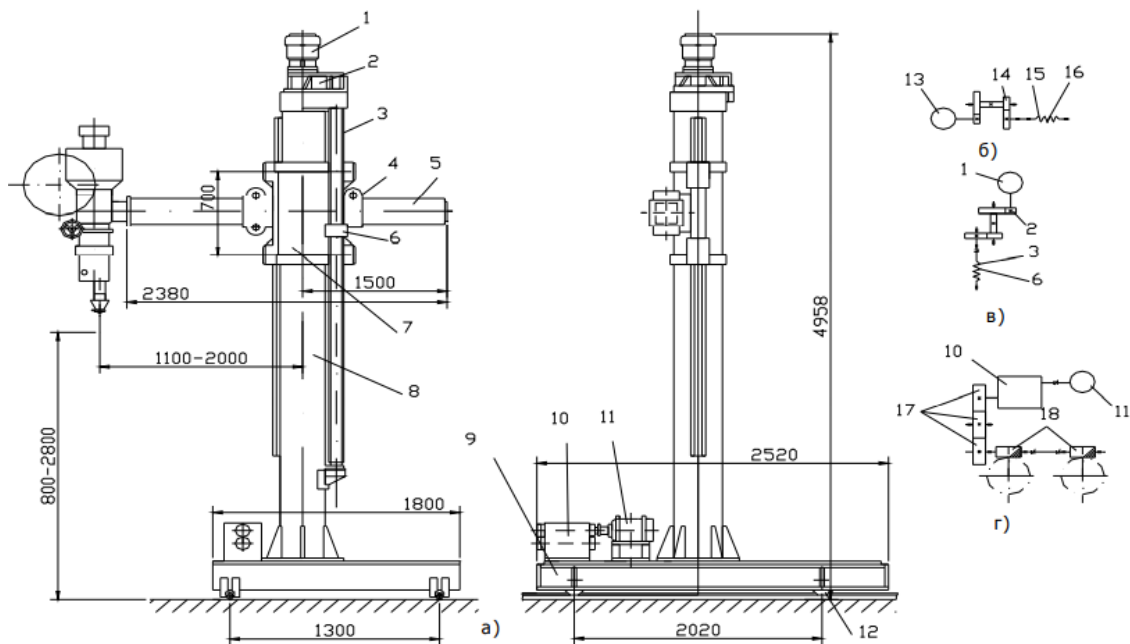


Рисунок 1.3 - Конструкція глагольного візка типу ГТ

Візок може рухатися з робочою і маршовими швидкостями. Робоча швидкість регулюється зміною числа обертання електродвигуна постійного струму за допомогою потенціометра. Робоча швидкість перемикається на маршову за допомогою електромагнітної муфти з дистанційним керуванням.

Вертикальне переміщення каретки з консоллю здійснюється за допомогою електродвигуна 1 через двохступінчасту зубчасту передачу 2, ходовий гвинт 3 і гайку 6, закріплену на каретці. Каретка рухається по вертикальних напрямних стійки на чотирьох роликах. Горизонтальний рух консолі по роликах напрямної 4 відбувається від електродвигуна 13 через двоступінчасту зубчасту передачу 14, ходовий гвинт 15 і гайку 16, закріплену на напрямній.

Портальні візки являють собою напольні візки, що переміщуються по двох рейках, розташованих по обидва боки від виробу. Ці візки мають найбільшу жорсткість у порівнянні з іншими і можуть бути розміщені в будь-якому місці цеху. Недоліком портальних візків є складність і громіздкість конструкції, яка охоплює виріб з обох сторін. Най частіше портальні візки призначені в основному для зварювання циліндричних виробів.

Портальний візок ПТ-1 призначений для переміщення самохідних зварювальних апаратів під час зварювання зовнішніх прямолінійних і кільцевих швів. Як зварювальний апарат застосовують зварювальні трактори типові ТС різних модифікацій. У випадку додаткового оснащення спеціальним рейковим шляхом на балконі можна використовувати підвісні голівки типові АБС і інші. Портал візка ПТ-1 (рис. 1.4.) складається з платформ 1, колон 2 і верхньої балки 6. На каретках 3, що переміщуються по колонах, закріплений балкон 4.

Привід 5 підйому й опускання балкону розміщений на верхній балці 6. Портал переміщують за допомогою двох електроприводів. Синхронна робота приводів забезпечується системою електричного валу. Зварювання поздовжніх швів здійснюється при переміщенні зварювального трактора в межах балкона по напрямних або безпосередньо по виробу. При зварюванні кільцевих швів виріб обертається на роликовому стенді, а зварювальний трактор закріплюється нерухомо на балконі [19, 20].

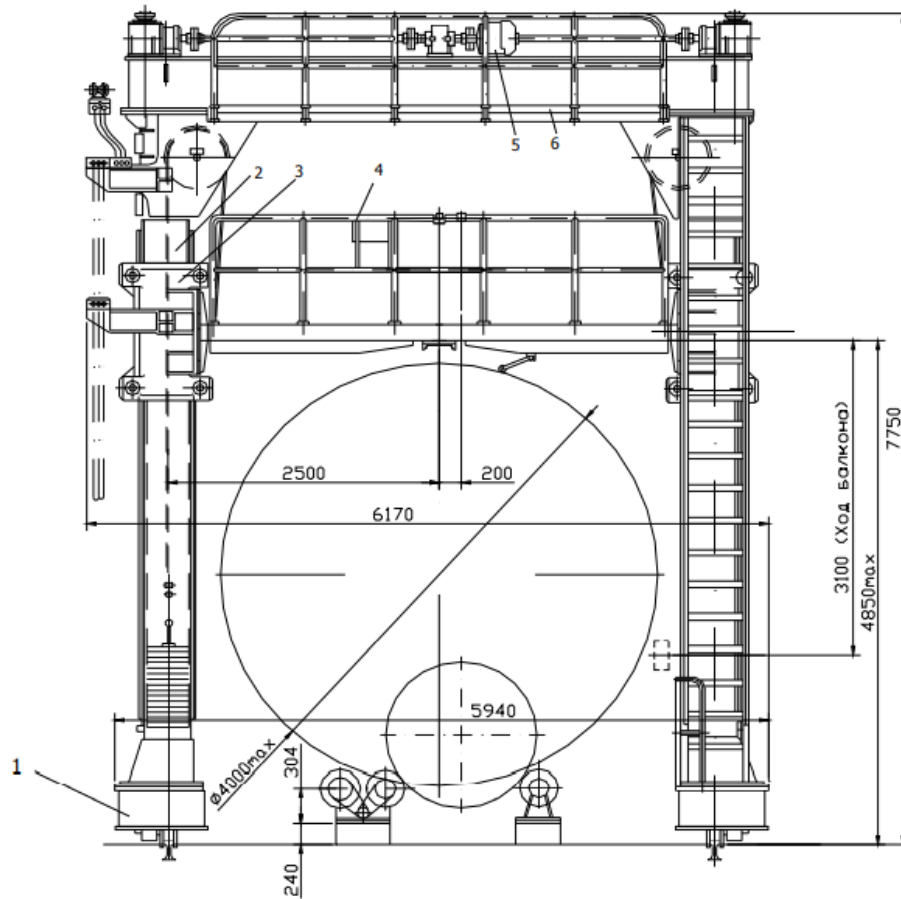


Рисунок 1.4 - Конструкція порталного візка ПТ-1

До спеціального технологічного устаткування для позиціювання і переміщення зварювальних автоматів можна також віднести мостові візки (коткі балки). Такі балки (рис. 1.5) призначені для автоматичного зварювання прямолінійних швів листових секцій, балок, колон, елементів металоконструкцій та ін. виробів. При комплектуванні комплексно-механізованого робочого місця обертачем або роликівим стендом є можливим зварювання і кругових швів. Проліт балки і довжина рейкового шляху на ній вибираються залежно від довжини зварюваних виробів і швів. Для моделі КБ-1 (рис. 1.5) він не перевищує 10 м. На балці 3 закріплений рейковий шлях для зварювального автомату 5, а також легка монорейка 6 для підвішування кабелів живлення зварювальної апаратури. Котка балка переміщається по рейках, встановлених на колонаді 1, висота якої визначається габаритами виробів та встановленого під балкою допоміжного устаткування.

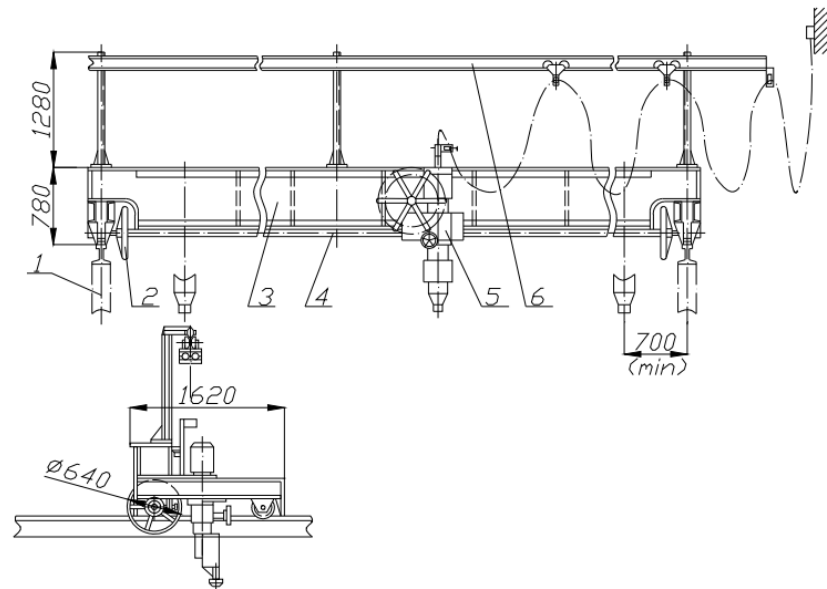


Рисунок 1.5 - Котка балка (мостовий візок) КБ-1

Переміщення балки по колонаді здійснюється або вручну за допомогою штурвалів 2, закріплених на приводному валі 4, або електроприводом кранового типу.

У ходовому механізмі візка остання кінематична ланка виконана у вигляді черв'ячної передачі. Завдяки цьому різко зменшується небезпека виникнення вібрацій під час зварювального руху головки.

1.4. Аналіз процесу зварювання в середовищі захисних газів

Електродугове зварювання в середовищі різних захисних газів можна виконувати в 2-х або 4-х тактному режимі. У 2-тактному режимі дуга запалюється натисканням на кнопку пальника і гасне при її відпусканні. У 4-тактному режимі дуга продовжує горіти після відпускання кнопки пальника. В процесі зварювання зварювальник може коригуватися параметри зварювання. Повторне натискання кнопки на пальнику призводить до загасання дуги [7, 29].

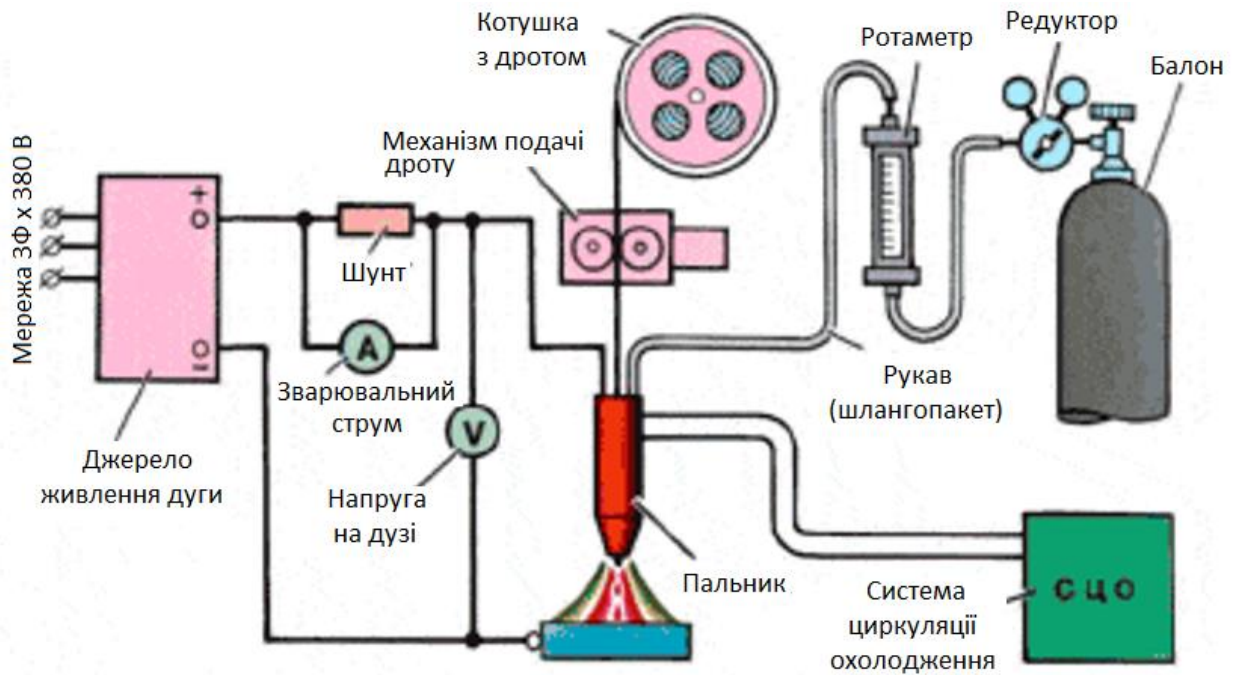


Рисунок 1.6 - Схема установки для зварювання в середовищі захисних газів

В автоматичному режимі зварювання сигнал від пальника до джерела живлення для початку зварювання може подаватись в ручному режимі, або з пульта керування автоматом. Для закінчення зварювання необхідно знову подати сигнал на джерело живлення, який свідчить про необхідність припинення подачі струму. Також процес зварювання може припинятись, якщо система керування джерелом живлення електричної дуги відслідковує переміщення пальника (на зварювальній колоні задана довжина шва). Після загасання дуги подача газу також припиняється.

Виліт електродного дроту – це довжина нерозплавленої частини дроту, яка виступає з сопла пальника із контактного наконечника. Значення даного параметра рекомендується в межах 5-10 мм. За таких значень забезпечується стійке горіння дуги, гарне проплавлення металу та чітке формування поверхні шва.



Рисунок 1.7 – Приклад впливу вильоту дроту на формування шва

Встановлення надто малого вильоту призводить до нестабільного горіння дуги та перегрівання контактної наконечника. Великий виліт дроту викликає більше розбризування металу, нестабільну дугу та погане проплавлення.

У MIG/MAG зварюванні велике значення має також положення сопла пальника відносно деталі та напрямку зварювання. Технологічний процес зварювання може виконуватися з вертикальним розташуванням пальника, кутом вперед або кутом назад [25].

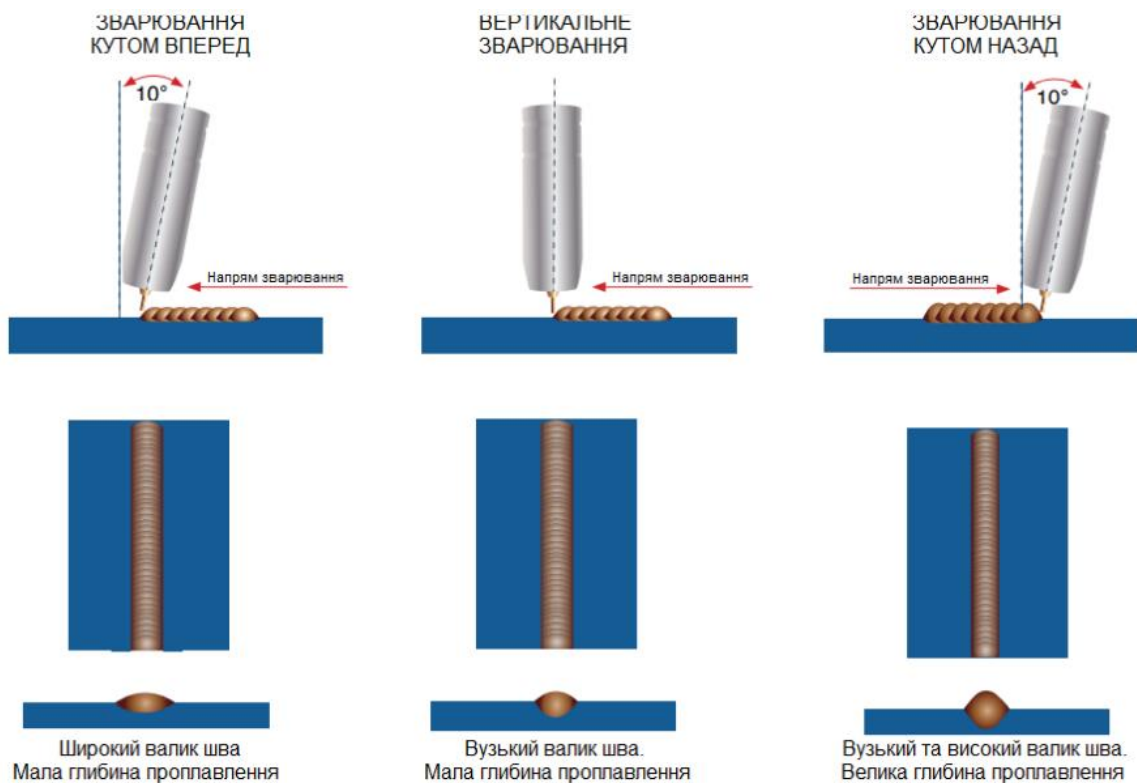


Рисунок 1.8 – Приклад впливу нахилу зварювального пальника на провар та форму шва

Під час зварювання кутом назад зварювальний пальник потрібно позиціонувати так, щоб напрямок подачі дроту не співпадав з напрямком переміщення пальника. При зварюванні кутом ці напрямки збігаються. При вертикальному положенні зварювання напрямок подачі дроту є перпендикулярним до напрямку переміщення пальника. Для зміни способу зварювання оператору змінити кут нахилу пальника.

При зварюванні кутом назад забезпечується краща стабільність дуги і зменшується розбрикування металу. Такий спосіб рекомендований для з'єднання товстіших заготовок де необхідно забезпечити велику глибину проплавлення. Крім того, зварювальник контролює зварювальну ванну, що сприяє підвищенню якості зварювання.

Зварювання кутом вперед використовується для з'єднання тонких металів. Цей спосіб має меншу глибину проплавлення, а зварний шов виходить ширшим.

Вертикальне зварювання використовують в автоматичних процесах. При такому положенні пальника утворюється вузький зварний шов з малою глибиною проплавлення

Головним завданням будь-якого захисного газу є захист розплавленого металу в зварювальній ванні від взаємодії з киснем, азотом і вологою, яка міститься в навколишнього повітря. Захисний газ подається з балона чи централізованої системи через пальник і сопло, витісняє та заміщує собою повітря в зоні зварювання і утворюючи хмару газу навколо зварювальної дуги та над ванною. В технологіях зварювання металоконструкцій з вуглецевих сталей можуть використовувати газ CO_2 або його суміші з аргоном (Ar-CO_2) в різних пропорціях.

При зварюванні в сумішах Ar-CO_2 зварювальна ванна рідша. В суміші Ar-CO_2 зварювальна дуга має менше розбрикування. Однак, при цьому зростає ймовірність утворення газових пор [27].

Використання вуглекислого газу CO_2 дозволяє забезпечити досить глибоке проплавлення, тому рекомендується під час зварювання товстого металу. До недоліків цього газу відносять зварювальну дугу гіршої стабільності та більше

розбризування металу. Також його рекомендують використовувати тільки на короткій дузі.

Для зварювання нержавіючих сталей застосовують дві суміші газів: 98% Ar + 2% CO₂ – рекомендується для промислового зварювання нержавійки, забезпечує хороше розтікання металу шва; 98% Ar + 2% O₂ – використовують, коли хочуть досягти кращого змочування поверхні кромки основного металу.

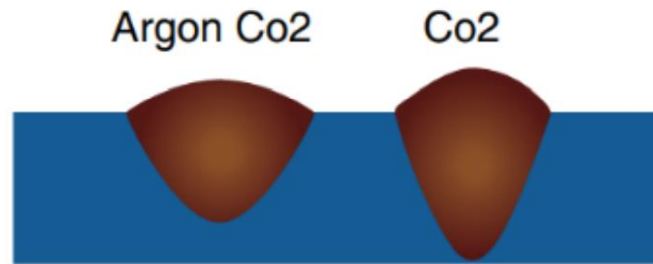


Рисунок 1.9 – Вплив виду захисного газу на форму провару шва

Кут нахилу пальника від 5° до 15° ідеально підходить для зварювання. Він забезпечує хороший контроль зварювальної ванни. Кут більше 20° може призвести до нестабільного горіння дуги, крупнокрапельного перенесення металу, недостатнього провару, а також, більшого розбризування металу.



Рисунок 1.10 – Приклад впливу нахилу пальника на якість зварювання

Швидкість переміщення пальника є основним параметром, який визначає швидкість зварювання. На неї впливає:

- товщина деталі: зі збільшенням товщини деталі швидкість зварювання буде зменшуватися і навпаки;

- швидкість подачі дроту: збільшення швидкості подачі дроту призводить до збільшення швидкості зварювання;

- напрямок зварювання: зварювання кутом вперед забезпечує вищу швидкість технологічного процесу.

Швидкість переміщення пальника може змінюватися залежно від умов зварювання та типу обладнання і його швидкодії.

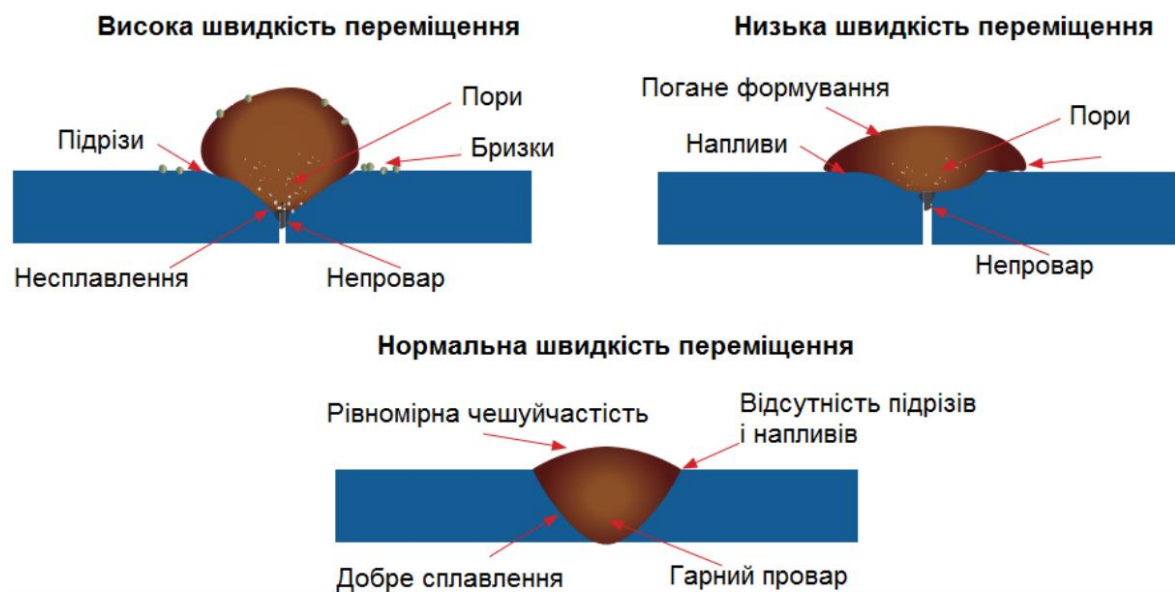


Рисунок 1.11 – Приклад впливу швидкості переміщення пальника на наявність дефектів шва

Швидкість переміщення пальника в автоматичному зварюванні повинна підбиратися відповідно до зварювального струму, товщини і матеріалу заготовки, технологічних вимог до якості шва.

1.5. Напруження і деформації при зварюванні та причини їх виникнення

Розширення та скорочення металу від нерівномірного нагріву або охолодження, а також від структурних перетворень, утворюють так звані власні деформації та напруження при зварюванні.

На відміну від напружень і деформацій, які утворюються навантаженнями, власні напруження і деформації існують у тілі при відсутності будь-яких навантажень.

Власні напруження класифікуються за різними ознаками [17]:

- за причиною яка їх викликає:

1) напруження від пружних або пластичних деформацій за нерівномірного нагрівання при зварюванні;

2) напруження від нерівномірної зміни об'єму при фазових перетвореннях;

- за тривалістю існування:

1) тимчасові, які існують тільки під час виконання технологічної операції;

2) залишкові, які зберігаються після зварювання протягом значного часу;

- за просторовим розташуванням:

1) одновісні (лінійні);

2) двовісні (ширинні);

3) трьохвісні (об'ємні).

- в залежності від об'єму, в межах якого ці напруження є взаєморівноваженими:

1) напруження першого роду (макрооб'єм);

2) напруження другого роду (зерно);

3) третього роду (кристалічна решітка).

Температурні або термічні напруження – це внутрішні (власні) механічні напруження, які виникають між елементами твердого тіла під дією внутрішніх сил, обумовлених тепловим впливом (нагрівом, охолодженням, перебуванням під високою температурою протягом значного часу) та створюють деформацію тіла. Температурні напруження є тимчасовими.

В результаті усадки (зменшення питомого об'єму) металу шва при зварюванні виникають напруження розтягу у біляшовних ділянках деталі та викликають в них відповідні деформації. Різні метали і сплави характеризуються різною усадкою, яка вимірюється відсотками від початкового лінійного розміру: маловуглецева ливарна сталь 2,0 %; сірий чавун 0,7...0,8 %; алюміній 1,7...1,8 %; бронза 1,45...1,6 %; латунь 2,06 %; мідь 2,1 % [4].

Величина деформації та пов'язаних з нею напружень залежить від розмірів зони теплового впливу. Чим більший об'єм металу нагрітий, тим більшими є деформації. Тому різні способи зварювання мають різну величину деформацій. Більша величина нагріву і деформації отримується під час газового зварювання киснево-ацетиленовим полум'ям і менша при електродуговому зварюванні металевим електродом.

Геометричні розміри й розташування швів також впливають на величину деформацій. Найбільші деформації виникають у довгих швах, шви більшого перетину, а також шви, розташовані несиметрично по відношенню до головних осей перерізу зварного профілю. Чим складніша форма деталі, чим більшою в ній може бути наявність різних швів, а отже більшою буде імовірність появи деформацій і напружень. Зменшення глибини і площі розплавлення основного металу при зварюванні різко зменшує короблення виробу. Штучне охолодження деталі в процесі зварювання також зменшує значення деформації.

Напруження викликані усадкою можуть зростати до моменту переходу пружних деформацій у пластичні. Якщо метал мало пластичний, то деталь може дати тріщину в найслабшому місці, яким є зона термічного впливу. Напруження від усадки також є причиною гарячих тріщин, які виникають під час кристалізації металу шва.

Якщо під час нагріву найбільша деформація стиску не перебільшує пружної деформації матеріалу, то після вистигання пружні деформації та напруження зникають.

В основі утворення деформацій при зварюванні лежать ті ж причини, які призводять до зварювальних напружень. Під зварювальною деформацією розуміють переміщення окремих точок або навіть частин зварних з'єднань і навіть цілих конструкцій. Як і напруження, зварювальні деформації бувають тимчасовими і залишковими. Наприклад, деформації балки (рис. 1.12,а,б) при зварюванні називаються тимчасовими, а після охолодження (рис. 1.12,в) - залишковими.

Така градація є умовною, оскільки в один і той самий час частина деформацій може носити тимчасовий характер, а інша частина вже завершить процес змін і будуть залишковими.

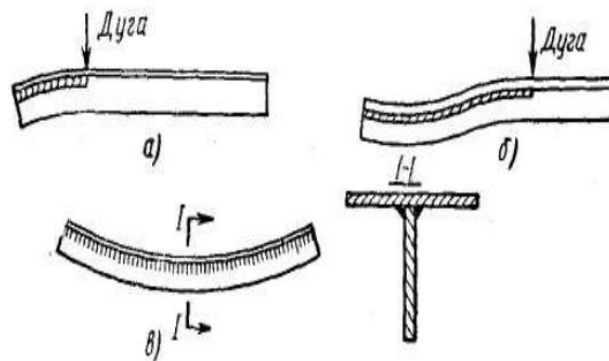


Рисунок 1.12 - Деформації зварної таврової балки

Деформації зручно розділити на декілька видів [17].

1. Деформації в площині зварюваних деталей, коли деформацією в напрямку третьої осі можна знехтувати. Такі деформації можуть виникати під час зварювання пластин (рис. 1.13,а).

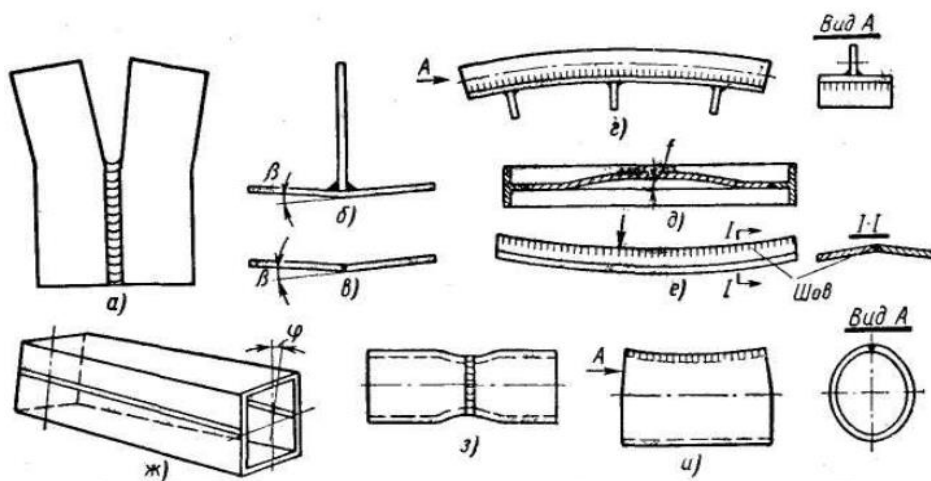


Рисунок 1.13 - Види можливих деформацій при зварюванні

2. Деформації в площині, перпендикулярній до шва. До них відносять деформації грибоподібності і кутового повороту (рис. 1.13,б, в).

3. Деформації прогину балок (рис. 1.13,г), коли подовжня вісь балки викривляється через усадку швів в подовжньому або поперечному напрямках.

4. Деформації, які призводять до втрати стійкості тонких елементів конструкції (рис. 1,13,д,е). Під дією залишкового напруження стиску

відбувається викривлення, форма та розміри якого можуть мати різний вигляд. В основному це є значні переміщення листових конструкцій в площині листа.

5. Деформації скручування відносно подовжньої осі (рис. 1.13,ж).

6. Деформації оболонок під час виконання на них кільцевих і подовжніх швів, а також виконання кругових чи криволінійних швів на поверхнях тіл обертання (рис. 1.13,з,и).

7. Деформації складних конструкцій, при яких вони складаються з декількох окремих видів, впливають одна на одну і створюють притаманні кожній конструкції зміни форми.

В більшості випадків під час зварювання можуть виникати відразу декілька видів деформацій.

2. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

2.1. Продуктивність електродугового зварювання

На продуктивність процесу електродугового зварювання мають вплив такі технологічні фактори [7. 29]:

- зварювальний струм;
- коефіцієнт розплавлення металу, який показує, скільки електродного дроту розплавиться під дією зварювального струму в 1 А за 1 год;
- коефіцієнт наплавлення, який зазвичай є меншим за коефіцієнт розплавлення, оскільки не весь розплавлений електродний метал переходить в зварний шов (частина електродного металу вигорає і розбризкується).

Продуктивність процесу дугового зварювання (в г/год.) визначається за формулою:

$$Q = \alpha_n \cdot I, \quad (2.1)$$

де α_n – коефіцієнт наплавки, г/А·год.;

I - величина зварювального струму, А.

Продуктивність процесу дугового зварювання прямо-пропорціональна коефіцієнту наплавки та величині зварювального струму.

Ще одним технологічним параметром процесу автоматичного зварювання, яким можна оцінити продуктивність є швидкість зварювання. В автоматичних процесах зварювання вона має бути взаємопов'язана з швидкістю переміщення пальника системою автоматичного переміщення.

Крім того цей параметр характеризує якість технологічного процесу. Ідеальним можна вважати зварний шов, який не має непроварених ділянок або пропалів та напливів. Ширина якісного зварного шва повинна бути в 2 рази більшою за ширину електрода.

Також слід розуміти, що при підвищенні швидкості зварювання метал просто не прогріється до потрібної температури і шов вийде непровареним,

крихкими і недовговічними. Зниження швидкості зварювання призводить до сильного плавлення металу та утворення напливів.

2.2. Теоретичне обґрунтування та розрахунок режимів зварювання в середовищі захисного газу

Зварювання в середовищі захисних газів широко застосовується для виготовлення зварних конструкцій з різних видів сталей. Основні типи з'єднань, які отримують цим способом регламентуються ДСТ 14771-76.

Основними параметрами процесу зварювання в середовищі захисних газів є:

1. Діаметр зварювального електродного дроту, $d_{ел}$, мм.
2. необхідна сила зварювального струму, $I_{зв}$, А.
3. Напруга зварювання на дузі, U_d , В.
4. Швидкість подачі зварювального електродного дроту, $V_{пд}$, м/год.
5. Швидкість зварювання, $V_{зв}$, м/год.
6. Витрата захисних газів, q_g .

Додатковими параметрами процесу можуть бути:

7. Рід зварювального струму.
8. Полярність зварювання постійним струмом.

Шви стикових зварних з'єднань можуть виконуватися з обробленням або без неї.

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 [8, 15].

Діаметр електродного дроту $d_{ел}$ вибирають за товщиною зварюваного металу і просторового положення шва з врахуванням забезпечення максимальної продуктивності процесу і недопущення появи дефектів в процесі зварювання.

Під час вибору необхідного діаметра електродного дроту при виконанні швів у нижнім положенні рекомендуються визначені експериментальним шляхом значення, які наведені в 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 дроту для процесу виконання 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	

Потрібна сила струму зварювання визначається за формулою:

$$I_{зв} = \frac{\pi \cdot d_{ел}^2}{4} \cdot j, \text{ А} \quad (2.2)$$

де j – щільність струму в електродному дроті (табл. 2.3);

$d_{ел}$ – діаметр зварювального 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 ²	88-195 310-440	90-160 200-350	60-140 160-240	45-70 78-110
Зварювальний струм, А	100-220 350-500	180-320 400-700	200-450 500-750	300-500 550-800

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

Напругу на дузі (U_d) можна розрахувати за формулою:

$$U_d = 15 + \frac{50 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{d_{ел}}} \cdot I_{зв}, \text{ В} \quad (2.3)$$

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

Швидкість подачі дроту можна визначити за формулою:

$$V_{пд} = \frac{4 \cdot \alpha_p \cdot I_{зв}}{\pi \cdot d_{ел}^2 \cdot \rho}, \text{ м/год} \quad (2.4)$$

де α_p - коефіцієнт розплавлення дроту, г/А· год;

ρ - густина металу дроту, г/см³, (для сталі $\rho = 7,8$ г/см³) [8].

Значення α_p розраховується за формулою

$$\alpha_p = 3,0 + 0,08 \cdot \frac{I_{зв}}{d_{ел}} \quad (2.5)$$

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

Тоді

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

Швидкість зварювання визначається за формулою:

$$V_{зв} = \frac{\alpha_n \cdot I_{зв}}{100 \cdot F_n \cdot \rho}, \text{ м/ГОД} \quad (2.6)$$

де α_n - коефіцієнт наплавлення, г/А год;

$$\alpha_n = \alpha_p \cdot (1 - \psi) \quad (2.7)$$

де ψ - коефіцієнт втрат металу на угар і розбризування ($\psi = 0,02 \dots 0,03$) [7];

F_n - площа поперечного перерізу шва;

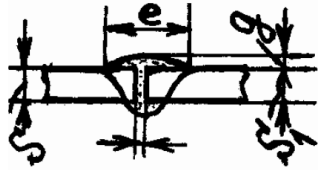
$$\alpha_n = 13 \cdot (1 - 0,02) = 12,74$$

Тоді

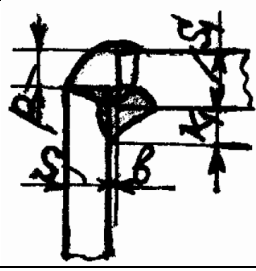
$$V_{зв} = \frac{12,74 \cdot 150}{100 \cdot 0,14 \cdot 7,85} = 17,4 \text{ м/год}$$

Площа поперечного перерізу шва завжди залежить від його виду. Під час розробки технологічних процесів площу шва визначають за таблицями конструктивних елементів швів (табл. 2.4, 2.5)

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

Таблиця 2.6 - Питомі норми витрат захисного вуглекислого газу під час зварювання

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 визначаються аналогічно.

2.3. Теоретичний аналіз виникнення деформацій зварних конструкцій

У процесі виготовлення зварних металоконструкцій спостерігаються зміни форми окремих їх елементів або усієї конструкції з наступним відхиленням від заданих проектом розмірів. Ці відхилення вважаються дефектами, викликаними тепловою деформацією виробу та усадкою зварних швів. Для визначення причин виникнення теплових деформацій зварних металоконструкцій проаналізуємо основні їх види.

2.3.1. Поздовжні теплові деформації у зварних металоконструкціях

Розглянемо зварну таврову балку, складену з двох плит (рис. 2.1). Матеріал для конструкції – сталь Ст 3. Балка має такі геометричні параметри: довжина $l = 6$ м; висота стінки балки $h = 200$ мм; ширина полиці балки $b = 100$ мм; товщина стінки балки $t_1 = 8$ мм; товщина полиці балки $t_2 = 12$ мм; тип зварного з'єднання ТЗ за ГОСТ 8713–79; катет зварного шва $k = 5$ мм.

Балка після зварювання буде деформуватися у вигляді вкорочення нейтральної осі та вигином з опуклістю вгору. Причиною такої деформації є нерівномірний нагрів в поперечному перерізі елементів конструкції, внаслідок

чого виникають деформації вкорочення металу в зоні нагріву. Вимірюються ці деформації об'ємом поздовжнього вкорочення, а їх вплив на балку оцінюють поздовжньою силою усадки, яка й спричиняє вкорочення балки по нейтральній осі. Оскільки лінія дії сили деформації часто не співпадає з нейтральною віссю балки, то виникає згинаючий момент, який і викликає деформації згину в балці.

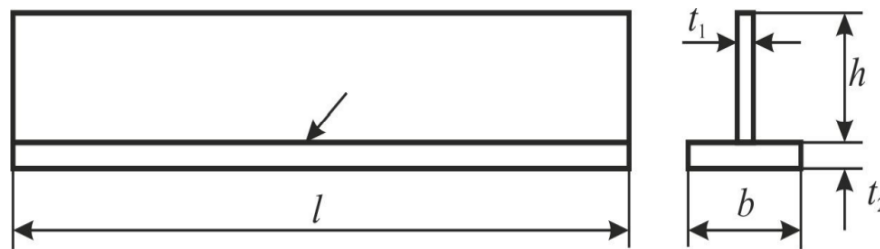


Рисунок 2.1 – Схема зварної таврової балки

Для визначення деформацій потрібно знайти об'єм поздовжнього вкорочення одного шва. Для сталевих деталей він визначається за формулою:

$$V = -0,335 \frac{\alpha}{c\rho} q_n l, \quad (2.8)$$

Після підстановки температурного коефіцієнта лінійного розширення сталі $\alpha = 13,25 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ і об'ємної її теплоємності $c\rho = 4,1 \text{ Дж/(см}^3 \cdot ^\circ\text{C)}$ отримаємо [21]

$$V = -1,08 \cdot 10^{-6} q_n \cdot l, \quad (2.9)$$

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

$l = 600 \text{ см}$ – довжина зварного шва.

Погонну енергію процесу зварювання визначають у залежності від площі перерізу наплавленого металу шва за формулою:

$$q_n = A \cdot F_n. \quad (2.10)$$

В нашому випадку коефіцієнт пропорційності при зварюванні в середовищі захисних газів становить 64500 Дж/см^3 , а площа перерізу шва становитиме:

$$F_n = k_o (k^2 / 2), \quad (2.11)$$

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

$k = 5 \text{ мм}$ – катет зварного шва.

Тоді

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

а годинна погонна енергія буде рівна

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

Об'єм поздовжнього укорочення від накладання одного шва становитиме

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

Другий шов буде збільшувати об'єм поздовжнього укорочення менше ніж в два рази. Коефіцієнт збільшення при цьому приймають $m_{1,2} = 1,3$ [21]. Тоді об'єм поздовжнього укорочення від двох швів становитиме:

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

Сила усадки для такого 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 балки визначають з виразу:

$$\Delta l = \frac{V_{1,2}}{F} \quad (2.12)$$

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

$$\varphi = V_{1,2} \cdot z / I_y, \quad (2.13)$$

де I_y – момент інерції перерізу відносно осі y ;

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

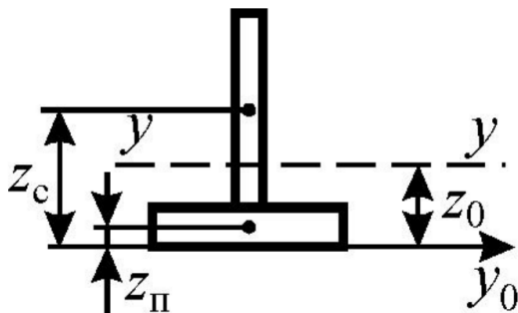


Рисунок 2.2 - Поперечний переріз балки

z_c і z_n – положення центрів ваги стінки та полиці балки відносно осі y_0

Провівши вісь y_0 через нижню кромку полиці визначимо положення центру ваги і власний момент інерції відносно осі y [3]. Результати розрахунків зведені в таблиці 2.7.

Таблиця 2.7 – Результати розрахунку геометричних характеристик поперечного перерізу зварної балки

Елемент перерізу	Положення центру ваги перерізу елемента z_i , см	Площа перерізу елемента F_i , см ²	Статичний момент перерізу елемента S_i , см ³	Переносний момент інерції перерізу елемента I_{yi} , см ⁴	Власний момент інерції перерізу елемента I_{0i} , см ⁴
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 поперечного перерізу балки відносно осі порівняння:

$$z_0 = \frac{\Sigma S}{F} = \frac{186,4}{28} = 6,66 \text{ см} \quad (2.14)$$

Отже, власний момент інерції перерізу балки:

$$I_y = \Sigma I_{yi} + \Sigma I_{y0} - F \cdot z_0^2 = 2011 + 534 - 28 \cdot 6,66^2 = 1303 \text{ см}^4 \quad (2.15)$$

Відстань між осями зварного шва та перерізу балки:

$$z = z_0 - t_2 = 6,66 - 1,2 = 5,46 \text{ см.} \quad (2.16)$$

Кут повороту кінцевих перерізів становитиме:

$$\varphi = V \cdot z / I_y = -7,6 \cdot 5,46 / 1303 = -0,232. \quad (2.17)$$

Стрілка прогину балки становитиме:

$$f = \varphi l / 8, = -0,032 \cdot 600 / 8 = -2,4 \text{ см.} \quad (2.18)$$

Схема можливої деформації балки наведено на рис. 2.3.

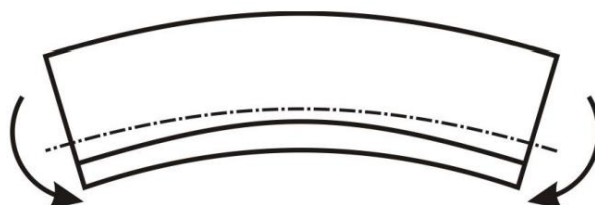


Рисунок 2.3 - Схема можливої деформації балки після зварювання

Для подальшого аналізу визначимо розміри зони деформацій.

Площа деформації становитиме:

$$F_T = \frac{1}{1/F + z^2/I_z + 1200/q_{\Pi}} \quad (2.19)$$

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

Розмір деформації від осі зварного шва у всіх напрямках елементів балки:

$$b_T = \frac{F}{t_1 + 2t_2} = \frac{5,2}{0,8 + 2 \cdot 1,2} = 1,6 \text{ см.} \quad (2.2)$$

З урахуванням знайдених розмірів уточнимо коефіцієнт впливу перекриття у двосторонньому зварному шві:

$$m_{1,2} = 1 + \frac{(t_1 + k)t_2}{F_{T1}} = 1 + \frac{(0,8 + 0,5) \cdot 1,2}{5,2} = 1,39 \quad (2.21)$$

Це свідчить, що деформації від двостороннього шва будуть більші за розрахункові на 7 % [17].

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

$$\sigma = \frac{P_{yc}}{F} + \frac{M_{yc} \cdot y}{I} \quad (2.22)$$

На 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 $y_1 = h + t_2 - z_0 = 20 + 1,2 - 6,7 = 14,5 \text{ см.}$

Тоді напруження будуть рівні

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

Нижній кромці стінки ці напруження розтягу досягнуть границі текучості матеріалу елементів юбалки, тобто 240 МПа.

В полиці балки будуть діяти напруження стиску, оскільки вона розташована нижче осі балки на відстані $y_2 = z_0 - t_2/2 = 6,7 - 1,2/2 = 6,1 \text{ см.}$ Величина цих напружень буде рівна:

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

Напруження розтягу досягають межі текучості матеріалу балки 240 МПа.

На рис. 2.4 наведені епюри утворених напружень

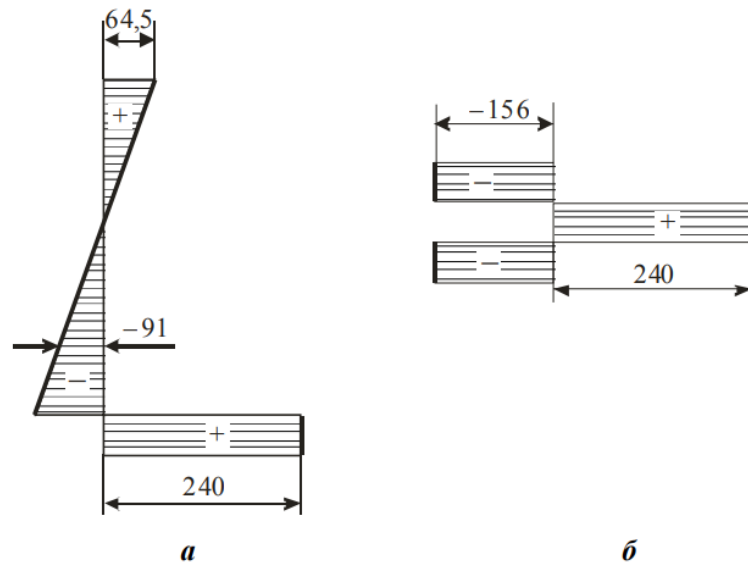


Рисунок - 2.4 Епюри напружень деформацій у стінці (а) та полиці (б) зварної балки

Залежності повздовжніх теплових деформацій зварної конструкції від геометричних параметрів її складових наведено на рис. 2.5.

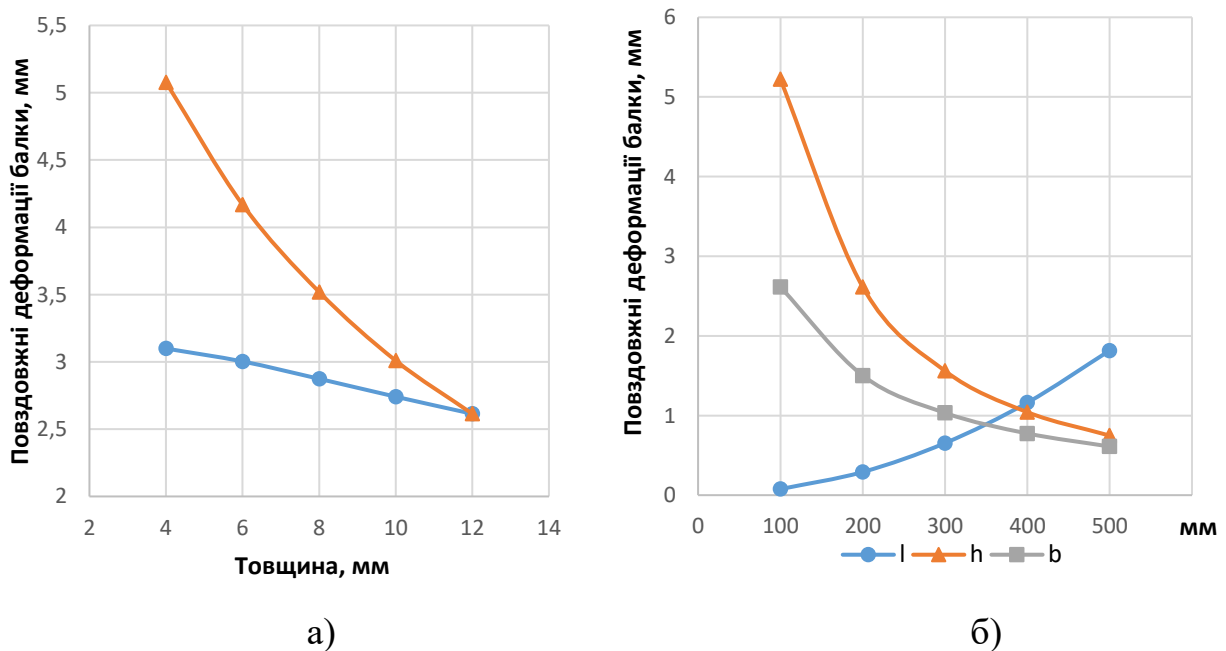


Рисунок 2.5 – Графік залежності повздовжніх деформацій зварної балки від товщини її деталей (а) та їх розмірів (б)

З рис. 2.5,а бачимо, що збільшення товщини деталей призводить до зменшення величини повздовжніх деформацій. До зниження деформацій також призводить збільшення розмірів полиці та стінки (рис. 2.5,б). Збільшення довжини балки призводить до збільшення повздовжніх деформацій (рис. 2.5,б).

Вплив розмірів перерізу зварного шва, виражених через катет k , на значення повздовжніх деформацій відображено на рис. 2.6.

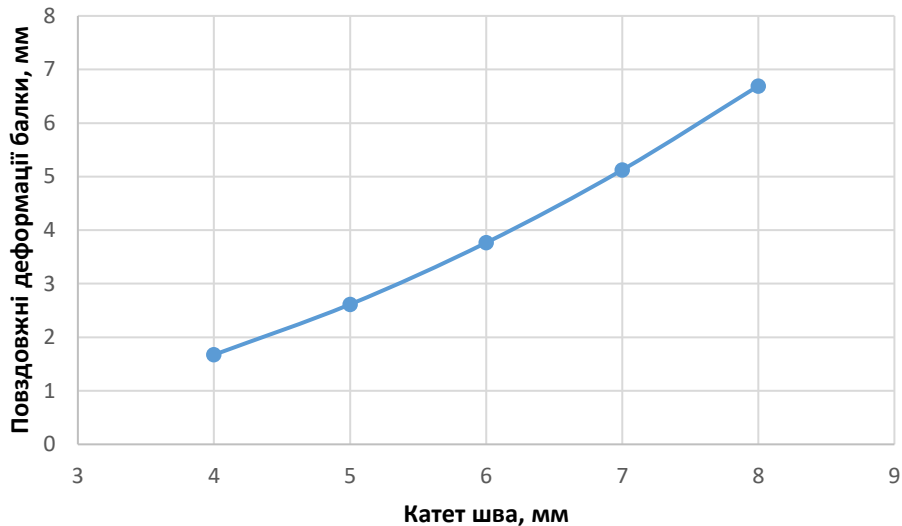


Рисунок 2.6 – Залежність повздовжньої деформації балки від катета шва

Більшим значенням катета шва відповідає більша деформація. Це пояснюється збільшенням об'єму наплавленого металу, а отже й більшим тепловим впливом на деталі.

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 металоконструкціях

Для аналізу умов виникнення поперечних деформацій розглянемо таврову балку, до якої приварені косинки (рис. 2.7). Матеріал конструкції – конструкційна сталь Ст3. Розміри конструкції: довжина балки $l = 6$ м, висота стінки балки $h = 400$ мм, ширина полиці балки $b = 200$ мм, відстань між

косинками на балці $a = 0,5$ м, товщина стінки балки $s_1 = 6$ мм, полиці балки $s_2 = 12$ мм, косинки на балці $s_3 = 5$ мм, тип зварного з'єднань ТЗ за ГОСТ 5264–80, катет зварного шва $k = 5$ мм.

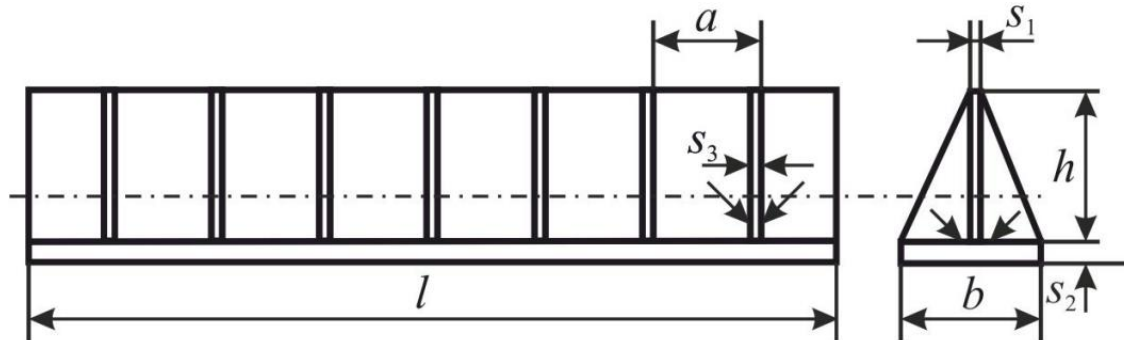


Рисунок 2.7 – Схема зварної таврової балки з косинками

В такій конструкції загальними видами деформації, спровоковані приварюванням косинок до полиці, буде вкорочення нейтральної осі та згин випуклістю вгору. Причини виникнення деформацій ті ж самі, що і в попередньому випадку.

Для визначення загальних деформацій розрахуємо об'єм поперечного вкорочення під дією одного шва. Для сталі її знаходять:

$$W = - \xi q_{n.n} l_{ш}, \quad (2.23)$$

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

Для марки сталі Ст 3 приймаємо $\alpha/c_{\rho} = 3 \cdot 10^{-6}$ см³/Дж, тоді

$$W = -3 \cdot 10^{-6} \cdot [0,25 + 0,75k_s(0,1 + k_{жс})] \cdot q_{n.n} \cdot l_{ш}. \quad (2.24)$$

Частка погонної енергії, затрачена на нагрів полиці:

$$q_{n.n} = k_n \cdot q_n, \quad (2.25)$$

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

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

Для кутового шва з катетом k площа наплавленого металу становить:

$$F_n = k_o \cdot k_2 / 2. \quad (2.26)$$

Прийнявши $k_o = 1,4$, отримаємо

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

Коефіцієнт пропорційності для дугового зварювання дорівнює 64500.

Повна погонна енергія зварювання складатиме:

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

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

Частка енергії, що 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 визначимо з графіка на рис. 2.8.

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

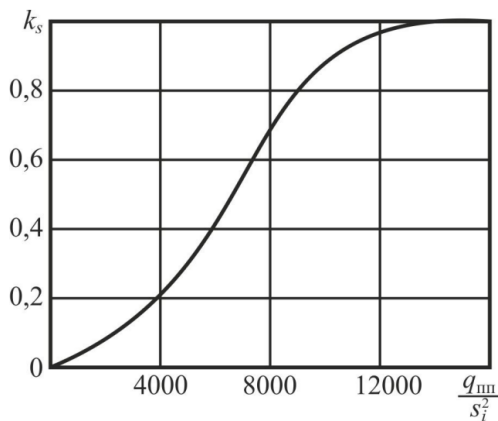


Рисунок 2.8 - Залежність коефіцієнта впливу ступеня прогрівання по товщині від питомої погонної енергії

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

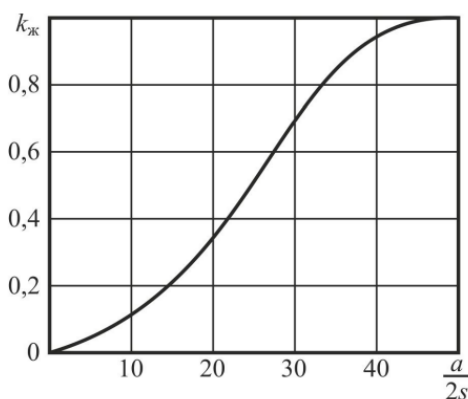


Рисунок 2.9 - Залежність коефіцієнта жорсткості від відносної відстані між ребрами

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

Тоді об'єм поперечного вкорочення одностороннього шва, яким приварюється пара косинок, 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 12 пар косинок, приварених двостороннім швом, 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 ²	Статичний момент перерізу елемента S_i , см ³	Переносний момент інерції перерізу елемента I_{yi} , см ⁴	Власний момент інерції перерізу елемента I_{0i} , см ⁴
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 (2.14):

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

Власний момент інерції перерізу балки (2.15):

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

Відстань між осями зварного шва та балки:

$$z = 11,1 - 1,2 = 9,9 \text{ см}.$$

Загальне вкорочення балки при вигині балки визначимо за формулами:

$$\Delta l = \frac{\sum W}{F} = \frac{-4,85}{48} = -0,1 \text{ см} = -1 \text{ мм} \quad (2.27)$$

$$\varphi = \frac{\sum W \cdot z}{I_y} = \frac{-4,85 \cdot 9,9}{8290} = -5,8 \cdot 10^{-3} \text{ рад} \quad (2.28)$$

Прогин буде виникати вгору, оскільки шви розташовані нижче від осі балки.

Враховуючи, що всі шви косинок будуть рівномірно розподілені по балці, форма прогину, а отже стрілка прогину визначається за формулою:

$$f = \varphi \cdot \frac{l}{8} = -5,8 \cdot 10^{-3} \frac{600}{8} = -0,435 \text{ см} = -4,35 \text{ мм} \quad (2.29)$$

Після приварювання косинок до стінки балки вкорочення балки збільшиться у декілька разів, оскільки кількість швів стане у два рази більшою [21].

В такому випадку, вигин зменшиться і змінить знак на протилежний, оскільки при тому ж плечі z напрям вигину має протилежний знак, так як ЦВ шва буде розміщено вище за ЦВ перерізу балки.

На рис. 2.10 наведено залежність поперечних деформацій балки від розміру приварених косинок. З нього бачимо, що зі збільшенням товщини косинок величина деформацій зменшується.

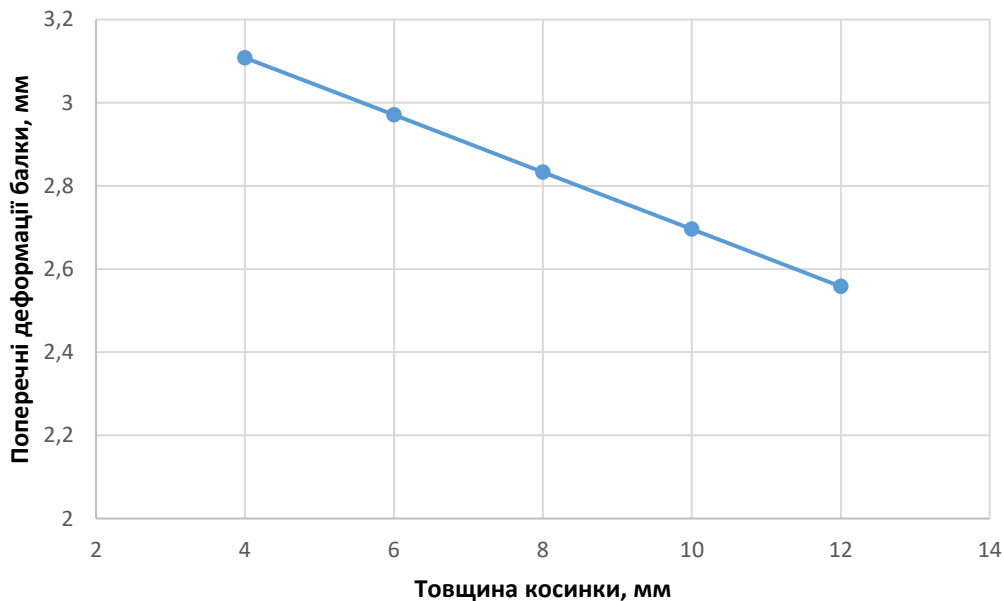


Рисунок 2.10 – Залежність поперечних деформацій балки від товщини косин

Вплив відстані між косинками характеризує крива на рис. 2.11.

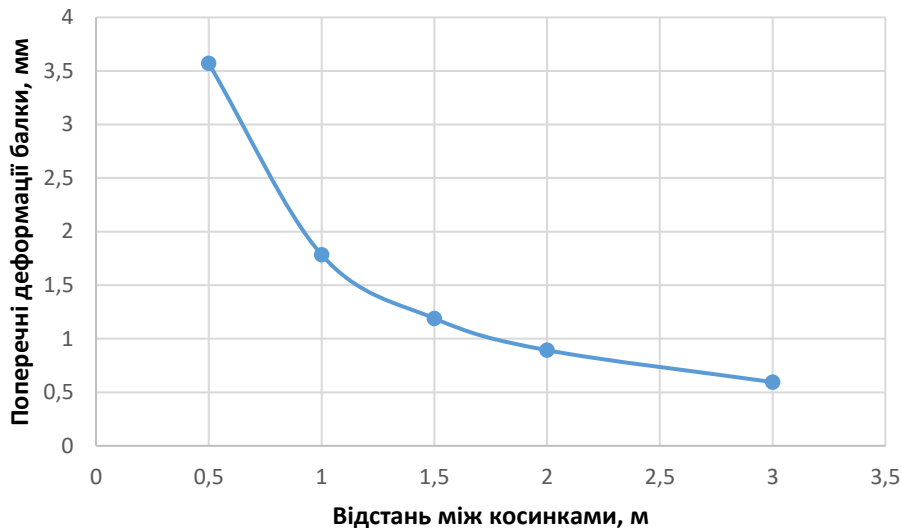


Рисунок 2.11 – Залежність поперечних деформацій балки від відстані між косинками (їх кількості)

Аналізуючи рис. 2.11 робимо висновок, що зі зменшенням відстані між косинками та збільшення їх кількості значення деформацій зростає. Якщо кількість косинок стає більшою 2 на 1 метр, значення поперечних деформацій зростає інтенсивніше.

2.3.3. Кутові деформації у зварних конструкціях

Для аналізу кутових деформацій у зварній конструкції балки розглянемо випадок приварювання ребра балки висотою $h = 200$ мм і товщиною $t_p = 6$ мм до пластини балки шириною $a = 400$ мм і товщиною $t_n = 8$ мм. Деталі виконані зі сталі Ст 3 і приварюються кутовим швом Т1 (див. рис. 2.12) з катет шва шва $k = 5$ мм. Погонна енергія процесу зварювання становитиме $q_n = 10000$ Дж/см.

Після виконання кутового зварного шва в конструкції буде виникати поворот ребра балки відносно її пластини на кут β_0 , який дорівнює приблизно 0,02 рад під дією рахунок поперечного вкорочення наплавленого металу шва. Крім того в конструкції буде виникати кутовий злом пластини балки з утворенням грибоподібної деформації. Причиною такого злomu є нерівномірне

нагрівання елементів конструкції по товщині. Характер можливої деформації показано на рис. 2.13.

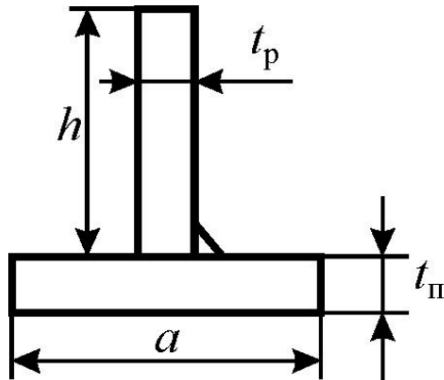


Рисунок 2.12 – Схема таврового зварного з'єднання

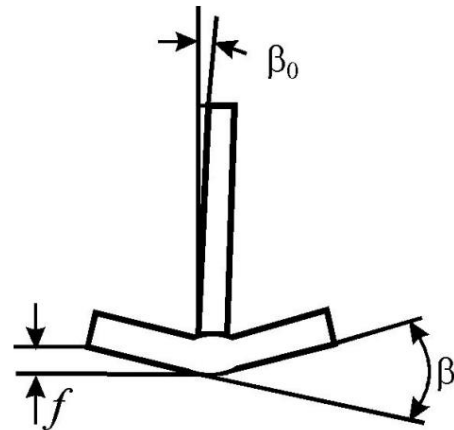


Рисунок 2.13 - Форма кутових деформацій таврового з'єднання

Основними чинниками, які впливають на кутовий злам, є погонна енергія процесу зварювання q_n , товщина пластини балки t_n і співвідношення товщин ребра t_p та пластини t_n . Ці розміри визначають частку енергії, яка витрачається на нагрівання листа.

$$q_{п.п} = \frac{2t_n}{t_p + 2t_n} q_n \quad (2.30)$$

Кут повороту ребра балки відносно пластини зумовлена трикутною формою перерізу наплавленого металу і не залежить від катета шва. Кутовий злом зміниться, коли зі збільшенням катета збільшується погонна енергія, а отже буде збільшуватися глибина прогрівання.

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 розміри ребра і пластини можна визначити частку погонної енергії, що йде на нагрів:

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

Питома енергія прогрівання пластини

$$\frac{q_{п.п}}{t^2} = \frac{77270}{0,8^2} = 11400 \text{ Дж/см}^3 \quad (2.31)$$

Ширина прогрівання рівна:

$$b = 1,7 \cdot k = 1,7 \cdot 0,5 = 0,85 \text{ см}, \quad (2.32)$$

Відносна ширина прогрівання:

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

З рис. 2.14 знайдемо кут зламу $\beta = 0,017$ рад.

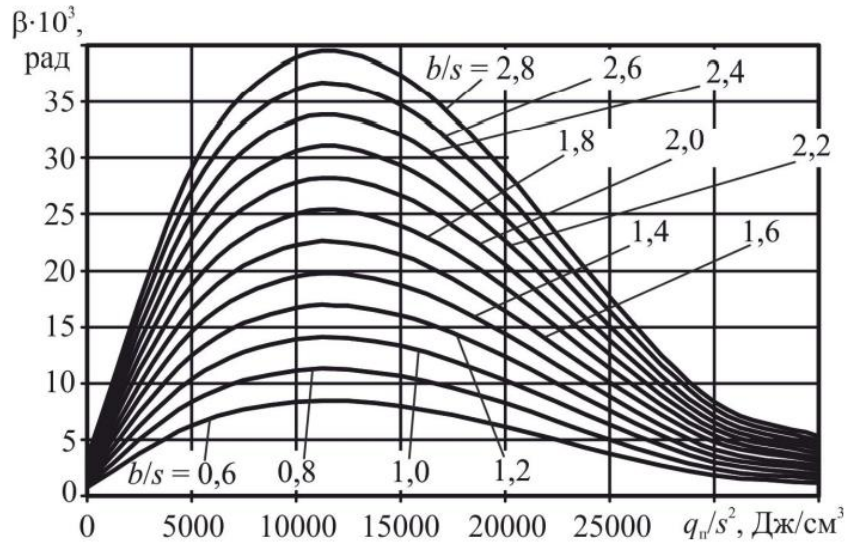


Рисунок 2.14 - Залежність кутових деформацій від питомої погонної енергії

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

Максимальне відхилення кінця кромки пояса від площини становитиме:

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

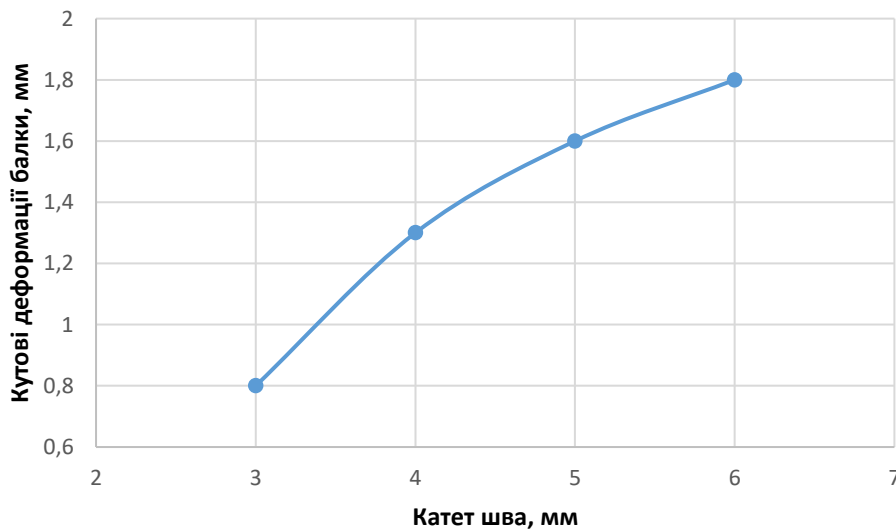


Рисунок 2.15 - Залежність кутових деформацій від катета зварного шва

З рис. 2.15 можна зробити висновок, що як і в інших випадках збільшення катета шва призводить до зростання кутових деформацій.

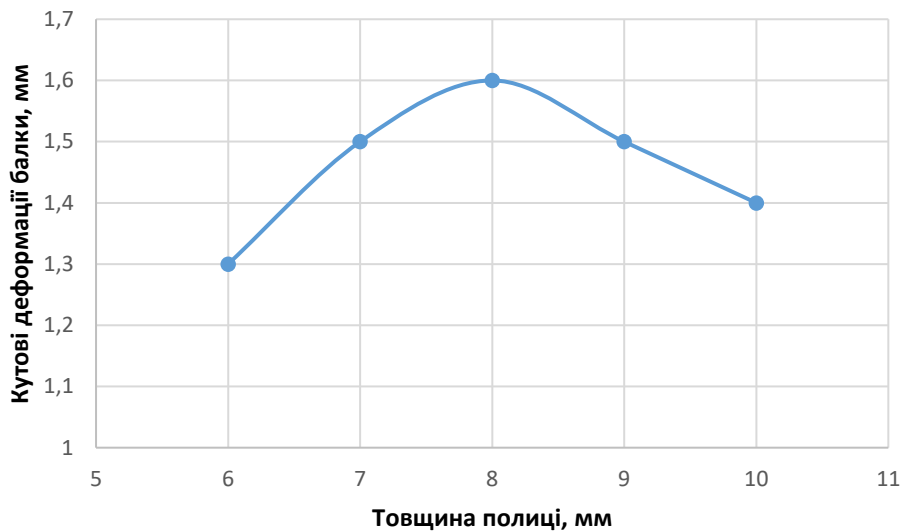


Рисунок 2.16 - Залежність поперечних деформацій в кутовому з'єднанні від товщини полиці

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

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

3. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Програма експериментальних досліджень

Програма експериментальних досліджень процесу автоматичного зварювання металоконструкцій в середовищі захисних газів складена з метою визначення оптимальних режимів технологічного процесу і передбачає виконання наступних завдань:

- Проаналізувати технології автоматичного зварювання металоконструкцій;
- Визначити основні технологічні параметри процесу автоматичного зварювання в середовищі захисних газів;
- Проаналізувати основні види теплових деформацій, які можуть виникати в процесі електродугового зварювання металів;
- Підібрати необхідне обладнання та розробити експериментальну установку.
- Виконати зварювання зразків стикових, напусккових та таврових швів на різних режимах роботи обладнання;
- Оцінити вплив режимів автоматичного зварювання на деформацію деталей;
- Обґрунтувати оптимальний режим технологічного процесу автоматичного зварювання.

Експериментальні дослідження будуть проводитись з використанням зварювального обладнання фірми Fronius, яке дозволяє виконувати процеси стандартного зварювання MIG/MAG в режимі Synergic, імпульсно-дугового MIG/MAG зварювання в режимі Synchro Pulse та зварювання в режимі CMT (Cold Metal Transfer / холодне перенесення металу).

Стандартне зварювання MIG/MAG з режимом Synergic - це процес зварювання MIG/MAG у всьому діапазоні потужностей джерела струму з використанням наступних типів дуги:

- Коротка дуга - відрив краплі відбувається під час короткого замикання при низькій потужності.
- Перехідна дуга - крапля збільшується в розмірі на кінці електродного дроту і переноситься при середній потужності під час короткого замикання.
- Крапельна дуга - перенесення матеріалу без короткого замикання при високій потужності.

Функція Synchro Pulse доступна для всіх процесів (стандартний / імпульсний / LSC / PMC).

Шляхом циклічної зміни потужності зварювання між двома робочими струмами функція Synchro Pulse забезпечує лускатий шов і переривчастий тепловий вплив.

Режим СМТ - це процес зварювання з низьким тепловим впливом. При зварюванні з кроком циклу СМТ процес циклічно призупиняється, причому час інтервалів можна регулювати. Завдяки цим інтервалам під час зварювання знижується тепловий вплив; цілісність зварювального шва не порушується. Тривалість циклів СМТ можна налаштувати окремо. Розмір точок зварювання СМТ визначається кількістю циклів СМТ.

Оптимізація процесу полягатиме у визначенні максимальної продуктивності (швидкості) зварювання, за якої за визначених параметрів процесу (зварювального струму) деформація деталей буде мінімальною, а якість зварювання - максимальною.

3.2. Обладнання для експериментальних досліджень

3.2.1. Характеристика зварювального апарата

Зварювальний апарат Trans Puls Synergic (TPS) 2700, це цифрове джерело струму інверторного типу.

Його модульна конструкція та наявні системні додатки від виробника забезпечують можливість його застосування та можливість налаштування на виконання робіт у будь-яких умовах [28, 32].



Рисунок 3.1 - Джерело живлення Trans Puls Synergic 2700

Апарат Trans Puls Synergic 2700 з вбудованим 4-роликівим механізмом подачі електродного дроту. Завдяки компактній конструкції він чудово підходить для мобільного виконання робіт та автоматичних процесів зварювання.

Даний зварювальний апарат підтримує кілька процесів зварювання:

- Зварювання MIG/MAG;
- Зварювання WIG з контактним запалюванням (крім джерел струму CMT);
- Зварювання стрижневим електродом.

Джерело струму керується центральним блоком керування. У процесі зварювання апарат збирає фактичні дані процесу та негайно реагує на виявлені зміни. Керуючі алгоритми дозволяють підтримувати високу точність зварювання, точне відтворення завдань, чудові зварювальні характеристики.

Зварювальний апарат TPS 2700 застосовуються на різних підприємствах для ручного та автоматизованого зварювання конструкційної сталі, оцинкованих металевих листів, хромонікелевих сплавів та алюмінію.

Завдяки вбудованому механізму подачі дроту, високій продуктивності та компактності апарат чудово підходить для мобільного виконання робіт на будівельних майданчиках та в ремонтних майстернях.

Для професійної обробки різних матеріалів потрібні відповідні програми зварювання. Цій вимозі відповідають спеціальні моделі цифрових джерел струму: найважливіші зварювальні програми доступні безпосередньо з панелі керування апарату. Крім того, у таких джерелах струму реалізовані також серійні функції, які допомагають оператору виконувати зварювання різноманітних матеріалів [30, 31].

Моделі для зварювання алюмінію

Такі джерела струму призначені для якісного та ощадного зварювання виробів з алюмінію. Спеціальні програми зварювання забезпечують професійну обробку алюмінію. Моделі для зварювання алюмінію серійно підтримують такі функції:

- Спеціальні програми для зварювання алюмінію
- Функція Synchro Puls

Моделі для зварювання хромонікелевих сплавів

Такі джерела струму призначені для якісного та ощадного зварювання виробів із хромонікелевих сплавів. Спеціальні програми зварювання забезпечують професійне оброблення високосортної сталі. Моделі для зварювання хромонікелевих сплавів серійно підтримують такі функції:

- Спеціальні програми для зварювання хромонікелевих сплавів
- Функція Synchro Puls
- Функція TIG-Comfort-Stop
- Підключення зварювального пальника WIG
- Електромагнітний газовий клапан

Моделі СМТ

Поряд із стандартними методами зварювання, моделі СМТ підтримують процес зварювання СМТ (Cold Metal Transfer - спеціальне MIG зварювання короткою дугою). Особливістю цього процесу є мінімальне вкладення тепла та керований перехід розплавленого металу під впливом низького струму. Метод СМТ може використовуватися для:

- MIG паяння практично без бризок
- зварювання тонкої листової сталі із незначною деформацією
- з'єднання сталі та алюмінію методом зварювання-паяння.

Моделі Yard

Моделі джерел струму Yard спеціально призначені для використання на суднобудівних верфях та для робіт у відкритому морі. Зварювальні програми в основному використовуються для сталі і хромонікелевих сплавів з масивним та порошковим дротом.

Моделі Steel Edition

Моделі джерел струму Steel Edition спеціально призначені для використання у сталеливарній галузі. На панелі керування можна встановити спеціальні графічні характеристики для стандартною та імпульсної зварювальної дуги.

3.2.2. Характеристика зварювальної колони

Зварювальна колона APS призначена для лінійного переміщення пальника зварювального автомата відносно зони зварювання (накладання зварного шва). Дана колона є консольного типу з можливістю підймання консолі на висоту 1730 мм та повороту її на 360°. Консоль колони встановлена на вертикальні стійці і підіймається за допомогою однофазного електродвигуна через гвинтову передачу. В нижній частині стійки розміщено чотирилапу опору та механізм повороту з фіксатором. Поворот колони виконується вручну, а в необхідному положенні вона фіксується затискним гальмом.

Геометричні параметри зварювальної колони наведені на рис. 3.2.

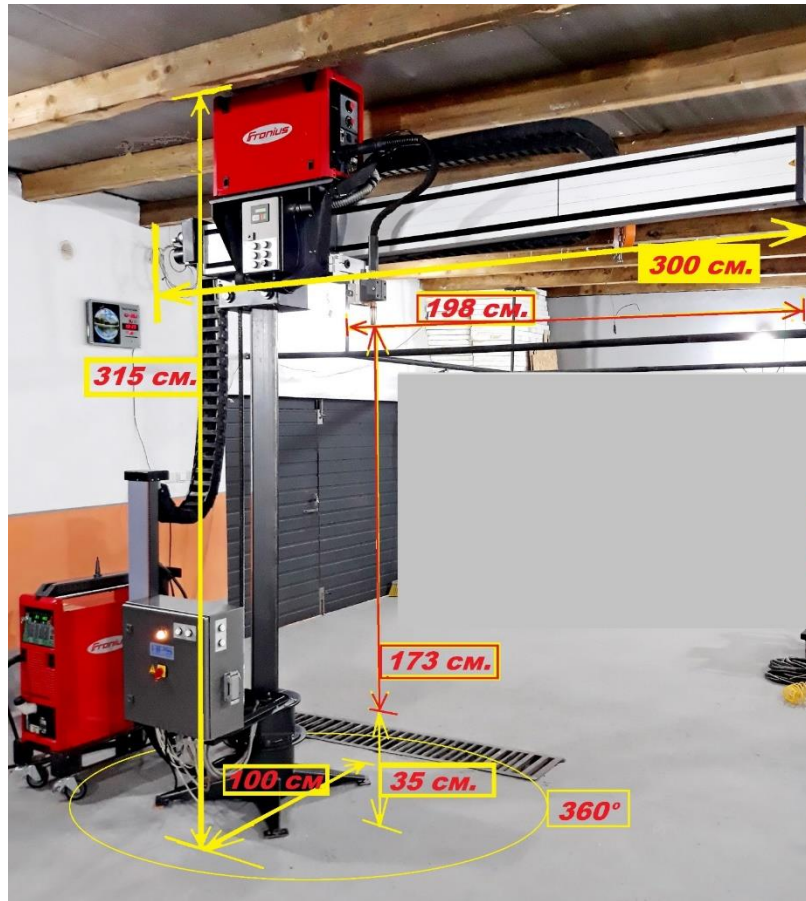


Рисунок 3.2 – Зварювальна колона для автоматичного зварювання

В нижній частині колони розміщення електрошафа керування з мікроконтролерами, роз'ємами для підключення джерела зварювального апарата та спеціального пальника Pull Mig CMT через кабель LHSB від приводного модуля CMT (LHSB = Local Net High-Speed Bus) та кнопками керування переміщенням консолі та каретки.



Рисунок 3.3 - Електрошафа керування зварювальною колоною

- 1 – вмикач живлення;
- 2 – кнопки керування переміщенням консолі та каретки;
- 3 – роз'єм для підключення джерела зварювального апарата;
- 4 – сигнальна лампа

На консолі колони змонтована пересувна каретка з можливістю переміщення на 3000 мм. На каретці встановлюється подавальний механізм зварювального півавтомата та монтується зварювальний пальник. Також на каретці встановлений пульт керування зварювальною колоною з цифровим табло. Привід каретка бере від крокових електродвигунів через блок циліндричних шестерень та гвинтову пару. В крайніх точках консолі розміщені кінцевики виключення живлення двигуна приводу, які обмежують переміщення каретки по консолі. Такі ж кінцевики встановлені по краях вертикальної стійки колони.



Рисунок 3.4 - Пульт керування зварювальною колоною на консолі

На панелі керування, розташованій на консолі, крім електронного табло розміщені кнопки переміщення (Links назви; Rechts; Auf; Ad), регулятор швидкості переміщення, кнопка запуску процесу зварювання та кнопки роботи з меню (вибір режимів, параметрів, довжини шва тощо).

Для керування колоною використовуються наступні команди:

Shweben – зварювання;

Fahrstreke – відстань (довжина шва);

Storverz.li – затримка вліво;

Storverz.re – затримка вправо;

Entkraterfu – заварювання кратера;

Lichtb. Wacht – підсвітка;

Langsnohtbe – повздовжній шов (автоматичне переміщення зі зварюванням).

Зміна швидкості переміщення каретки виконується шляхом обертання регулятора на панелі керування.

3.2.3. Характеристика зварювального пальника

Зварювальний пальник призначений як для ручного механізованого зварювання в середовищі захисних газів, так і для автоматизованого зварювання з можливістю реалізації процесу СМТ зварювання та наплавлення.



Рисунок 3.5 - Загальний вигляд пальника Pull MIG

Пальник складається з фланцевого мотор-редуктора, додаткового механізму протяжки дроту і муфти з горловиною пальника. В корпусі пальника вбудований регулювальний потенціометр корекції, курок пальника і пристрій для зняття натягу шлангового пакета [33].

Двигун пальника Fronius Pull Mig призначений для приводу механізму подачі дроту. Зусилля притискання подаючого ролика механізму подачі встановлюється нижчим, що дозволяє роликам зісковзувати у разі несправності.

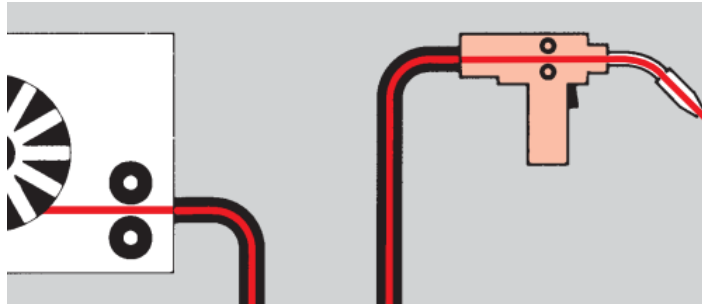


Рисунок 3.6 - Схема роботи пальника Fronius Pull Mig

Прозоре розсунне віконце забезпечує легкий доступ до приводу. Така конструкція пальника розроблена спеціально для використання у складних зварювальних автоматах та роботах. Також пальник оснащений системою охолодження, яка з'єднується з системою охолодження джерела живлення.



Рисунок 3.7 - Демпферний пристрій шлангового пакета Pull Mig Job Master

В його конструкції також інтегрований пульт дистанційного керування зварювальним апаратом для плавне регулювання потужності зварювання. З основним механізмом подачі дроту він з'єднується шланговим пакетом Pull Mig Job Master з демпферним пристроєм.

3.3. Методика експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження процесу автоматичного зварювання металоконструкцій в середовищі захисного газу виконуються для визначення

впливу режиму зварювання на продуктивність процесу та величину деформації деталей.

Регульованими параметрами процесу автоматизованого зварювання були:

- зварювальний струм $I_{зв}$, А;
- режим зварювання;
- швидкість зварювання $V_{зв}$, м/хв. (швидкість переміщення 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 експериментальної установки для вимірювання деформації деталей при зварюванні наведено на рис. 3.8.

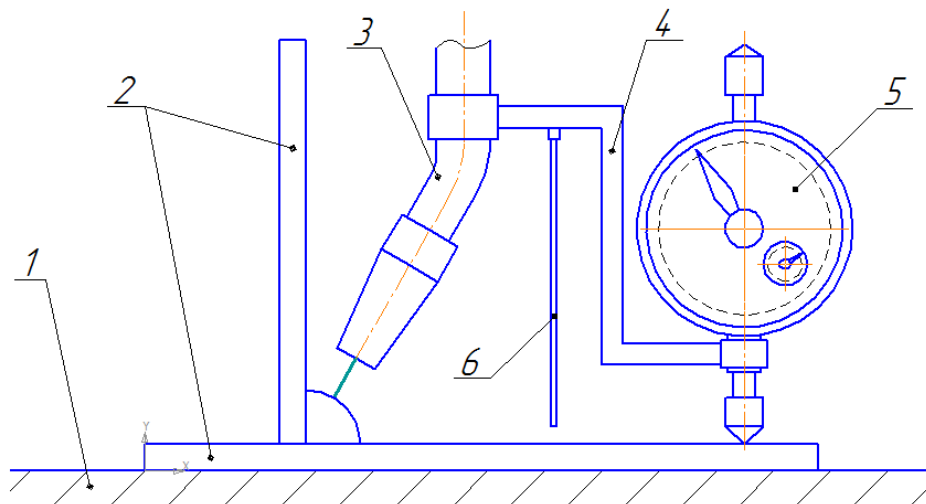


Рисунок 3.8 – Схема експериментальної установки

1 – стіл; 2 – деталі; 3 – зварювальний пальник; 4 – водило; 5 – індикатор годинникового типу; 6 – екран

Вимірювання деформацій виконували в два етапи: під час зварювання (поточні) та після завершення даного процесу (кінцеві). Для вимірювання

деформацій використовували індикатор годинникового типу, який був з'єднаний зі зварювальним пальником зварювального автомата і мав можливість переміщуватися разом з ним. Фіксування поточних та кінцевих значень деформації, які відображались на циферблаті індикатора виконували впродовж усього процесу зварювання шляхом спостереження за допомогою відеокамери (рис. 3.9).



Рисунок 3.9 – Загальний вигляд дослідної установки

Суть експерименту полягала в наступному.

На джерелі живлення зварювального автомата вибирався відповідний режим зварювання (MIG/MAG Synergic; MIG/MAG Synchro Pulse; CMT (Cold Metal Transfer) та задавались відповідні значення зварювального струму.

На пульті керування зварювальною колоною задавали швидкість переміщення пальника (швидкість зварювання). Далі вмикали запис камери спостереження і запускали холосте переміщення пальника на задану довжину зварного шва. Таким чином визначали можливі відхилення від прямолінійності

руху системи. Це було потрібно для виявлення випадкових відхилень під час визначення деформацій.

Після повернення системи у вихідне положення знову запускали запис і вмикали процес зварювання. Після згасання дуги запис зупиняли і давали шву охолонути протягом 10 хв. Далі знову вмикали запис і повертали систему у вихідне положення одночасно фіксуючи залишкові (кінцеві) деформації деталі.

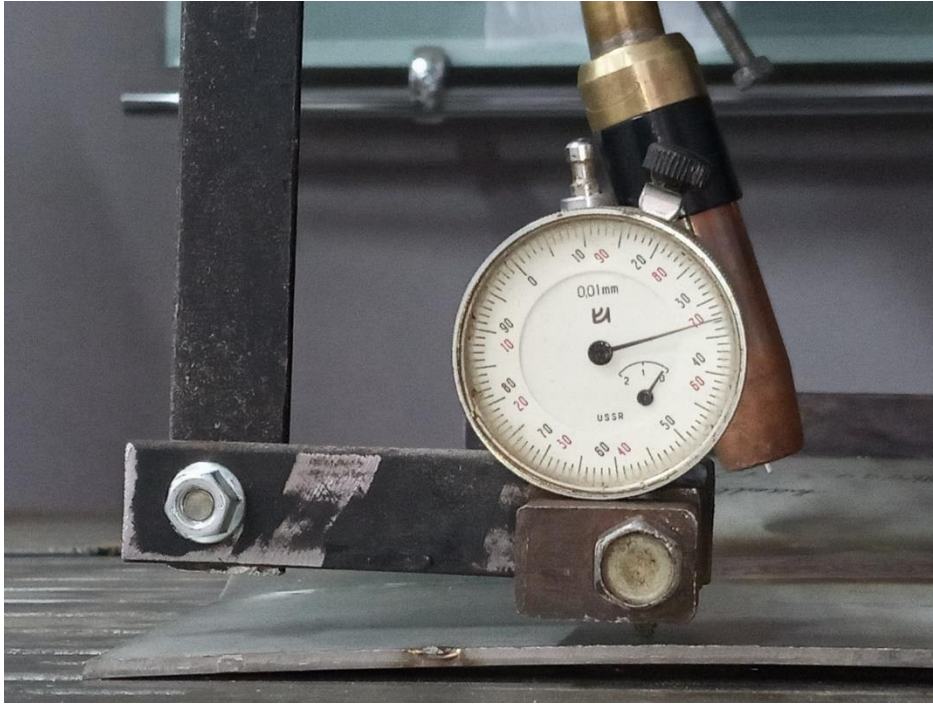


Рисунок 3.10 – Вимірювання поточних та кінцевих деформацій

Зварювання виконували зварювальним дротом Св-0,8 діаметром 1,0 мм в середовищі суміші газів 80 % Ar + 20 % CO₂.

План експериментальних досліджень наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – План експериментальних досліджень

Режим зварювання	Струм зварювання $I_{зв}$, А	Швидкість зварювання $V_{зв}$, м/хв	Деформація деталі f , мм	Дефекти зварного шва
Synergic	80...180	1,0...3,0		
Synchro Pulse				
CMT				

Контроль якості зварного шва виконували за методиками, викладеними в наступному пункті.

За оптимальний режим зварювання буде прийматися той, при якому будуть забезпечені максимальна швидкість зварювання, мінімальна деформація деталей та максимальна якість зварного шва.

3.4. Контроль процесу зварювання

Контроль процесу зварювання може включати такі етапи [10]:

- візуальне спостереження за перебігом процесу плавлення металу і формування зварного шва;
- контроль стабільності технологічних параметрів процесу;
- контроль забезпечення працездатності устаткування.

При електро-дуговому зварюванні стійкість горіння дуги і стабільність захисту від окислення.

Зовнішній вигляд зварного шва характеризує правильність режиму зварювання, тому постійний контроль за режимом зварювання по показниках контрольовано-вимірювальних приладів і візуальні спостереження за процесом дозволяють оперативно реагувати на можливі відхилення і багато в чому забезпечують якість зварних з'єднань.

Під час зварювання відповідальних конструкцій використовують системи автоматичного керування і регулювання параметрів режиму за допомогою датчиків автоматичного контролю, вбудованих у зварювальне устаткування. У деяких випадках ведуть безперервний запис параметрів.

При двосторонньому зварюванні та зварюванні товстостінних конструкцій обов'язковим є контроль виконання першого (кореневого) шва. Контролюють також порядок накладання і кількість шарів, стан поверхні кожного шару, якість зачищення попереднього шва, час перерв між проходами, послідовність виконання зварних швів тощо.

При двосторонньому зварюванні алюмінієвих сплавів перед накладенням другого шва зі зворотної сторони корінь першого шва вирубують або фрезерують і потім ведуть контроль вибірки.

Під час контролю складних конструкцій необхідно звертати увагу на дотримання послідовності і режимів виготовлення конструкцій, оскільки якісне виконання зварних з'єднань на вузлах або підвузлах не гарантує якості конструкції в цілому.

4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1. Аналіз теплових деформацій деталей після зварювання

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

- повздовжня (рис. 4.1,а);
- кутова (рис. 4.1,б);
- поперечна (рис. 4.2).



а)

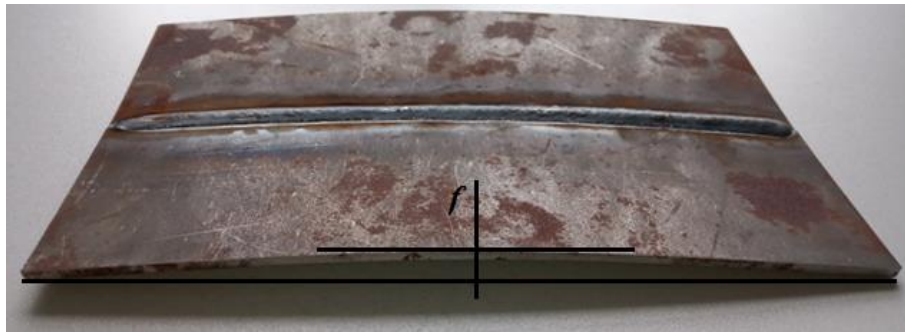


б)

Рисунок 4.1 – Зварні деталі, деформовані після зварювання



Рисунок 4.2 – Зразок деформованих деталей таврового зварного з'єднання



а)



б)



в)

Рисунок 4.3 – Основні види деформацій

а) повздовжня;

б) кутова;

в) поперечна

4.2. Результати експериментальних досліджень поточних деформацій деталей

Результати експериментальних вимірювань поточних деформацій деталей під час їх автоматичного зварювання на різних режимах наведені в таблиці (Дод. Б).

Для зручності аналізу результати, наведені в табл. (Дод. Б) відображаємо графічними залежностями (рис. 4.4 - 4.6).

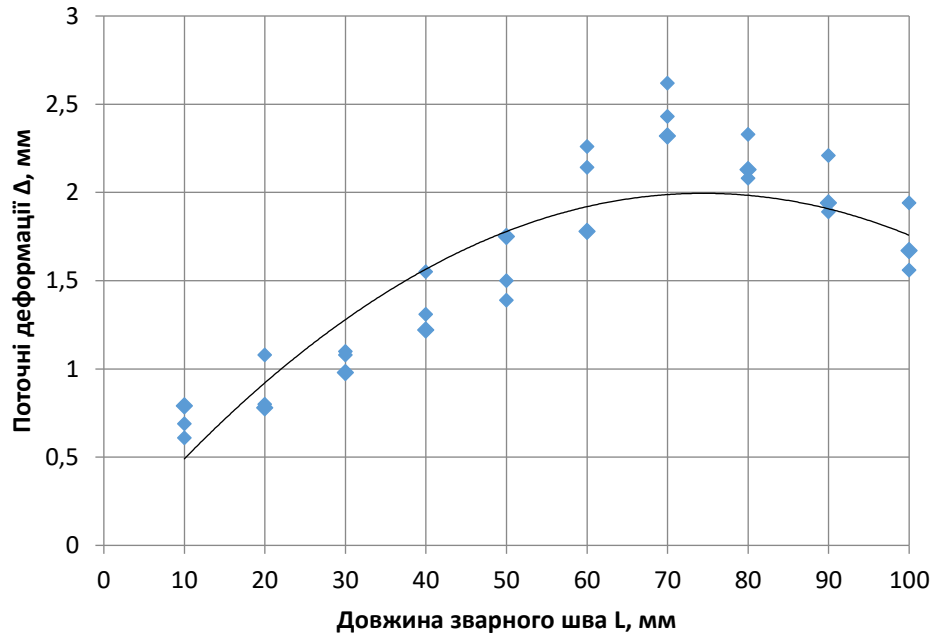


Рисунок 4.4 – Крива зміни поточних деформацій деталі в процесі зварювання в режимі Synergic

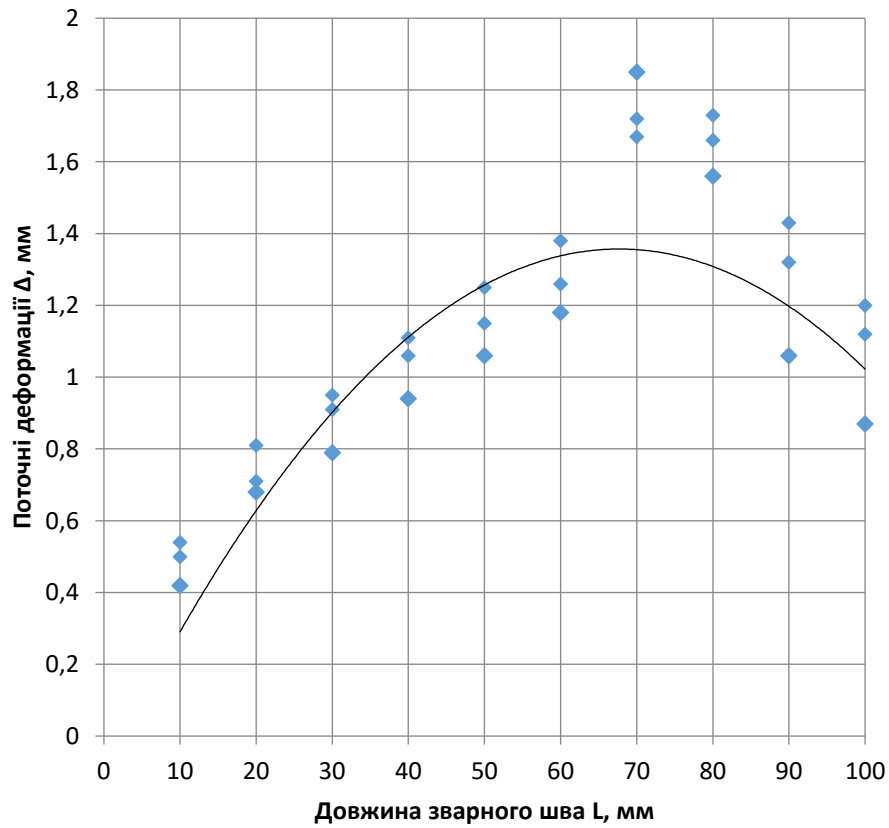


Рисунок 4.5 – Крива зміни поточних деформацій деталі в процесі зварювання в режимі Synchro Pulse

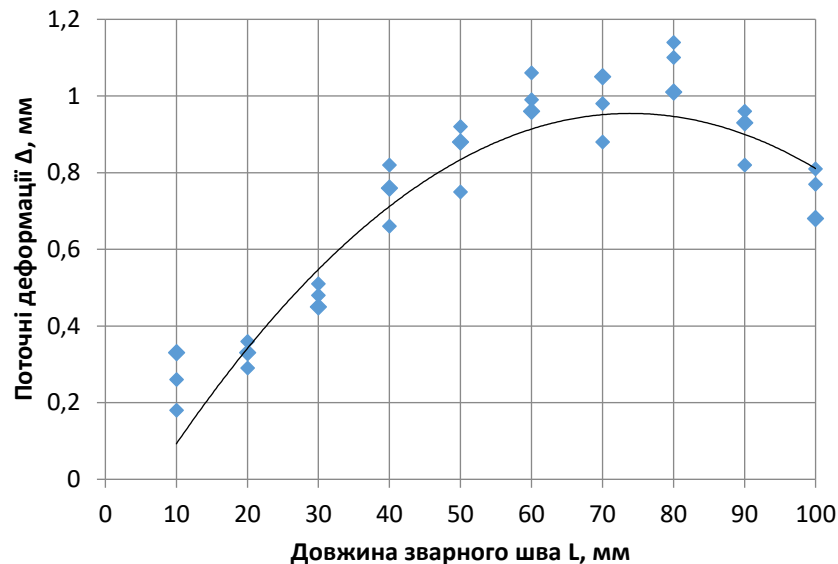


Рисунок 4.6 – Крива зміни поточних деформацій деталі в процесі зварювання в режимі СМТ

З отриманих результатів досліджень, які відображені кривими на рис. ... бачимо, що максимальні значення поточних деформацій деталі більш інтенсивно проявляються після виконання половини довжини зварного шва, а саме на відстані 60...80 мм. Саме в цій зоні вони набувають своїх максимальних значень. Так для режиму зварювання Synergic максимальні значення деформацій досягали $\Delta = 2-2,5$ мм. Під час зварювання в режимі Synchro Pulse максимальні значення поперечних деформацій досягали значення $\Delta = 1,6-1,8$ мм, а під час зварювання в режимі СМТ максимальні деформування деталі, зафіксовані індикаторним вимірюючим пристроєм коливались в межах $\Delta = 1$ мм.

В результаті досліджень встановлено, що максимальне деформування деталей зварної конструкції спостерігаються під час зварювання в режимі Synergic, а мінімальні - в режимі СМТ (холодного перенесення металу).

Також слід зауважити, що в кінці зварного шва теплові деформації знову зменшувались. Це можна пояснити тим, що джерело зварювального автомата TPS 2700 має можливість налаштування функції заварювання кратера в кінці шва на струмах 35...50 % від струму зварювання, а отже зменшення інтенсивності нагріву деталей.

Результати досліджень впливу величини струму зварювання відображають криві, представлені на рис. 4.7.

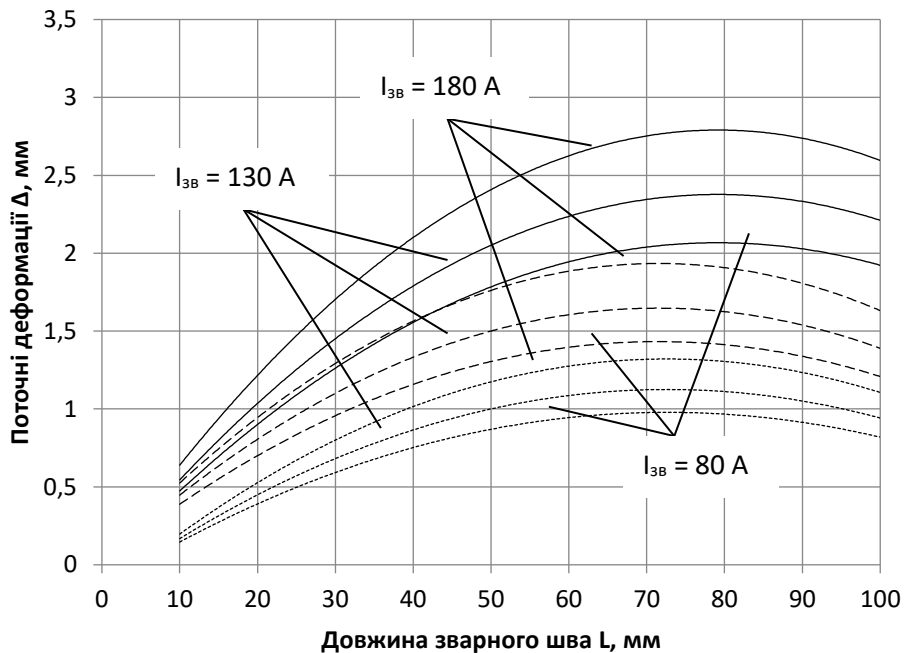


Рисунок 4.7 – Криві залежності поточних деформацій деталі від величини струму зварювання

----- - режим Synergic; - - - - - режим Synchro Pulse; · · · · · - режим СМТ

Аналізуючи рис. можна стверджувати, що при збільшенні зварювального струму величина поточних деформацій деталей під час автоматичного зварювання зростають для всіх досліджуваних режимів зварювання. Найбільше це проявляється при зварюванні в режимі Synergic, а найменше - в режимі СМТ.

Так при збільшенні струму зварювання приблизно в два рази поточні деформації деталей зростають на 50...80 %.

4.3. Результати експериментальних досліджень залишкових деформацій деталей

Результати експериментальних вимірювань залишкових деформацій деталей під час їх автоматичного зварювання на різних режимах наведені в таблиці (Дод. В).

Для зручності аналізу результати, наведені в табл. (дод. В) відображаємо графічними залежностями (рис. 4.8 – 4.10).

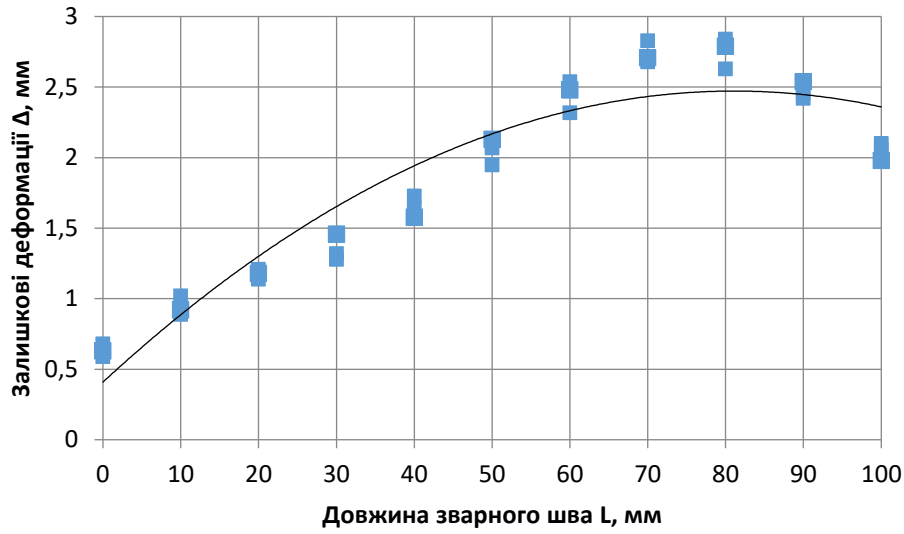


Рисунок 4.8 – Крива зміни залишкових деформацій деталі в процесі зварювання в режимі Synergic

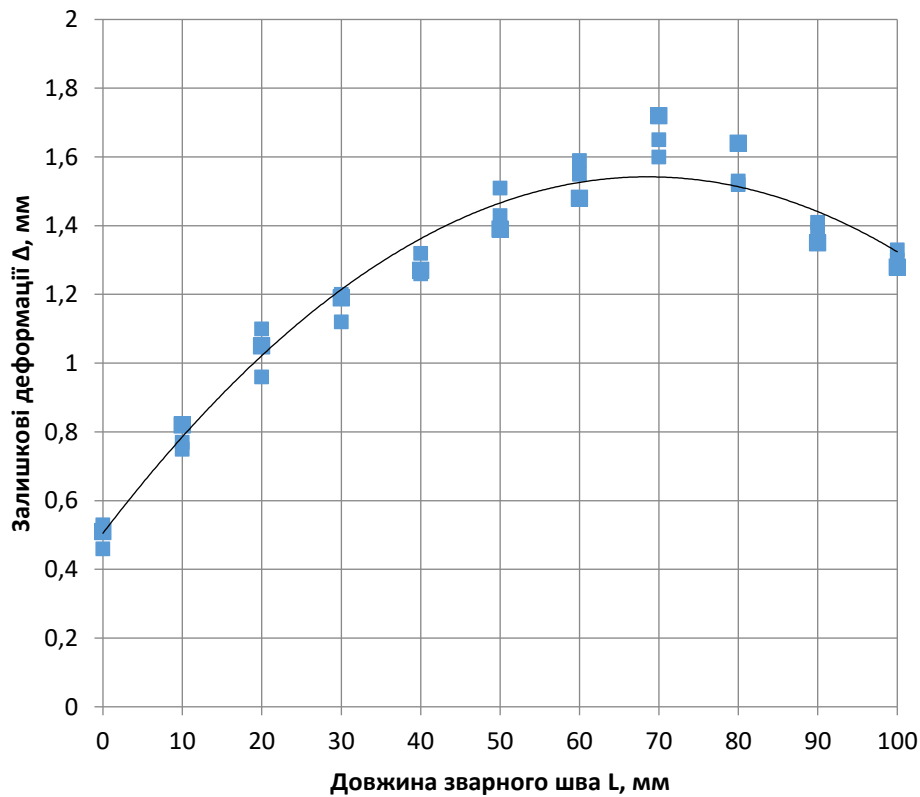


Рисунок 4.9 – Крива зміни залишкових деформацій деталі в процесі зварювання в режимі Synchron Pulse

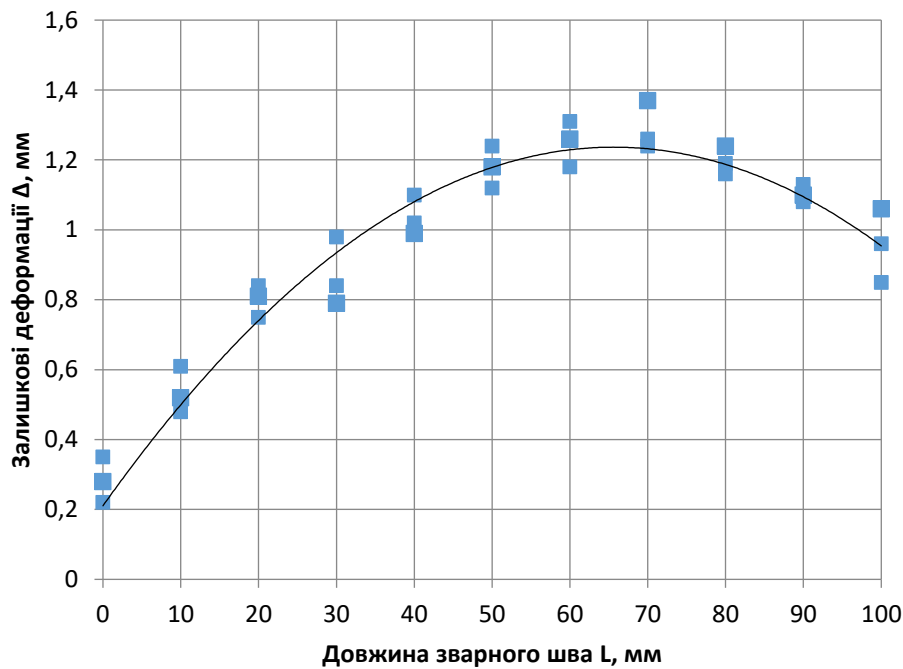


Рисунок 4.10 – Крива зміни залишкових деформацій деталі в процесі зварювання в режимі СМТ

Аналізуючи результати дослідження залишкових деформацій деталей після різних режимів автоматичного зварювання в середовищі захисних газів можна зробити наступні висновки:

- в порівнянні з поточними деформаціями залишкові деформації мають більші значення;
- залишкові деформації проявляються на більшій частині зварного шва;
- залишкові деформації є більшими за поточні на 15...20 %, в залежності від режиму зварювання;
- експериментальні дослідження підтверджують теорію теплових деформацій деталей під час їх електродугового зварювання, а саме напрямком деформацій (зміною форми деталей) та впливом параметрів процесу.

Дослідження впливу швидкості зварювання на проявлення теплових деформацій деталей виконували після повного остигання зварної конструкції дослідних зразків за залишковими деформаціями.

Результати досліджень впливу швидкості зварювання (швидкості переміщення зварювального пальника колоною) відображають криві, представлені на рис. 4.11.

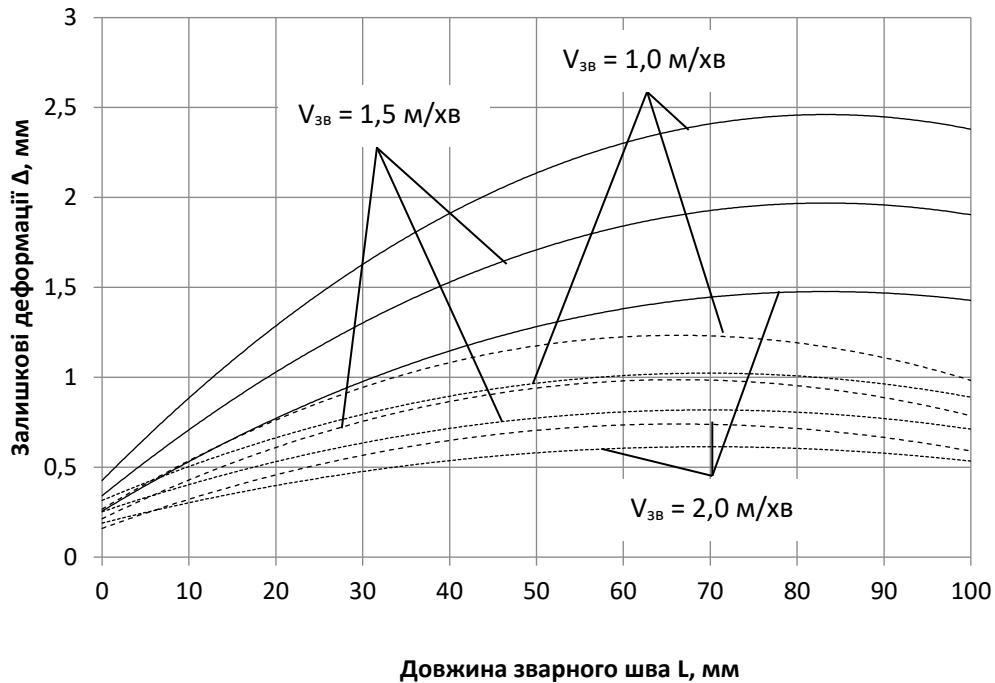


Рисунок 4.11 – Криві залежності залишкових деформацій деталі від швидкості зварювання

----- - режим Synergic; - - - - - режим Synchro Pulse; ····· - режим СМТ

З аналізу кривих, представлених на рис. бачимо, що характер впливу швидкості зварювання (швидкості переміщення пальника) на деформацію зварних деталей є подібним до характеру впливу зварювального струму. Так при збільшенні швидкості зварювання значення деформацій деталей зменшувались. Найбільший вплив швидкості зварювання проявлявся для режиму зварювання Synergic.

Також для даного режиму зварювання характерними є максимальні значення деформацій в кінці зварного шва. На відміну від нього, в режимах Synchro Pulse і СМТ максимальні значення деформацій проявляються по середині зварного шва.

5. ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1. Санітарно-гігієнічні характеристики зварювального виробництва

Потужне ультразвукове або світлове випромінювання зварювальної дуги впливаючи на очі працівника може призвести до запального захворювання очного яблука (електроофтальмія), а при тривалому впливі - до ураження сітківки очей (кон'юнктивіт). Інфрачервоні короткохвильові промені можуть викликати хронічне захворювання - помутніння кришталика ока (катаракта). Шкідливі впливи променів зварювальної дуги на органи зору можуть чинити вплив в радіусі до 10 метрів [23].

Шкіру захищають звичайним робочим одягом, лице і частина шиї - щитком або шоломом. Очі захищаються спеціальними темними скельцями - світлофільтрами, які вставляють в щиток або шолом. Ці скельця зовсім не пропускають ультрафіолетові промені, а інфрачервоні пропускають в межах від 0,1 до 4%, що не чинить шкідливого впливу на зір зварювальника.

При захворюванні очей від світлової радіації, необхідно негайно звернутися до лікаря, а при неможливості отримання швидкої медичної допомоги слід робити примочки очей слабким розчином питної соди.

Крім опіків променями електричної дуги, зварника можуть бути заповдіані опіки бризками розплавленого металу. Щоб уникнути опіків, необхідно надягати робочий одяг з щільної брезентової матерії. Одяг не повинна мати складок. Штани треба носити тільки на випуск, щоб вони закривали черевики. Щоб запобігти пропалювання спецодягу бризками розплавленого металу, тканина просочується спеціальними речовинами, які підвищують її вогнестійкість.

Під час виконання зварювальних робіт в результаті вигорання обмазки електрода і елементів легування підвищується загазованість робочого місця. Для запобігання цьому необхідно встановлювати пристрої витяжної вентиляції в зоні дихання зварника. Викидати повітря потрібно за межі робочих зон. Для видалення газів і пилу застосовується як місцева вентиляція робочого місця, так

і припливно-витяжна вентиляція всього приміщення. Припливне повітря повинне надходити розсіяно в робочу зону приміщень, в основному на незварювальні ділянки, а також там, де витяжна вентиляція здійснюється за допомогою місцевих відсмоктувачів. Швидкість руху повітря, на робочих місцях повинна бути не більше 0,3 м/с [23].

Для знежирення металу і зварювальних матеріалів від мастильних забруднень не слід застосовувати трихлоретилен, дихлоретан та інші хлоровані вуглеводні, так як при з'єднанні їх з озоном, присутнім в атмосфері під час дугового зварювання, може утворюватися задушливий газ (фосген).

5.2. Електробезпека під час зварювального виробництва

Причини і практичні умови виникнення електроуражень, незважаючи на їх значну кількість, можна об'єднати в наступні 5 груп:

- дотик до оголених струмоведучих частин, які знаходяться під напругою. При цьому слід відрізняти провідну частину електроустановки від її струмоведучих частини;
- дотик до корпусів електрообладнання і конструктивно пов'язаних з ними металевих предметів і споруд, які нормально не перебувають під напругою, але можуть опинитися під її впливом внаслідок пошкодження ізоляції проводів (кабелів). Зазначені корпуси і металеві предмети відповідно з термінологією, прийнятою в ПУЕ, відносяться до відкритих провідних частин (ВПЧ);
- дотик до відключеного, але електрично зарядженого обладнання (до конденсаторів, кабелів тощо);
- знаходження в недопустимій близькості від місця замикання проводу (кабелю) на землю. Забороняється наближатися на відстань менше 8 м до обірваного проводу, який лежить на землі, щоб уникнути попадання під крокову напругу;
- всі ураження, пов'язані з дією електричної дуги і продуктів її згоряння, а також з впливом електричних і магнітних полів підвищеної напруженості.

Зварнику на своєму робочому місці доводиться працювати з обладнанням, що знаходиться під напругою 220 В і 380 В частотою 50 Гц, тому виникає небезпека ураження електричним струмом. У нашому випадку, це зварювальний апарат, КШМ, автомати для зварювання - все це становить потенційну загрозу для людини. Все обладнання повинно бути виконано відповідно до вимог ГОСТ 12.1.019-79 [16].

Основними умовами, які забезпечують усунення електротравм є:

- а) правильна будова електроустановок;
- б) навченість персоналу;
- в) дотримання правил з безпечного обслуговування електроустановок;
- г) нагляд за виконанням робіт в електроустановках.

Для запобігання ураження електричним струмом необхідно дотримуватися наступних правил техніки безпеки:

- необхідно надійно заземлювати корпуси джерел живлення і установок, а також виріб, який зварюється;
- заборонено торкатися голими руками (без діелектричних рукавичок) струмопровідних частин зварювальних установок, а також проводів без ізоляції або з пошкодженою ізоляцією;
- перед початком робіт необхідно перевіряти справність ізоляції зварювальних проводів, зварювального інструменту та обладнання, а також надійність всіх контактних з'єднань зварювального кола;
- при тривалих перервах джерело зварювального струму слід відключати;
- при прокладанні зварювальних проводів і при кожному їх переміщенні не допускати: пошкодження ізоляції, зіткнення проводів з водою, маслом, сталевими канатами, рукавами (шлангами) і трубопроводами з горючими газами і киснем, а також з гарячими трубопроводами;
- не можна ремонтувати зварювальне обладнання та установки, які знаходяться під напругою;

- зварювальник не повинен самостійно підключати джерело живлення зварювальної дуги до силової мережі, або проводити в ній ремонт, пов'язаний з роботою джерела живлення. Всі ці роботи виконують тільки електрики цехів.

Все електрообладнання зварювальних цехів і діляниць повинно відповідати «Правил будови електроустановок» (ПУЕ). Крім того, слід виконувати вказівки щодо експлуатації і безпечного обслуговування електрозварювальних установок [16]. Обслуговування електроустановок доручається особам, які пройшли медичний огляд і спеціальне навчання.

У разі ураження зварника електричним струмом необхідно терміново відключити струм найближчим вимикачем або відокремити потерпілого від струмопровідних частин, використовуючи сухі підручні матеріали (жердину, дошку тощо). Після цього покласти його на теплу підстилку і по можливості зігріти. негайно викликати медичну допомогу, враховуючи, що зволікання понад 5-6 хвилин може привести до непоправних наслідків. При несвідомому стані потерпілого слід звільнити від тісного одягу і негайно почати робити штучне дихання, також необхідно перебувати поруч з постраждалим до прибуття лікаря.

Приміщення з електробезпеки поділяються на 3 групи [23]:

1. Приміщення без підвищеної небезпеки (сухе, добре опалювальне, приміщення з струмонепровідними підлогами, з температурою 18-20 ° і вологістю 40-50%.
2. Приміщення з підвищеною небезпекою (де є одна з таких ознак: підвищена температура, вологість 70-80%, струмопровідні підлоги, металева підлога, наявність заземлення, великої кількості обладнання).
3. Приміщення особливо небезпечні, в яких є наявність двох ознак з другої групи або є в приміщенні їдкі або отруйні вибухонебезпечні речовини.

В нашому випадку приміщення для зварника відноситься до 2-гої групи електробезпеки, так як на виробництві є перераховані фактори небезпеки.

5.3. Пожежна безпека під час зварювання

Причиною виникнення пожеж в зварювальних цехах машинобудівних підприємств можуть бути:

- порушення технологічного режиму;
- несправність електрообладнання;
- іскри;
- несправність запірної арматури і відсутність заглушок на апаратах і трубопроводах;
- реконструкція установок з відхиленням від технологічних схем;
- самозаймання промасленого ганчір'я та інших легкозаймистих матеріалів.

Основи протипожежного захисту підприємств визначені стандартом ГОСТ 12.1.010-76 «Вибухобезпека. Загальні вимоги» [23].

Заходи з пожежної профілактики поділяються на організаційні, технічні, режимні та експлуатаційні. Пожежна безпека об'єкта регламентується, будівельними нормами і правилами, міжгалузевими правилами пожежної безпеки. Пожежна безпека може бути забезпечена заходами пожежної профілактики і активним пожежним захистом. Поняття профілактики включає в себе комплекс заходів, необхідних для запобігання пожежі або зменшення його наслідків. У зварювальному виробництві в цехах збірні конструкції виконують з негорючого і важкогорючого матеріалу. Приміщення в зварювальному виробництві відносяться до другого ступеня вогнестійкості споруд по категорії «Г» [16].

Для швидкої ліквідації пожежі нормами первинних засобів пожежогасіння зварювального цеху на кожні 200 м² передбачається один вогнегасник ОУ-2, ящик з піском місткістю 0,5 м³ і дві лопати. Пожежні крани та інші засоби пожежогасіння повинні бути у справному стані і перебувати в конкретних місцях.

5.4. Моделювання процесу формування і виникнення травмонебезпечної ситуації під час 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 автоматичного зварювання. У даному випадку може відбутися 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 вверх починаючи з базових подій і закінчуючи головною. Значення подій вказуємо безпосередньо на символи зображення події. Ймовірності виробничих подій визначаємо за даними виробництва. Наприклад, базова подія "охорона праці". Для визначення ймовірності ми повинні встановити наскільки (%) від ідеального рівня здійснюється відповідний контроль на об'єкт. Якщо буде встановлено, що такий рівень контролю становить 20 або 30%, то ймовірність відповідно становить 0,2 і 0,3. При відсутності контролю ймовірність "не здійснення контролю" становитиме 1, якщо контроль ідеальний, то відповідна ймовірність дорівнює 0. Для виконання математичних обчислень ймовірностей випадкових подій логіко-імітаційної моделі застосовують складені формули відповідно до положень.

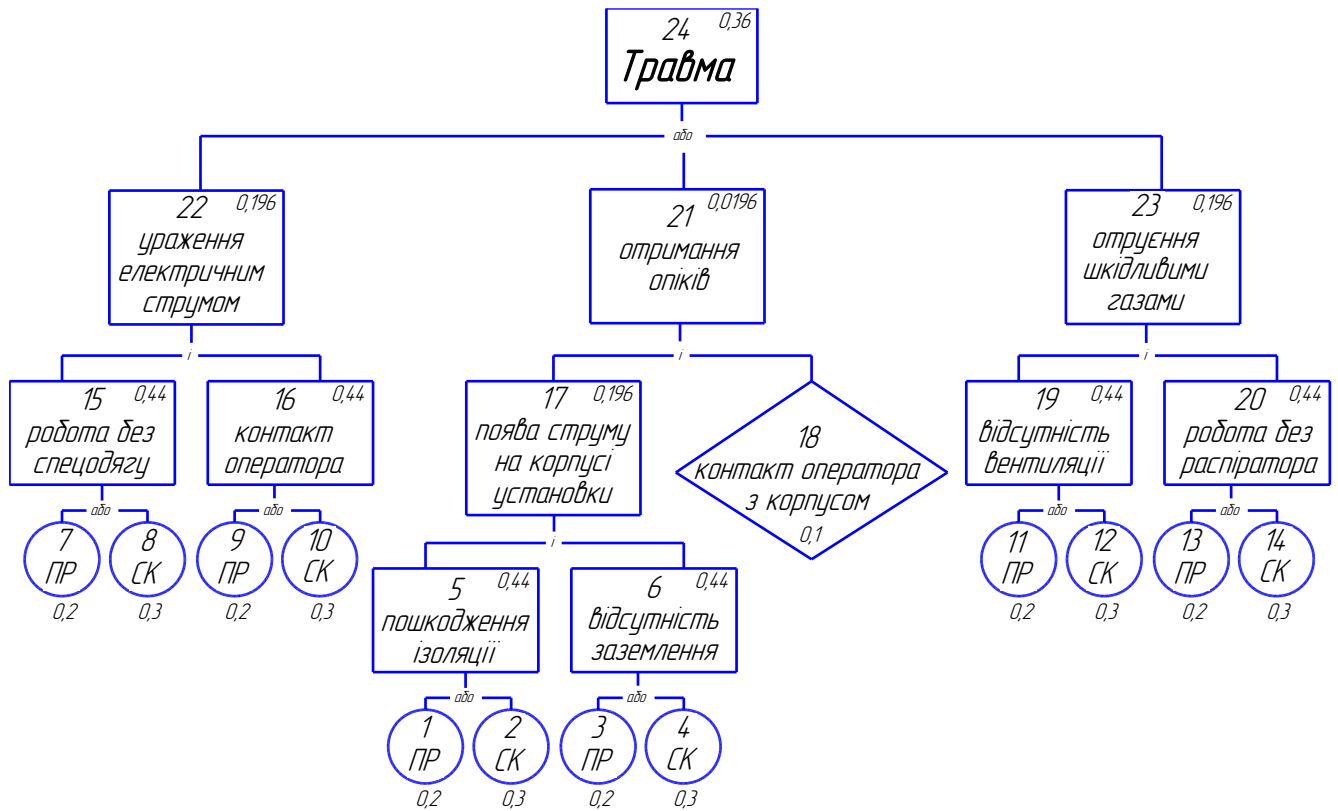


Рисунок 5.1 - Модель процесу формування та виникнення травми

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

Ймовірність події P_5 визначаємо наступним чином

$$P_5 = P_1 + P_2 - P_1 \cdot P_2 = 0,2 + 0,3 - 0,2 \cdot 0,3 = 0,44 \quad (5.1)$$

Ймовірність подій P_6 , P_{15} , P_{16} , P_{19} і P_{20} буде рівною події P_5 , оскільки базові події для них є однаковими.

Ймовірність події P_{17}

$$P_{17} = P_5 \cdot P_6 = 0,44 \cdot 0,44 = 0,194 \quad (5.2)$$

Ймовірність події P_{21}

$$P_{21} = P_{17} \cdot P_{18} = 0,194 \cdot 0,1 = 0,0194 \quad (5.3)$$

Ймовірності подій P_{22} і P_{23} будуть рівною події P_{17} , оскільки події P_5 , P_6 , P_{15} , P_{16} рівні між собою.

Ймовірність події P_{24}

$$P_{24} = P_{21} + P_{22} + P_{23} - P_{21} \cdot P_{22} - P_{21} \cdot P_{23} - P_{22} \cdot P_{23} \quad (5.4)$$

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

$$-0,0194 \cdot 0,194 - 0,194 \cdot 0,194 = 0,36$$

Таким чином, на робочому місті під час зварювання елементів металоконструкцій автоматом для зварювання в середовищі захисних газів за наявності і можливості виникнення існуючих небезпек та небезпечних діях на 100 робочих місць ймовірність виникнення травмонебезпечної ситуації становить 0,36 (36 %).

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

6. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

6.1. Методика розрахунку норм витрати зварювальних матеріалів

Норми витрати зварювальних матеріалів розробляються на підставі нормативів витрати матеріалів на 1 м шва, які розраховуються відповідно до конкретних видів зварювання, типів зварних швів, товщини зварюваного матеріалу, режимів зварювання. Норма витрати зварювальних матеріалів на виріб при дугових способах зварювання визначається на основі нормативів зварювальних матеріалів за формулою:

$$H_{\text{вир}} = \sum_{j=1}^w H_{ij} L_{ij} + \sum_{j=1}^w H_{\text{п}ij} L_{\text{п}ij} + \sum_{j=1}^w H_{\text{з}ij} L_{\text{з}ij} \quad (6.1)$$

де H_{ij} , $H_{\text{п}ij}$, $H_{\text{з}ij}$ – нормативи витрати j -го зварювального матеріалу при i -му способі зварювання неперервного, переривчастого та точкового шва відповідно, кг;

L_{ij} , $L_{\text{п}ij}$, – довжина зварних швів j -го типу неперервних та переривчастих відповідно, які викопуються i -м способом зварювання, м;

$n_{\text{з}ij}$ – кількість j -го типу електрозаклепок, виконаних i -м способом зварювання на виробі, шт;

$w = 1, 2, 3, \dots$ – типи швів зварних з'єднань за відповідним стандартом.

Норматив витрати зварювальних матеріалів H при дугових способах зварювання визначається за формулою:

$$H = M_{1\text{м}} \cdot k_{\text{в}}, \quad (6.2)$$

де $M_{1\text{м}}$ – маса наплавленого металу на метр зварного шва, кг;

$k_{\text{в}}$ – коефіцієнт витрати, який враховує технологічні втрати та відходи зварювальних матеріалів.

Маса наплавленого металу $M_{1\text{м}}$ визначається за формулою:

$$M_{1\text{м}} = F \cdot \rho \cdot L \cdot 10^{-3}, \quad (6.3)$$

де F – площа поперечного перерізу наплавленого металу шва даного зварного з'єднання, яка розраховується за номінальними розмірами конструктивних

елементів підготовлених кромок зварюваних деталей та шва зварного з'єднання за відповідним стандартом, см²;

ρ – густина металу шва, прийнята для вуглецевих та низьколегованих сталей 7,85 г/см³, для алюмінію та його сплавів – 2,7 г/см³;

L – довжина шва, яка дорівнює 100 см.

При виконанні швів зварюванням в захисних газах та ручному дуговому покритими електродами в різних просторових положеннях норматив витрати електродного металу коригується поправочним коефіцієнтом k ($H = M_{1м} \cdot k_B \cdot k$). При зварюванні в нижньому положенні цей коефіцієнт дорівнює 1,0; в напіввертикальному (нахиленому) – 1,05; у вертикальному та горизонтальному на вертикальній площині – 1,1; у стельовому – 1,2.

6.2. Методика розрахунку норм витрати зварювальних матеріалів при зварюванні в сумішах захисних газів

Нормуванню підлягають зварювальний дріт, вуглекислий газ та суміші 70...85% CO₂ + 15...30% O₂.

Норма витрати зварювальних матеріалів на виріб визначається за формулою:

$$H_{\text{вир}} = \sum_{i=1}^n H_i \cdot L_i \cdot k_i \cdot k_{1i} \cdot k_{2i}, \quad (6.4)$$

де H_i – норматив витрати матеріалу на 1 м шва i -го типу при даній товщині, кг;

k_i – поправковий коефіцієнт, який враховує просторове положення i -го шва (див. п. 3.1);

k_{1i} – поправковий коефіцієнт, який враховує технологічні відходи та втрати, пов'язані із заваркою кратера, виведенням (при необхідності) початку та кінця шва на технологічні планки, підбором режиму перед початком зварювання, а також залишки дроту в шлангових каналах, касетах ($k_1 = 1,05...1,06$);

k_{2i} – поправковий коефіцієнт, який враховує витрату дроту на прихватку, якщо прихватка виконується зварюванням в CO₂ (для дроту Св-08Г2С діаметром 1,2...1,4 мм k_2 складає 1,06, а діаметром 1,6...2,0 мм – 1,15).

Норматив витрати зварювального дроту H визначається за формулою (6.2) згідно ГОСТ 14771-76. Коефіцієнт k_v витрати дроту, що враховує його неминучі втрати, диференційовано за діаметрами та марками дроту [29].

Норматив витрати захисного газу H_g в літрах або метрах кубічних на 1 м шва визначається за виразом:

$$H_g = \sum_{j=1}^m H_{зв.г} \cdot L_{oj} \cdot k_{д.гj}, \quad (6.5)$$

де $H_{зв.г}$ – питома витрата захисного газу та сумішей, м³/с (л/хв);

T_{oj} – основний час j -го проходу, с (хв);

$H_{д.гj}$ – додаткова витрата захисного газу на виконання підготовчо-заключних операцій при зварюванні j -го проходу, м³ (л);

j – кількість проходів ($j = 1, 2, 3, \dots, m$), переріз кожного проходу при зварюванні стикових з'єднань дротом $d_e = 1,4 \dots 1,6$ мм не повинен перевищувати 30...40 мм², а $d_e = 2$ мм буде дорівнювати 40...60 мм².

Нормативи розраховані для випадку використання вуглекислого газу вищого та першого сорту, що випускається згідно ГОСТ 8050-85. При використанні вуглекислого газу другого сорту норматив збільшується в 1,2 рази.

Визначаючи витрату вуглекислого газу в кілограмах, необхідно мати на увазі, що при випаровуванні 1 кг зрідженої вуглекислоти його утворюється 0,509 м³ або 509 л. Густина двоокису вуглецю при 101,3 кПа та 20°C становить 1,839 кг/м³ [27].

Додаткова витрата захисного газу $H_{д.г}$, в літрах або метрах кубічних на кожен прохід розраховується за формулою:

$$H_{д.г} = T_{п.з} \cdot H_{зв.г}, \quad (6.6)$$

де $T_{п.з}$ – тривалість підготовчо-заключних операцій (продувка пальника до зварювання, налаштування режимів зварювання, обдув місця зварювання по закінченні процесу), с (хв).

Значення $T_{п.з}$ для дрібносерійного виробництва можна прийняти рівним 12 с (0,2 хв), для великосерійного та масового – 6 с (0,1 хв) на кожен прохід.

Витрата CO₂ визначається з урахуванням діаметра дроту d_e та нормального вильоту електрода l_e [8].:

d_e , мм	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	2,0
l_e , мм	6...10	10...12	12...16	16...20	18...20	22...25

При зварюванні в суміші $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ використовується виліт електродного дроту, що не менш ніж удвічі перевищує довжину нормального l_e . Це дозволяє на 15...20 % підвищити швидкість зварювання, зменшити витрату захисної суміші.

При зварюванні швів довжиною < 50 мм або арматури діаметром < 20 мм норматив витрати захисного газу встановлюється з коефіцієнтом 1,2.

Витрата газу на прихватки складає до 15% загальної витрати газу на вузол (виріб). При зварюванні із застосуванням газового захисту зворотного боку шва додаткова витрата газу обчислюється помноженням витрати $H_{зв.г}$, визначеної за формулою (6.5), на коефіцієнт 1,3...1,5.

Норму витрати газу на виріб $H_{вир.г}$ можна визначити за формулою:

$$H_{вир.г} = H_{вир.г} \cdot k_{г} = \sum_j^m [T_{oij} \cdot L_i + T_{п.з} + j_j], \quad (6.7)$$

де $H_{вир}$ – норма витрати зварювального дроту на виріб, що визначається за формулою, кг;

$k_{г}$ – коефіцієнт, який враховує витрати вуглекислого газу на 1 кг витраченого дроту. Для укрупнених розрахунків $k_{г}$ можна прийняти рівним 1,15.

6.3. Методика розрахунку норм витрати електроенергії при зварюванні в сумішах захисних газів

Норматив витрати електроенергії, на відміну від ручного дугового зварювання, додатково враховує витрату електроенергії двигуном $E_{д.м(кг)}$:

$$H_{ел.м(кг)} = H_{о.м(кг)} + H_{х.м(кг)} + H_{д.м(кг)} \quad (6.8)$$

Значення $E_{д.м}$ можна визначити за формулою:

$$H_{д.м} = \sum_{i=1}^n P_i \cdot T_{pi} \cdot k_{pi}, \quad (6.9)$$

де P_i – встановлена потужність i -го електродвигуна, кВт;

k_{pi} – коефіцієнт використання i -го двигуна по потужності;

T_{pi} – тривалість роботи i -го двигуна, год.

Середні значення k_x для випадку зварювання під флюсом складають:

- для великосерійного та масового виробництва - 0,4...0,6
- для одиничного та дрібносерійного виробництва - 0,7...0,8

Для укрупнених розрахунків потреби електроенергії можна скористатись такими усередненими нормативами витрати електроенергії на 1 кг наплавленого металу:

- для випрямлячів – 2,5...3,0 кВт·год/кг,
- для перетворювачів та багатопостових джерел живлення – 3,0...3,5 кВт·год/кг.

6.4. Результати розрахунку норм витрати зварювальних матеріалів та електроенергії

Результати розрахунку норм витрат зварювальних матеріалів, продуктивності зварювання та сумарних затрат, виконаних за методикою, наведеною в п. 6.1-6.3 наведені в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Результати розрахунків

Параметр	Розмірність	Результат
1	2	3
Площа поперечного перерізу наплавленого металу шва	мм ²	0,14
Маса наплавленого металу, кг	кг	0,11
Коефіцієнт витрати дроту	-	1,04
Норматив витрати зварювального дроту	кг/м	0,114
Основний час виконання 1 метра шва	год	0,057
Тривалість підготовчо-заключних операцій	хв	0,2
Норматив витрати захисного газу	л/хв.	15
	кг	0,028
Витрата електроенергії на 1 м шва	Вт	163,57
Коефіцієнт холостого ходу	-	0,92

Продовження таблиці 6.1

1	2	3
Втрата електроенергії на 1 м шва за період холостого ходу	Вт	7,1
Витрата електроенергії на роботу електродвигуна	кВт	0,257
Норматив витрати електроенергії на 1 м шва	Вт	170,93
Норматив витрати електроенергії на 1 кг наплавленого металу	Вт	49,98
Продуктивність зварювання	м	48,25
Річна норма витрат електродного дроту	кг	5500,5
Річна норма витрат газу	кг	1351
Річна норма витрат електроенергії	кВт	2411,54
Сумарні річні витрати матеріалів та електроенергії на роботу дільниці	грн	476267,35

Для розрахунку річних затрат на роботу обладнання річна програма приймалась в розмірі 1000 виробів. Ціни на матеріали та електроенергія. Враховувались станом на 01.09.2024 р:

- зварювальний дріт – 84 грн/кг;
- суміш захисного газу – 8,75 грн/л;
- електроенергія – 1038,5 грн/МВт.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В умовах сучасних зварювальних виробництв, які працюють над виготовленням зварних металоконструкцій, основними видами обладнання для зварювання лінійних швів різної протяжності є зварювальні колони, обладнані обертачами та кантувачами. В технологічних процесах зварювання металоконструкцій найбільш поширеним способом зварювання є механізоване або автоматичне зварювання в середовищі захисних газів.

Ефективність виконання технологічного процесу зварювання оцінюється якістю зварних швів, продуктивністю зварювання та конструктивними параметрами отриманого виробу. Саме недотримання заданої геометрії деталей в результаті їх нероз'ємного з'єднання досить часто призводить до появи браку.

Теоретичними дослідженнями встановлено, що основними параметрами процесу автоматичного зварювання, які впливають на зміну геометрії деталей через появу внутрішніх напружень і теплових деформацій є сила струму зварювання та швидкість зварювання. Обидва ці параметри взаємопов'язані, оскільки впливають на продуктивність процесу. Водночас від них залежить і кількість теплоти, що надходить до деталі і призводить до їх теплових деформацій.

Експериментальними дослідженнями встановлено, що збільшення струму зварювання в 2 рази призводить до збільшення швидкості розплавлення електродного дроту, що в свою чергу викликає необхідність збільшення швидкості переміщення пальника вздовж лінії формування шва. Однак величина лінійних деформацій для різних типів швів при цьому зростає на 18-25 %.

В результаті порівняння різних режимів роботи зварювального апарату Trans Puls Synergic 2700 встановлено, що мінімальні залишкові теплові деформації були отримані при роботі апарата в режимі CMT (Cold Metal Transfer). Максимальні їх значення коливаються в межах 0,8...1,0 мм.

Максимальні залишкові теплові деформації показав звичайний режим Synergic. Під час зварювання деталей товщиною 4 мм максимальне значення деформацій становило 1,8...2,2 мм.

Збільшення швидкості зварювання вимагає пропорційного збільшення значень зварювального струму, оскільки при швидкості зварювання понад 1,4 м/хв та струмі зварювання до 120 А відбувається погане формування зварного шва, перериви, незплавлення кромки та нестійке горіння дуги.

Експериментальними дослідженнями встановлено, що збільшення швидкості зварювання металу товщиною 4 мм до 2 м/хв призводить до зниження теплових деформацій до 50 %.

Підсумовуючи отримані результати досліджень можна зробити висновок що для автоматичного зварювання сталевих металоконструкцій товщиною 4 мм оптимальним є режим зварювання на струмі 120...140 А зі швидкістю переміщення пальника зварювальною колоною 1,5...1,6 м/хв. Теплові деформації при цьому не перевищуватимуть 1,0 мм.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Березін Л.Я. Складально-зварювальне оснащення. Методичні вказівки до практичних та лабораторних занять для студентів спеціальностей 7.05050401, 8.05050401 – Технології та устаткування зварювання. Чернігів: ЧНТУ, 2015. – 80 с.
2. Березін Л.Я., Хоменко М.М., Карпенко А.С. Засоби технологічного оснащення зварювального виробництва. Навчальний посібник. Чернігів: ЧДТУ, 2003. – 142 с.
3. Білоник І.М., Капустян О.Є. 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. Запоріжжя: ЗНТУ, 2019. - 20 с.
4. Гасило Ю.А. Конспект лекцій з дисципліни «Напруження та деформації при зварюванні» для студентів денної форми навчання з напряму 7.050504 - Технологія та устаткування зварювання. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2015, 48 с.
5. Головка Д. Б., Рего К. Г., Скрипник Ю. О. Автоматика і автоматизація технологічних процесів: підручник. Київ: Либідь, 1997. – 232 с.
6. Гончаренко Б.М. Автоматизація виробничих процесів: Конспект лекцій для студ. за напр. підгот. 6.050502 «Інженерна механіка» і 6.050503 «Машинобудування» ден. та заоч. форм. навч. Київ: НУХТ, 2013. – 384 с.
7. Гуменюк І.В. Технологія електродугового зварювання: Підручник. Київ, Грамота, 2006. – 512 с.
8. Драган С.В. Практикум зі зварювання: Навчальний посібник. Миколаїв: НУК, 2008. – 68 с.
9. Єрмолаєв, Г. В. Міцність зварних з'єднань: підручник. Миколаїв : НУК, 2007. – 220 с.

10. Камель Г. І., Гасило Ю. А., Івченко П. С., Романюк Р. Я. Контроль якості зварювання. Т. 1. Неруйнівні методи контролю: навчальний посібник. Кам'янське: ДДТУ, 2018. - 241 с.
11. Капустян О.Є. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Автоматичне керування зварюванням» для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка» усіх форм навчання. Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2020. 60 с.
12. Капустян О.Є. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Автоматичні лінії, роботи і транспорт у зварювальному виробництві» для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка» усіх форм навчання. Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2020. – 63 с.
13. Карпенко А.С. Технологічна оснастка зварювального виробництва: Навч. посібник. Київ: Арістей, 2005. – 268 с.
14. Карпенко А.С. Технологічна оснастка у зварювальному виробництві: Навч. посібник. Київ: Арістей, 2006. – 272 с.
15. Квасницький В. В. Спеціальні способи зварювання. Навчальний посібник. - Миколаїв: УДМТУ, 2003.- 437 с.
16. Лехман С.Д., Рубльов В.І., Рябцев Б.І. Запобігання аварійності і травматизму у сільському господарстві. Київ: Урожай, 1993. 272 с.
17. Махненко В. І., Єрмолаєв Г. В., Квасницький В. В., Лабарткава А. В. Напруження та деформації при зварюванні: навчальний посібник. Миколаїв : НУК, 2011. – 240 с.
18. Міранцов С. Л., Тулупов В. І. Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні : методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для студентів спеціальності 7.05050201, 8.05050201 «Технології машинобудування» денної і заочної форм навчання. Краматорськ : ДДМА, 2016. – 35 с.
19. Муляр Ю. І., Пурдик В. П., Репінський С. В. та ін. Автоматизація виробництва в машинобудуванні: практикум. Вінниця: ВНТУ, 2018. – 133 с.

20. Муляр, Ю. І., Репінський С. В. Автоматизація виробництва в машинобудуванні. Частина II : навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2020. – 123 с.
21. Напруження та деформації при зварюванні і паянні: підручник / за заг. ред. Л. М. Лобанова. – Миколаїв : НУК, 2016. – 246 с.
22. Осіпов М.Ю., Капустян О.Є. Конспект лекцій з дисципліни «Допоміжне обладнання зварювального виробництва» для студентів спеціальності 131 Прикладна механіка освітніх програм «Технології та устаткування зварювання» і «Відновлення та підвищення зносостійкості деталей і конструкцій» усіх форм навчання. Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2021. – 91 с.
23. Піддубний В.В., Стівбун О.І. Питання професійної гігієни праці в системі охорони праці. Київ: Логос, 2004. 195с.
24. Проць Я.І., Савків В.Б., Шкодзінський О.К., Ляшук О.Л. Автоматизація виробничих процесів. Навчальний посібник для технічних спеціальностей вищих навчальних закладів. Тернопіль: ТНТУ ім. І.Пулюя, 2011. – 344с.
25. 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.
26. Швець О.П., Р.Є. Сивулька. Технології та обладнання зварювання металів і пластмас: метод. рекомендації для самостійної роботи студентів ОС «Бакалавр» спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» заочної форми навчання. Львів: ЛНАУ, 2019. 8 с.
27. Швець О.П. Технології та обладнання зварювання металів і пластмас: метод. рекомендації до виконання лабораторної роботи на тему

«Зварювання сталей в середовищі вуглекислого газу» студентами ОС «Бакалавр» спеціальностей 133 «Галузеве машинобудування», 141 «Електроенергетика, електротехніка та електрообладнання», 208 «Агроінженерія», 274 «Автомобільний транспорт». Львів: ЛНАУ, 2020. - 10 с.

28. Швець О.П. Технології та обладнання зварювання металів і пластмас. Методичні рекомендації до виконання практичної роботи на тему «Підготовка зварювальних апаратів Fronius серії TPSi до роботи» студентами ОС «Бакалавр» спеціальностей 133 «Галузеве машинобудування», 208 «Агроінженерія», 274 «Автомобільний транспорт», 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Львів: ЛНУП, 202. - 20 с.

29. Шевченко М.П. Методичні вказівки по розрахунку режимів зварювання з дисципліни «Технологічні основи зварювання плавленням» для спеціальності 5. 05050401 «Зварювальне виробництво». Маріуполь, ДВНЗ «ПДТУ», 2019. 28 с.

30. Ding, D.; Pan, Z.; Cuiuri, D.; Li, H. Wire-feed additive manufacturing of metal components: Technologies, developments and future interests. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2015, 81, 465–481.

31. Liberini, M.; Astarita, A.; Campatelli, G.; Scippa, A.; Montevicchi, F.; Venturini, G.; Durante, M.; Boccarusso, L.; Minutolo, F.M.C.; Squillace, A. Selection of Optimal Process Parameters for Wire Arc Additive Manufacturing. *Procedia CIRP* 2017, 62, 470–474.

32. <https://www.fronius.com>

33. [https://www.fronius.com/~downloads/](https://www.fronius.com/~/downloads/)

[Perfect%20Welding/Operating%20Instructions/42%2C0426%2C0114%2CRU.pdf](#)

ДОДАТКИ



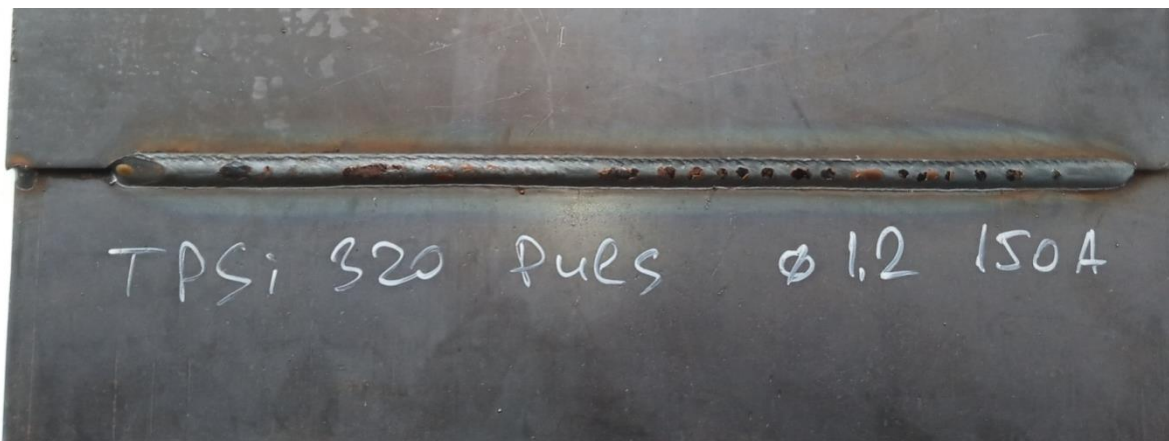
Зразки деталей, зварених в режимі Synergic



Зразки деталей, зварених в режимі Synchro Pulse



Зразки деталей, зварених в режимі CMT



Зразки деталей, з'єднаних напусковим швом

Додаток Б

Результати вимірювання поточних деформацій деталей

№	Точка виміру по довжині шва, мм									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
	Synergic									
1	0,79	0,78	0,98	1,22	1,75	1,78	2,32	2,13	1,94	1,67
2	0,61	1,08	1,1	1,31	1,39	2,143	2,43	2,08	1,89	1,56
3	0,69	0,8	1,08	1,55	1,5	2,26	2,62	2,33	2,21	1,94
	Synchro Pulse									
1	0,42	0,68	0,79	0,94	1,06	1,18	1,85	1,56	1,06	0,87
2	0,54	0,71	0,91	1,06	1,15	1,26	1,67	1,73	1,32	1,12
3	0,5	0,81	0,95	1,11	1,25	1,38	1,72	1,66	1,43	1,2
	CMT									
1	0,33	0,33	0,45	0,76	0,88	0,96	1,05	1,01	0,93	0,68
2	0,18	0,29	0,51	0,66	0,75	0,99	0,98	1,1	0,82	0,77
3	0,26	0,36	0,48	0,82	0,92	1,06	0,88	1,14	0,96	0,81

Результати вимірювання поточних деформацій деталей за різних значень струму зварювання

I, A	Точка виміру по довжині шва, мм									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
	Synergic									
80	0,697	0,89	1,05	1,36	1,55	2,06	2,46	2,18	2,01	1,72
130	0,801	1,02	1,2	1,56	1,78	2,37	2,83	2,51	2,32	1,98
180	0,94	1,2	1,4	1,84	2,09	2,78	3,32	2,94	2,72	2,33
	Synchro Pulse									
	0,49	0,73	0,88	1,04	1,15	1,27	1,75	1,65	1,27	1,06
	0,56	0,84	1,02	1,19	1,33	1,46	2,01	1,898	1,46	1,22
80	0,68	0,99	1,19	1,4	1,56	1,72	2,36	2,23	1,71	1,44
	CMT									
	0,26	0,33	0,48	0,75	0,85	1,0	0,97	1,08	0,9	0,75
	0,295	0,38	0,55	0,86	0,98	1,15	1,12	1,23	1,04	0,87
80	0,35	0,44	0,65	1,01	1,15	1,35	1,31	1,46	1,22	1,02

Додаток В

Результати вимірювання кінцевих деформацій деталей

№	Точка виміру по довжині шва, мм										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
	Synergic										
1	0,22	0,48	0,75	0,98	1,02	1,12	1,31	1,26	1,16	1,08	0,96
2	0,28	0,52	0,81	0,79	0,99	1,18	1,26	1,37	1,24	1,1	1,06
3	0,35	0,61	0,84	0,84	1,1	1,24	1,18	1,24	1,19	1,13	0,85
	Synchro Pulse										
1	0,46	0,75	0,96	1,12	1,26	1,43	1,55	1,6	1,52	1,41	1,33
2	0,51	0,82	1,05	1,19	1,27	1,39	1,48	1,72	1,64	1,35	1,28
3	0,53	0,77	1,1	1,2	1,32	1,51	1,59	1,65	1,53	1,39	1,3
	CMT										
1	0,22	0,48	0,75	0,98	1,02	1,12	1,31	1,26	1,16	1,08	0,96
2	0,28	0,52	0,81	0,79	0,99	1,18	1,26	1,37	1,24	1,1	1,06
3	0,35	0,61	0,84	0,84	1,1	1,24	1,18	1,24	1,19	1,13	0,85

Результати вимірювання кінцевих деформацій деталей за різних значень швидкості зварювання

V, м/хв	Точка виміру по довжині шва, мм										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
	Synergic										
1,0	0,63	0,94	1,18	1,35	1,65	2,05	2,45	2,74	2,75	2,47	2,05
1,5	0,51	0,75	0,94	1,08	1,32	1,64	1,96	2,19	2,2	1,98	1,64
2,0	0,38	0,57	0,706	0,81	0,99	1,23	1,47	1,64	1,65	1,48	1,23
	Synchro Pulse										
1,0	0,32	0,52	0,67	0,77	0,84	0,94	1,01	1,106	1,05	0,92	0,87
1,5	0,26	0,42	0,54	0,616	0,67	0,75	0,81	0,89	0,84	0,74	0,696
2,0	0,19	0,31	0,40	0,46	0,5	0,56	0,61	0,66	0,63	0,55	0,52
	CMT										
1,0	0,28	0,54	0,8	0,87	1,04	1,18	1,25	1,29	1,2	1,103	0,96
1,5	0,23	0,429	0,64	0,696	0,83	0,94	1	1,03	0,96	0,88	0,77
2,0	0,17	0,32	0,48	0,52	0,62	0,71	0,75	0,77	0,72	0,66	0,57