

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Вдосконалення технології виготовлення ємності транспортування нафтопродуктів з дослідженням її зварних з'єднань

Виконав: студент 2 курсу, групи МПм-61

спеціальності 131 “Прикладна механіка”

(шифр і назва спеціальності)

(підпис)

Козак Б.О

(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

Мариненко С.Ю

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

Ткаченко І.Г.

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

(підпис)

Окіпний І.Б.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра на тему: «Вдосконалення технології виготовлення ємності транспортування нафтопродуктів з дослідженням її зварних з'єднань.» складається із розрахунково-пояснювальної записки об'ємом 82 аркушів формату А4 та графічної частини у вигляді слайдів. Розрахунково-пояснювальна записка складається із наступних частин: аналітичної; технологічної; конструкторської; науково-дослідницької; охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях; висновків.

Для висвітлення питань, які розглядаються в даному дипломному проекті, розрахунково-пояснювальна записка містить 27 рисунків, 11 таблиць та додатки. При написанні розрахунково-пояснювальної записки використано 33 літературні джерела.

В даному дипломному проекті розроблено технологію та вибрано зварювальне устаткування для зварювання ємності для зберігання і транспортування нафтопродуктів.

Досліджено вплив та залежності властивостей зварного шва від товщини металу та сили зварювального струму.

Ключові слова: НАПІВАВТОМАТИЧНЕ ЗВАРЮВАННЯ, АВТОМАТИЧНЕ ЗВАРЮВАННЯ, ФЛЮС, ЗВАРЮВАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ, ЗВАРЮВАЛЬНЕ УСТАТКУВАННЯ.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА.....	8
2. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА.....	18
3. КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА.....	29
4. НАКОВО ДОСЛІДНА ЧАСТИНА.....	39
5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	68
ВИСНОВКИ.....	76
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	78
ДОДАТКИ	82

ВСТУП

Актуальність роботи. Сучасна нафтовидобувна промисловість потребує розробки матеріалів високої міцності та в'язкості для виробництва сталей для нафто- та газо-зберігаючих резервуарів. Зміни в технологіях виробництва сталі та її прокату є викликом для розробників зварювальних матеріалів та технологій з'єднання. Ця проблема є більш критичною для рівнів міцності вище 830 МПа, де відсутні спеціальні правила схвалення зварювальних матеріалів.

Руйнування зварних з'єднань нафтозберігаючих резервуарів з низьколегованої сталі в даний час стає серйозною проблемою для нафто-газової промисловості. Багатофазні мікроструктури, що містять голчастий ферит чи фазу з переважанням голчастого фериту, мають хороші комплексні властивості в сталях.

Мета роботи – вдосконалення технологічного процесу виготовлення ємності для зберігання чи транспортування нафтопродуктів та дослідження зварних швів даної конструкції.

Кваліфікаційна робота має вирішувати таких поставлені завдання:

- аналізування та вивчення існуючих способів зварювання циліндричних листових конструкцій;
- аналізування основних пропонованих способів складання заготовок;
- вдосконалення технології виготовлення металевих ємностей;
- розглядання питань безпеки життєдіяльності та охорони праці для описуваних виробництв.

Об'єкт дослідження – технологічний процес виготовлення листових циліндричних конструкцій та дослідження зварних з'єднань.

Предмет дослідження – оцінка впливу мікролегування металу шва для корекції отриманої структури зварних з'єднань, що впливають на експлуатаційні та міцнісні характеристики.

Отримані результати. Запропоновано удосконалення технологічного процесу виготовлення циліндричної листової металевої конструкції типу ємність з низьколегованої сталі, та досліджено вплив структури зварного шва на експлуатаційні характеристики виробу.

Практичне значення. Результати роботи можна застосовувати при

розробленні чи вдосконаленні технологічного процесу зварювання гнутих листових конструкцій типу ємність.

Апробація результатів кваліфікаційної роботи магістра. Окремі результати роботи доповідались та отримали позитивну оцінку на XIV Міжн. науково-технічній конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій». м. Тернопіль, ТНТУ ім. І. Пулюя, 2025 р.

Публікації. Часткові результати досліджень за темою магістерської роботи опубліковано в 1 праці: збірник тез XIV Міжн. науково-технічної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій». м. Тернопіль, ТНТУ ім. І. Пулюя, 2025 р.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота магістра складається із вступу, 5 розділів, загальних висновків щодо роботи, бібліографічного списку зі 33 найменувань, 7 додатків. Робота викладена на 82 сторінках машинописного тексту, що включає 27 рисунків та 11 таблиць.

1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

Цистерна призначена для транспортування чи зберігання різних рідких речовин, наприклад, (легкозаймистих рідин).

Виріб «Цистерна» відноситься до першої групи конструкцій, які представляють собою зварні конструкції, або їх елементи, що працюють в умовах тиску на внутрішні стінки виробу або піддаються безпосередньому впливу динамічних, вібраційних або рухомих навантажень (змінні майданчики контактів). Виріб працює в діапазоні температур $-50 +50$ градусів. Цистерна складається з обшивки, до якої з двох сторін приварюються днища, до обшивки приварюється горловина (рис 1.1)



Рисунок 1.1 – Зовнішній вигляд цистерни для зберігання чи транспортування нафтопродуктів

В якості основного металу для виготовлення цистерни використовуємо сталь марки 17ГС. Це конструкційна низьколегована сталь для зварних конструкцій. Хімічний склад сталі 17ГС наведено в таблиці 1.1 а механічні властивості в таблиці 1.2.

Таблиця 1.1 – Хімічний склад сталі 17ГС, %

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	V	N	Cu	As
0.14 - 0.2	0.4 - 0.6	1 - 1.4	до 0.3	до 0.035	до 0.03	до 0.3	до 0.12	до 0.008	до 0.3	до 0.08

Таблиця 1.2 – Механічні властивості сталі 17ГС

Показник	Межа міцності, МПа	Межа текучості, МПа	Макс. Відносне видовження, %	Зварюваність
Значення	490-510	335-345	23	Без обмежень

У порівнянні з високовуглецевими та низьколегованими сталями, вони мають вищу межу текучості, знижену схильність до механічного старіння, підвищену холодостійкість, кращу корозійну стійкість, низьку ударну в'язкість. Враховуючи низький вміст вуглецю, зварювання даної сталі не складне, ця низьколегована сталь не загартовується та не схильна до перегрівання в процесі утворення зварних з'єднань. Тому вона не схильна до зниження пластичних властивостей чи зростання зернистості її структури. До переваг застосування цієї марки сталі можна віднести й те, що вона не має схильності до післявідпускнуї крихкості, а значення її в'язкості утримується на прийнятному рівні після операцій відпуску. Вищезазначеними властивостями даного матеріалу пояснюється переважаюча ефективність використання сталі 17ГС серед інших низьколегованих сталей, з пониженою зварюваністю та зниженням експлуатаційних властивостей після термооброблення.

Зварюваність сталі

Зварюваність – це технологічна здатність сталі певного хім. складу утворювати в процесі зварювання, будь яким способом високоякісний зварний шов без утворення тріщин, пор та будь яких інших дефектів. В основному від хімічного складу обраної сталі залежить структура і фізичні властивості зварних швів на її основі, що можуть змінюватися в процесі нагрівання та охолодження металу під час зварювання. На зварюваність сталі впливає вміст у ній вуглецю та легуючих елементів. Оскільки дана сталь є низьковуглецевою то згідно літературних даних вона має добру зварюваність.

Схильність металу до утворення гарячих тріщин при зварюванні оцінюють за показником Вілкінсона. Якщо $HCS < 4$, (при 700 МПа), то кажуть, що матеріал не схильний до утворення гарячих тріщин.

$$HCS_p = [C(S+P+Si/25+Ni/100)1000]/(3Mn+Cr+Mo+V)$$

де символи – хімічний елемент, його вміст у сталі, %.

Розрахуємо HCS для сталі 17ГС за вище наведеною формулою

$$HCS = [0,17(0,04+0,035+0,4/25+0,3/100)1000]/(3 \cdot 1+0,3) = 1,133;$$

$HCSp = 1,133$, що менше 4, отже, сталь 17ГС не схильна до утворення гарячих тріщин; для отримання рівномірного основного металу металу шва потрібно застосувати зварювальний дріт з хімічним складом, що відповідає хімічному складу основного металу.

Відповідно до базової технології зварювання виріб «Цистерна» зварюється механізованим зварюванням в середовищі CO_2 .

Переваги механізованого зварювання:

- можливість зварювання в будь-яких просторових положеннях;
- можливість зварювання в місцях з обмеженим доступом;
- порівняно швидкий перехід від одного зварюваного матеріалу до іншого;
- простота і транспортабельність зварювального обладнання.

Недоліки:

- низькі ККД і продуктивність у порівнянні з іншими технологіями зварювання;
- якість з'єднань багато в чому залежить від кваліфікації зварника;
- шкідливі умови процесу зварювання.

1.5 Вибір проектуваного способу зварювання

Основні способи дугового зварювання:

- ☐ Під флюсом;
- ☐ У захисному газі;
- ☐ Порошковим (самозахисним) дротом;
- ☐ Покритим електродом.

Зварювання покритим електродом характеризується низькою продуктивністю, неможливістю механізації і, як наслідок, високою трудомісткістю.

Зварювання дротом вимагає застосування спеціального обладнання для зварювання та додаткових пристосувань для його підготовки до зварювання та зберігання. Цей спосіб також має порівняно низьку продуктивність.

Суть процесу зварювання під шаром захисного флюсу

При використанні цього способу зварювання електро- дуга горить під шаром зернистого сипучого матеріалу - флюсу. Під тепловою дією температури

дуги розплавляються електродний дріт та основний метал шва, а також внутрішня частина флюсу. Власне всередині зони зварювання утворюється робоча порожнина, заповнена випарами металу, флюсу та технологічними газами. Ця, так звана технічна порожнина обмежена оболонкою розплавленого флюсу у верхній частині. Розплавлений флюс, захищає дугу а також розплавлений метал в самій зоні зварювання від впливу зовнішнього середовища. З віддаленням зварювальної дуги від місця зварювання розплавлений флюс, твердне, утворюючи на шві шлакову захисну оболонку-кірку. Після завершення зварювання та наступного охолодження металу зварного шва захисна кірка легко видаляється. Невикористаний флюс збирається у флюсоапарат спеціальним пневматично-відсмоктуючим пристроєм для подальшого використання. Схематичне зображення зварювання під флюсом представлене на рис 1.2

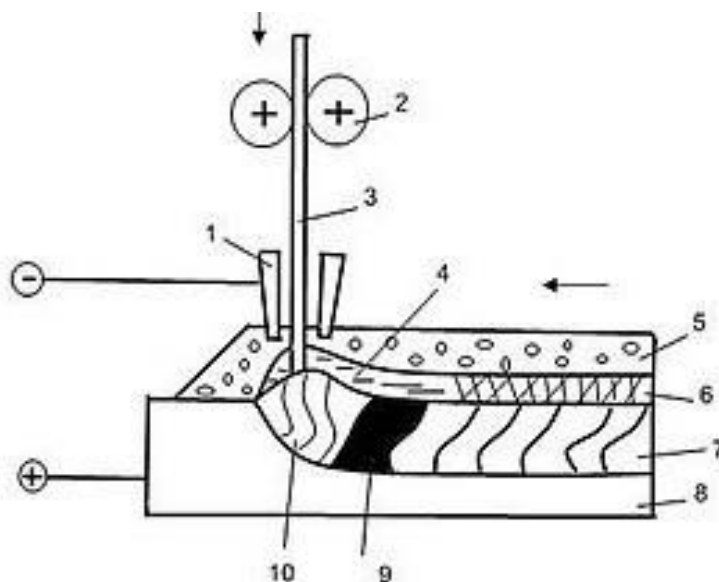


Рисунок 1.2 - Схема дугового зварювання під флюсом. 1 – струмопровід, 2 – механізм переміщення дроту, 3 – дріт, 4 – рідкий шлак, 5 – флюс, 6 – шлакова кірка, 7 – зварний шов, 8 – основний метал заготовки, 9 – рідкий метал, 10 – електрична дуга

Переваги способу:

- Підвищена продуктивність;
- Мінімальні втрати електродного присадного дроту (не більше 2%);
- Відсутність бризок;

- Достатньо надійний захист власне зони зварювання;
- Не висока схильність до утворення оксидів;
- Дрібнодисперсна поверхня металу зварного шва завдяки високій стабільності процесу горіння дуги;
- Не потрібні захисні пристосування від світлового випромінювання, оскільки дуга горить під захисним «ковпаком» шару флюсу;
- Низька швидкість охолодження металу дає змогу забезпечити необхідні показники механічних та експлуатаційних властивостей металу зварного шва;
- Не високі витрати на підготовку робітників;

Недоліки способу:

- Трудомісткість виробництва, зберігання та підготовки зварювальних флюсів;
- Труднощі коригування положення дуги щодо країв зварюваного виробу;
- Неприятливий вплив на оператора;
- Немає можливості виконувати зварювання в усіх просторових положеннях без спеціального обладнання.

Області застосування:

- Зварювання в цехових і монтажних умовах
- Зварювання різних товщин металів від 1,5 мм і аж до 150 мм та вище;
- Зварювання всіх металів і сплавів, різнорідних металів.

Зварювання в вуглекислому газі менш продуктивне в порівнянні зі зварюванням під флюсом, спостерігається значне вигорання легуючих елементів з металу зварювального дроту, а при неправильно налаштованому режимі зварювання – розбризкування електродного металу (більше 5%, в середньому – 2%). Швидкість охолодження металу також вища, що може сприяти утворенню холодних тріщин. Але виключають проникнення дифузійного водню в метал зварювальної ванни.

При зварюванні вуглецевих, конструкційних і низьколегованих сталей для захисту електродного розплавленого металу та зварювальної ванни досить часто

застосовують вуглекислий газ. Такеож в якості захисних знаходять подекуди застосування й суміші вуглекислого газу із киснем або аргоном.

Застосування газової суміші замість чистої вуглекислоти дозволяє поліпшити технічні аспекти зварювання і істотно знизити загальні витрати зварювальних робіт, а саме:

- збільшити швидкість зварювання;
- різко знизити кількість бризок металу;
- забезпечити більш гладкий і плоский профіль зварного шва;
- забезпечити високу якість і надійність зварювання;
- скоротити витрати на зачистні роботи.

На властивості металу шва значний вплив має якість вуглекислого газу. При підвищеному вмісті азоту і водню, а також вологи в швах можуть утворитися пори. Зварювання в вуглекислому газі менш чутливе до негативного впливу утворення шару іржі.

Для зварювання поздовжніх і кільцевих швів нашого виробу застосовується зварювання під шаром флюсу, цей спосіб буде задовольняти всім умовам і вимогам до зварного виробу. Таким як, висока продуктивність, висока якість зварних швів, автоматизація, скорочення часу і санітарні норми.

Вибір зварювальних матеріалів

Вибір електродного дроту

Дріт для зварювання в захисному газі сталі 17ГС приймають близький за хімічним складом до основного металу для забезпечення рівномірності зварного з'єднання, таким дротом є Св-08А. Цей дріт є одним з найбільш універсальних видів зварювального дроту, що використовується в механізованих зварювальних процесах. Він підходить як для використання в зварювальних автоматах, так і в пристроях напівавтоматичного зварювання. Цей тип дроту можна використовувати будь-якими зварювальними апаратами та у будь-яких просторових положеннях.

Хімічний склад електродного дроту Св-08А:

- ☐ Вуглецю від 0,05 % до 0,11 %;
- ☐ Кремнію від 0,7 % до 0,95 %;
- ☐ Марганцю від 1,8 % до 2,1 %;

- ☐ Хрому не більше 0,2 %;
- ☐ Нікелю не більше 0,25 %;
- ☐ Сірки не більше 0,025 %;
- ☐ Фосфору не більше 0,03 %;
- ☐ Азоту не більше 0,01 %.

Механічні властивості дроту Св-08А приведено в таблиці 1.3

Таблиця 1.3 - Механічні властивості дроту

Тимчасовий опір розриву, МПа	Відносне подовження, %	Ударна в'язкість, Дж/см ²	Межа плинності, МПа
530-680	20	47	460

В якості флюсу вибираємо флюс ОСЦ-45

Зварювальний флюс ОСЦ-45 використовується для дугового зварювання (механічного): стійкість дуги при цьому досить хороша. Його застосовують, щоб зварювати вуглецеві суднобудівні сталі - низьколеговані або нелеговані, а також, щоб робити наплавку виробів з вуглецевої та імпортової сталі певних типів. Номенклатура таких виробів досить широка. Крім того, в залежності від зерна за допомогою зварювального флюсу ОСЦ-45 здійснюється зварювання спеціальним зварювальним дротом, діаметр якого становить більше 3 мм або менше 3 мм. Будова зерен флюсу ОСЦ-45 - зерниста, колір коричневий, а їх розмір варіюється від 0,25 мм до 3,0 мм. До плюсів даного флюсу можна віднести стійкість до іржі, а також він дає досить щільні шви, які стійкі до появи тріщин і пор. Однак при цьому він виділяє у великій кількості фтористі гази, які є шкідливими для людини. Використовують флюс ОСЦ-45 в поєднанні з дротами Св-08, Св-08А, Св-08Г2С, Св-10Г2.

Основне призначення флюсів – ущільнення зварювального шва і зменшення схильності до кристалізаційних тріщин. Флюси застосовують при електричному зварюванні плавленням, що забезпечує надійний захист зони зварювання від атмосферних газів, створюють умови стійкого горіння дуги. Після охолодження шва шлакова кірка легко видаляється. Флюси зменшують виділення пилу і газів, шкідливих для здоров'я зварників.

Таблиця 1.4 – хімічний склад флюса

SiO ₂	MnO	MgO	CaF ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	S	P
38-44	38-44	<2,5	6-9	<6,5	<2	<0,15	<0,15

Для зварювання поздовжнього шва виробу застосовуємо двосторонній стиковий шов без обробки крайок. Умовне позначення зварного з'єднання – С7. Даний шов є найбільш оптимальним для даного виробу, оскільки забезпечує надійне зварювання деталей. Товщина металу $S=10$ мм; величина зазору $-b = 0+1$ мм; ширина шва $-e =$ не більше 23 мм; висота посилення $-q = 3$ мм.

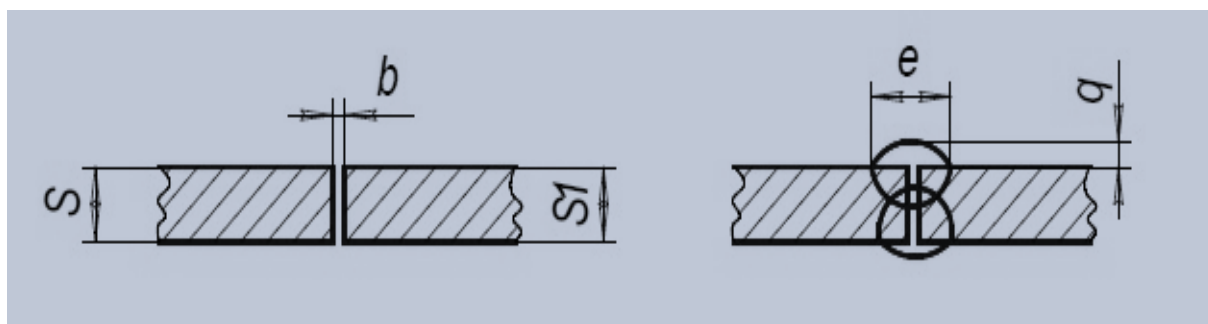


Рисунок 1.3 - Зварне з'єднання С7 для зварювання поздовжнього шва

Розраховані режими зварювання наведено в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 Режими зварювання

Вид зв.	33	D _{є.д.} (мм)	I _{зв} (А)	V _{зв} (м/ч)	U _д (В)	L _в (мм)	V _{п.е.} (мм/с)
Під флюсом	С 7	3	590	29	30	48	19

Рекомендована висота захисного флюсу в залежності від прийнятого значення струму зварювання приведена в таблиці 1.6

Таблиця 1.6 Залежність висоти шару флюсу від величини зварювального струму

I _{зв} , А	200 – 400	400 – 800	800 – 1200
Висота шару флюсу, мм	25 – 35	35 – 40	45 – 60

Для зварювання кільцевого шва виробу застосовуємо односторонній стиковий шов без обробки крайок на підкладці. Умовне позначення зварного з'єднання – С5. Даний шов є найбільш оптимальним для даного виробу, оскільки забезпечує надійне зварювання деталей. Товщина металу $S=10$ мм; величина зазору $-b = 4\pm 1,5$ мм; ширина шва $-e =$ не більше 28 мм; висота посилення $-q = 2\pm 1,5$ мм.

Після проведених розрахунків режими зварювання кільцевого шва зведено у таблицю 1.7.

Таблиця 1.7 Режими зварювання кільцевого шва

Вид зв.	33	$D_{\text{ед.}}$ (мм)	$I_{\text{зв}}$ (А)	$V_{\text{зв}}$ (м/ч)	$U_{\text{д}}$ (В)	$L_{\text{в}}$ (мм)	$V_{\text{п.е.}}$ (мм/с)
Під флюсом	С 5	4	690	25	40	60	22

Отже розібравши переваги та недоліки попередньої та запропонованої, вдосконаленої технології зварювання нашої цистерни, а також прийнявши до уваги необхідні параметри зварювання, для отримання якісних швів, обираємо автоматичне зварювання під флюсом як основне.

2. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

Оскільки наші шви стикові та двосторонні потрібно вибрати обладнання враховуючи необхідність зварювання як внутрішніх так і зовнішніх швів обечайки цистерни.

Враховуючи технологічні особливості конструкції для зварювання внутрішніх швів, як поздовжніх так і кільцевих пропонуємо використати сучасний зварювальний трактор для зварювання під флюсом маорки ESAB VERSOTRAC EWT 1000 в комплекти з джерелом живлення ESAB TAF 1251.



Рисунок 2.1 – Зображення зварювального трактора

ESAB Versotrac EWT 1000 — це високофункціональний зварювальний трактор, розроблений для забезпечення максимальної гнучкості та універсальності на робочому майданчику. Завдяки модульній конструкції, трактор можна розібрати на менші частини менш ніж за 5 хвилин, що полегшує транспортування через

отвори діаметром 500 мм або люки розміром 580 x 400 мм. Роботизований механізм подачі дроту дозволяє зварювати м'яку сталь дротом діаметром до 5 мм при струмі до 1000 А з ПВ 100%. Автоматичне виявлення та налаштування зварювальної головки дозволяє швидко переключатися між методами SAW та GMAW. Інтуїтивно зрозумілий інтерфейс користувача з відображенням реального часу тепловкладення забезпечує повний контроль над процесом зварювання. Ергономічна система обробки катушок з дротом спрощує заміну дроту, а безінструментальне налаштування дозволяє легко змінювати положення зварювальної точки та переключатися між стиковим та кутовим зварюванням. Трактор можна перебудувати між трьох- та чотириколісними версіями відповідно до потреб користувача. Додатковий аналоговий інтерфейс дозволяє підключати трактор до аналогових джерел живлення SAW від інших виробників.

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики трактора

Виробник	ESAB
Країна виробник	Швеція
Напруга живлення	380 В
Частота струму	60 Гц
Максимальний зварювальний струм	1000 А
Максимальний діаметр електрода, який використовується	5 мм
Мінімальний діаметр електрода, який використовується	1 мм
Максимальна температура навколишнього середовища	40 град.
Мінімальна температура навколишнього середовища	-10 град.
Вага	65 кг
Діаметр дроту	1,6-5,0 мм (м'яка сталь), 1,6-4,0 мм (неіржавка сталь), 1,6-5,0 мм (порошковий дріт), 2 x 1,2-2,5 мм (подвійний дріт)
Швидкість подавання дроту	до 9,0 м/хв
Швидкість переміщення	0,1–2,0 м/хв



Рисунок 2.2 – Зображення роботи в трактора по зварюванню поздовжніх внутрішніх швів

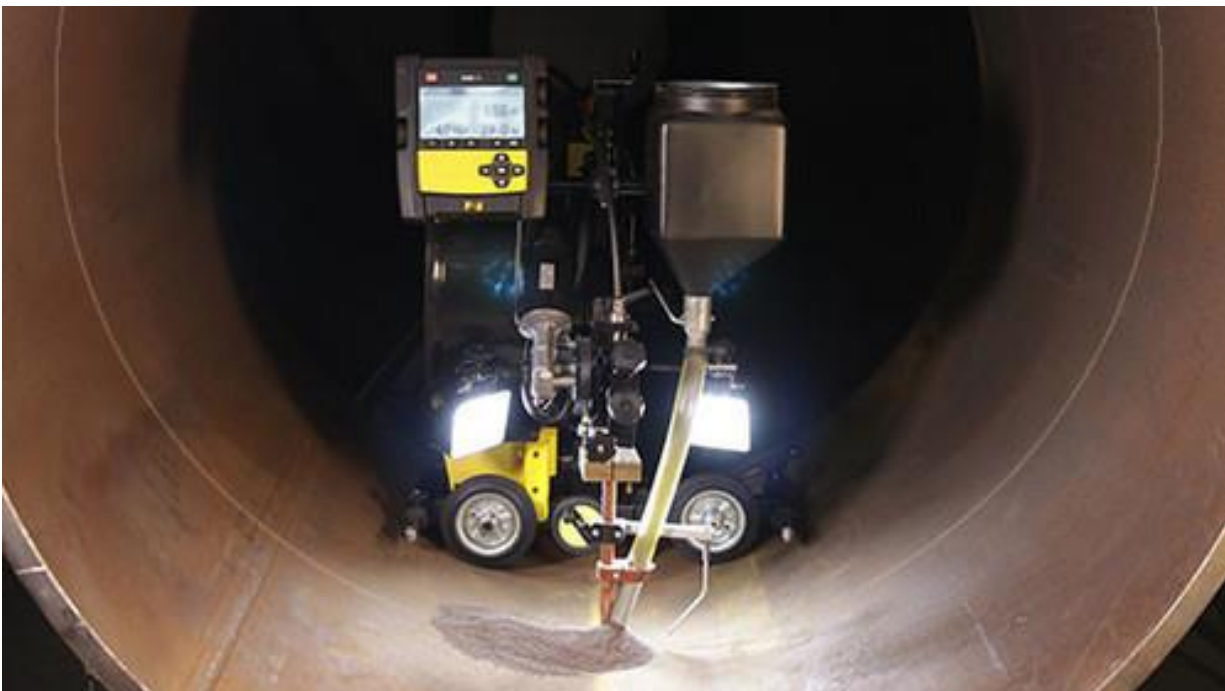


Рисунок 2.3 – Зображення роботи трактора по зварюванню внутрішніх кільцевих швів



Рисунок 2.4 - Джерело живлення ESAB TAF 1251

TAF 1251 – це джерело змінного зварювального струму з прямокутною формою сигналу (Меандр), розроблене для зварювання під флюсом. Завдяки високому ПВ та оптимізованим параметрам напруги, цей апарат забезпечує стабільну роботу навіть при довготривалих завданнях.

Особливості:

- Високий ПВ для безперервної зварювальної роботи.
- Прямокутна форма змінного струму для оптимального підпалу дуги.
- Компенсація коливань напруги живлення та втрат при довгих кабелях.
- Підтримка сучасних протоколів обміну даними (TCP/IP, Profibus, CAN тощо).
- Можливість паралельного з'єднання для збільшення потужності.
- Відсутність магнітного дуття.

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики джерела живлення

Виробник	ESAB
----------	------

Країна виробник	Швеція
Споживана потужність (W)	72 кВА
Частота струму	60 Гц
Коефіцієнт корисної дії	0.86 %
Ступінь захисту IP	23
Напруга живлення	400 В
Мінімальний зварювальний струм (A)	1000
Максимальний зварювальний струм (A)	1500
Вага	608
Габаритні розміри	
Ширина	598 мм
Довжина	774 мм
Висота	1428 мм

Для зварювання зовнішніх поздовжніх та кільцевих швів використаємо підвісну зварювальну головку, для зварювання під флюсом марки ESAB A2 S MINI MASTER.

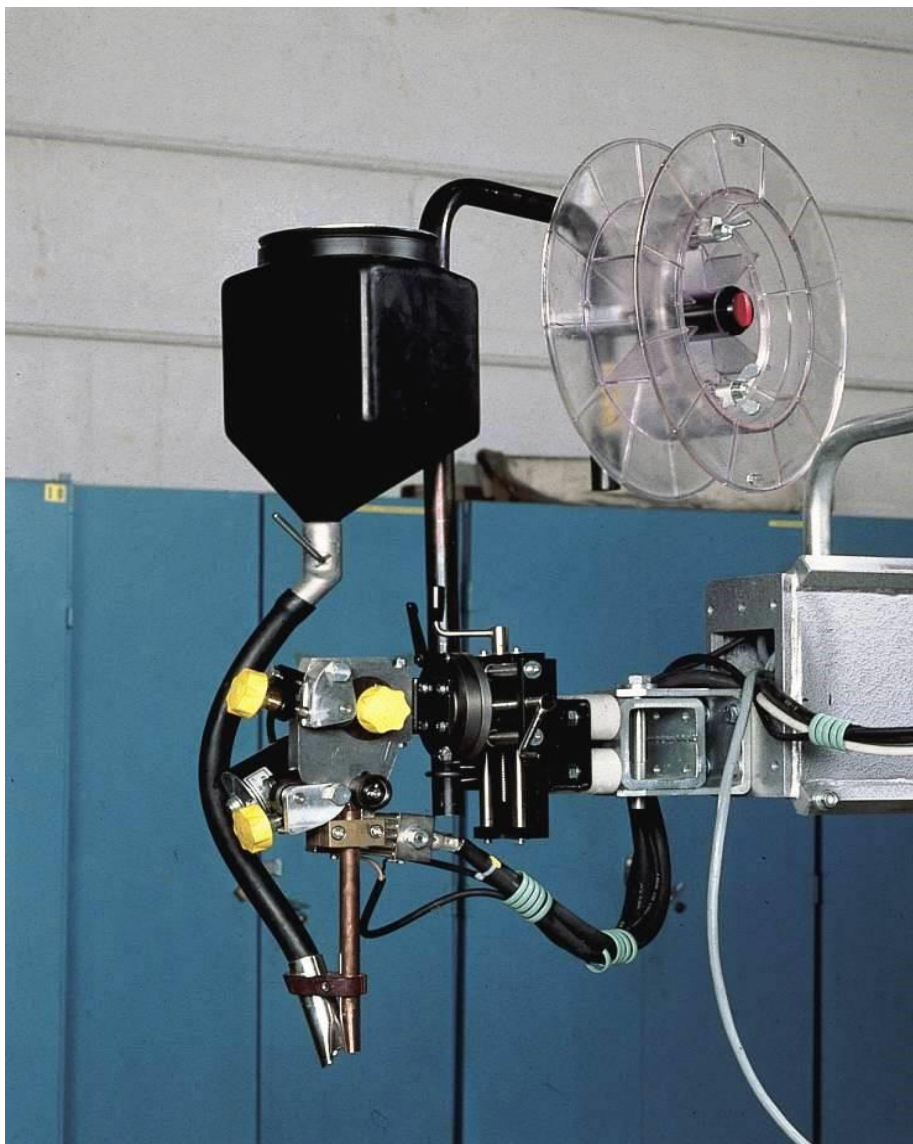


Рисунок 2.5 – Головка марки ESAB A2 MINI MASTER

Зварювальна головка ESAB A2 Mini Master SAW Single

A2 Mini Master SAW Single – це автоматична зварювальна система, що поєднує малу вагу, компактність і універсальність застосування. Конструкція системи складається зі стандартних компонентів. Ступінь автоматизації та тип зварювального процесу базового вузла, обраного замовником, можуть бути модифіковані відповідно до конкретних умов роботи.

Відповідні зварювальні головки разом із маніпуляторами вирішують виробничі завдання. Зварювальна головка має супорти для переміщення у вертикальній і горизонтальній осях, які можуть бути оснащені ручним або моторизованим регулюванням. Також передбачена можливість зміни кута нахилу в поздовжній і поперечній площині.

A2 Mini Master SAW Single призначена для зварювання під флюсом у складних умовах із високими вимогами до функціональності та надійності.

Вертикальний і горизонтальний супорт із ручним регулюванням та спеціальні кільцеві слайди забезпечують унікальну можливість 4-осьового позиціонування зварювальної головки.

Зварювальна головка оснащена підпружиненим щупом для контролю положення щодо зварного стику та 6-літровим бункером для флюсу з можливістю встановлення системи рециркуляції.

Також головку можна оснастити комплектами для зварювання розщепленою дугою або для зварювання у захисних газах. Механізм подачі з пристроєм спрямлення забезпечує рівномірну подачу дроту, зменшує знос контактних частин та підвищує стабільність зварювальних процесів.

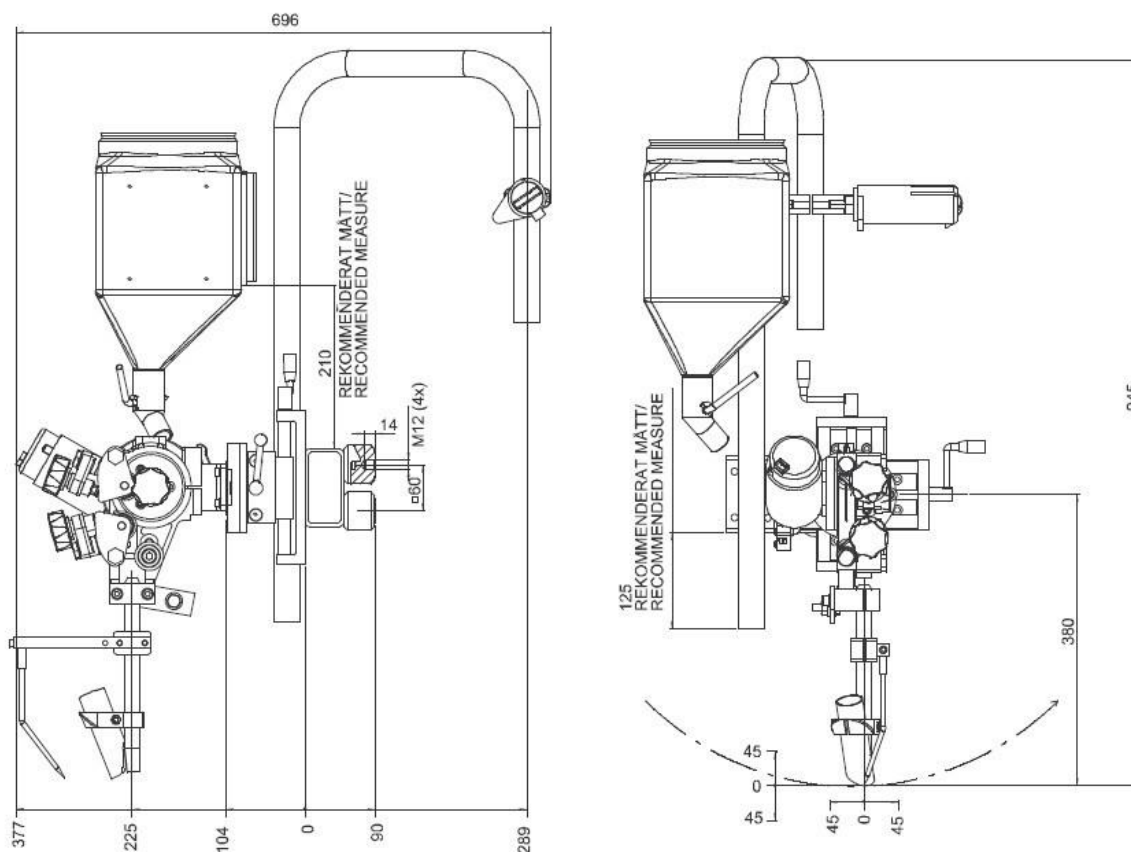


Рисунок 2.6 – Схематичне зображення зварювальної головки

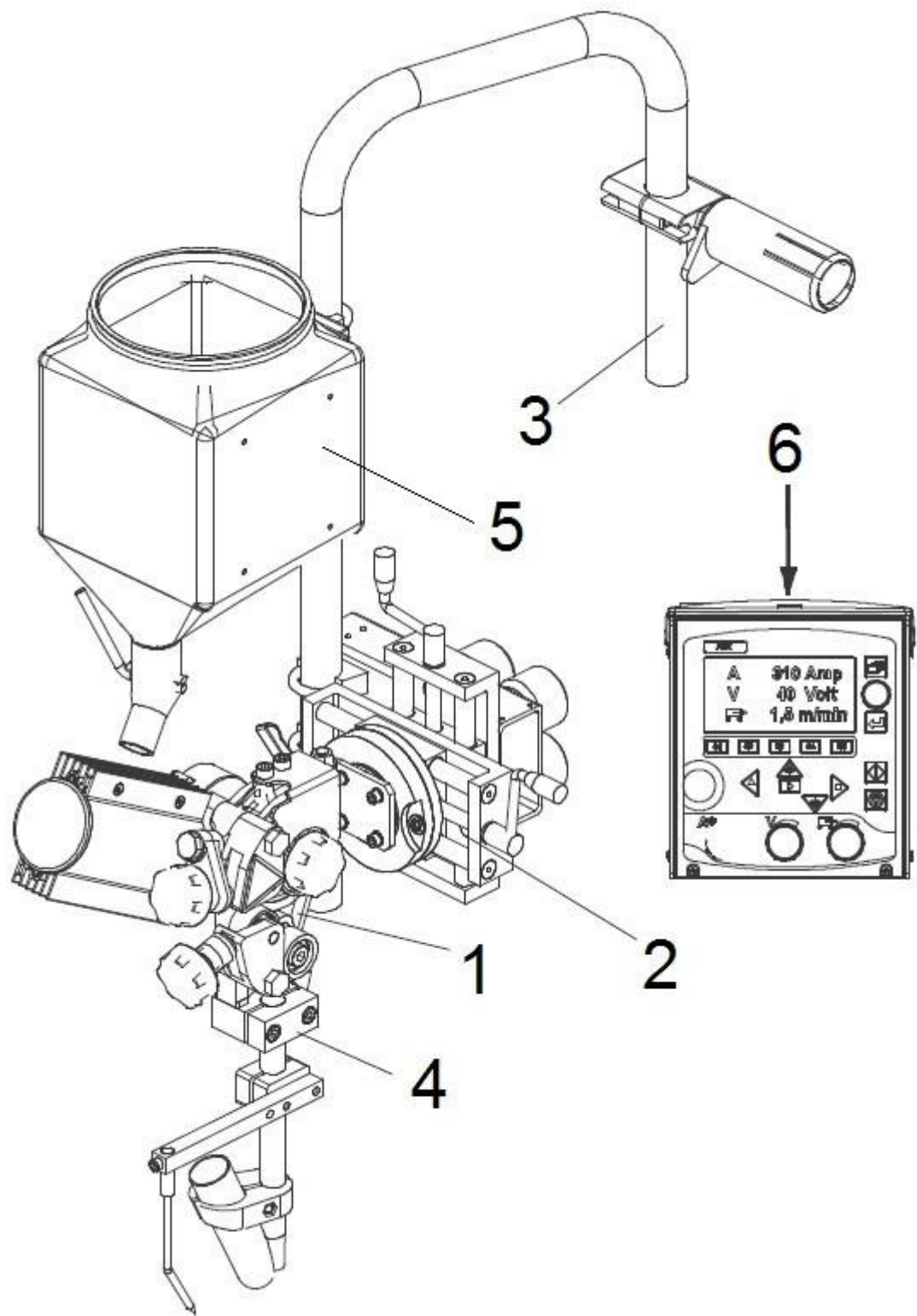


Рисунок 2.6 – Схематичне зображення зварювальної головки

1 – зв. дріт, 2 – механізм подачі дроту, 3 – стійка кріплення, 4 – пальник, 5 – бункер для флюсу, 6 – пульт керування.

Таблиця 2.3 – Технічні характеристики зварювальної головки

Країна виробник	Швеція
-----------------	--------

Виробник	ESAB
Максимальний зварювальний струм	800 А
Мінімальний діаметр дроту	1.6 мм
Максимальний діаметр дроту	4 мм
Мінімальна швидкість подачі дроту	0.2 м/хв
Максимальна швидкість подачі дроту	9 м/хв
Ступінь захисту IP	10
Вага	23 кг
Місткість котушки для зварювального дроту (кг)	2 x 30



Рисунок 2.7 – Пульт керування головкою

Дана зварювальна головка комплектується персональним джерелом живлення типу ESAB LAF 1001



Рисунок 2.7 – Джерело живлення зварювальної головки

Таблиця 2.4 – Технічні характеристики джерела живлення

Виробник	ESAB
Країна виробник	Швеція
Напруга холостого ходу	52 В
Частота струму	60 Гц
Коефіцієнт корисної дії	84 %
Ступінь захисту IP	23
Напруга живлення	400 В
Максимальний зварювальний струм (А)	800
Вага	330
Габаритні розміри	
Ширина	552 мм
Довжина	646 мм
Висота	1090 мм

Джерела постійного зварювального струму серії LAF – висока продуктивність та надійність

Серія LAF (ЛАФ) – це трьохфазні тиристорні джерела з примусовим повітряним охолодженням, призначені для високопродуктивних механізованих способів зварювання, таких як зварювання під флюсом або плавким електродом у середовищі захисних газів (MIG/MAG).

Особливості:

- **Широкий діапазон застосування:** Джерела забезпечують стабільні зварювальні характеристики у всьому діапазоні налаштувань струму та напруги.
- **Можливість паралельного підключення:** Для збільшення зварювального струму можна використовувати додатковий блок.
- **Інтеграція з цифровими системами:** Підтримка сучасних протоколів обміну даними, таких як TCP/IP, Anybus, Profibus, CAN, для побудови автоматизованих комплексів.
- **Спільна робота:** Працює у парі з головами ESAB A2, A6 та блоками управління РЕК або РЕІ (тільки для A2).
- **Клас захисту:** IP23 – для надійного використання у виробничих умовах.

3. КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

При виготовленні корпусу цистерни для нафтопродуктів використовується стикове з'єднання рисунок 3.1, тому розрахунок будемо проводити саме для стикових швів. Схематичне зображення розташування основних зварних швів при виготовленні цистерни показано на рисунку 3.1

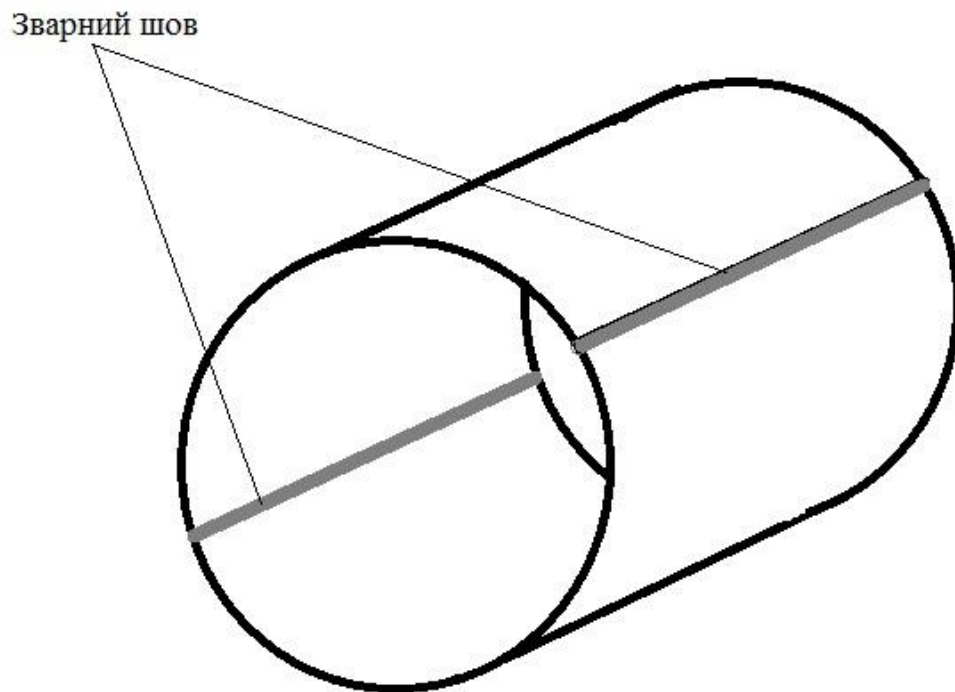


Рисунок 3.1 – Схематичне зображення зварного стикового з'єднання

Проведемо розрахунок міцності нашого зварного шва за формулою:

$$[\sigma'] = \frac{P \cdot r}{2 \cdot S}, \quad (3.1)$$

де $[\sigma']$ – допустиме напруження при розтягу металу зварного шва,

$$[\sigma'] = 0.9[\sigma] = 0.9 \cdot 175 = 157.5 \text{ МПа},$$

$$\text{де } [\sigma] = \frac{\sigma_B}{n} = \frac{350}{2} = 175 \text{ МПа},$$

тут n – наш коефіцієнт запасу міцності;

r – радіус заготовки, $r=600$ мм,

S – товщина стінки, $S=10$ мм.

Звідси допустимий тиск який може витримати наш виріб:

$$P = \frac{2 \cdot [\sigma'] \cdot S}{r} = 1,58 \cdot 10^6 \text{ Па} = 3,58 \text{ МПа}, \quad (3.2)$$

При виготовленні конструкцій необхідної якості потрібно забезпечити правильне складання деталей майбутнього виробу, тобто їх взаємне розміщення і чітке закріплення. Для цього, завжди, в зварювальному виробництві всюди використовується скл. устаткування.

При виборі типу пристосувань має бути забезпечено наступні вимоги:

- а) повну можливість механізації всіх транспортних операцій ;
- б) швидкість та надійність чіткого базування ;
- в) зручність складальних та всіх зварювальних операцій ;
- г) поне та ефективне закріплення деталей у використаних пристосуваннях.

В залежності та задля дотримання функціонального призначення складальне устаткування також поділяється на власне складальне і складально-зварювальне. Якщо на складальному устаткуванні операції складання закінчуються прихопленням деталей, то на складально-зварювальному устаткуванні, ще крім складання також проводиться повне чи часткове зварювання виробу, а також витримування після зварювання для зменшення зварювальних деформацій. Отже при цьому операцію зварювання можнатакож виконувати після попереднього прихоплення або й без нього. Вибір будь якого устаткування визначається власне технологічним процесом, що залежить від виробу, його форми, геометричних та просторових розмірів, необхідної чіткої точності, типу виробництва, програми його випуску, наявності необхідних виробничих площ, завантаженості робочих місць, а також обраного способу зварювання.

Для цього ми будемо використовувати складально-зварювальне пристосування як для складання так і для зварювання корпусу цистерни. Оскільки дане з'єднання слід проводити двобічним зварюванням, то за допомогою спеціального стенда проводимо зварювання із внутрішньої та із зовнішньої сторони.

Обґрунтування вибору баз

Установчою базою може вважатися кожна поверхня деталі, якою деталь дотикається до установчих поверхонь. Завдяки такому контакту з цими поверхнями - деталь займає чітко визначене місце відносно зварювального устаткування.

Розташування складальних деталей в конкретному пристосуванні здійснюється за правилом головного базування. Положення будь якого тіла в просторі визначається 6 степенями вільності – переміщення вздовж 3 взаємно перпендикулярних вісей та обертанням навколо них. Тіло щоб зафіксувати, необхідно обмежити всі степені вільності. Цього можна досягнути притисканням тіла мінімум до шести опорних точок, які мусять знаходитись на 3-ох взаємно перпендикулярних площинах.

В нашому випадку (корпус цистерни) це циліндрична деталь, тому виконуємо базування як на призму. Призмою називають такий установчий елемент із робочою поверхнею що має форму пазу, утвореного двома площинами, що взаємнонахилені під деяким кутом α . 2 площини утворюють ролики нашого роликового стенду, які і забезпечують надійне базування виробу при зварюванні, оскільки більшість операцій здійснюється саме на цьому пристосуванні.

Базування деталей здійснюється із повним врахуванням головної специфіки складання декількох деталей (в чіткій послідовності їх встановлення за картою тех. процесу). Основна специфіка складання під зварювання завжди полягає в необхідності чіткої послідовної орієнтації всіх деталей майбутнього виробу, та їх з'єднання у повній відповідності з розмірами складального технічного креслення, тимчасового закріплення перед самим зварюванням з допомогою розрахованих чи обраних затискних пристроїв.

Отже вибір правильної схеми базування має забезпечувати дотримання чіткого технологічного процесу виготовлення та неухильної правильності складання майбутнього виробу.

Основною технологічною складністю при виборі потрібної схеми базування майже завжди є правильне визначення головних точок базування, і усвідомлений вибір відповідних площин базування.

В даному випадку таку схему базування забезпечує основне складально-зварювальне пристосування, в нашому випадку- роликовий стенд.

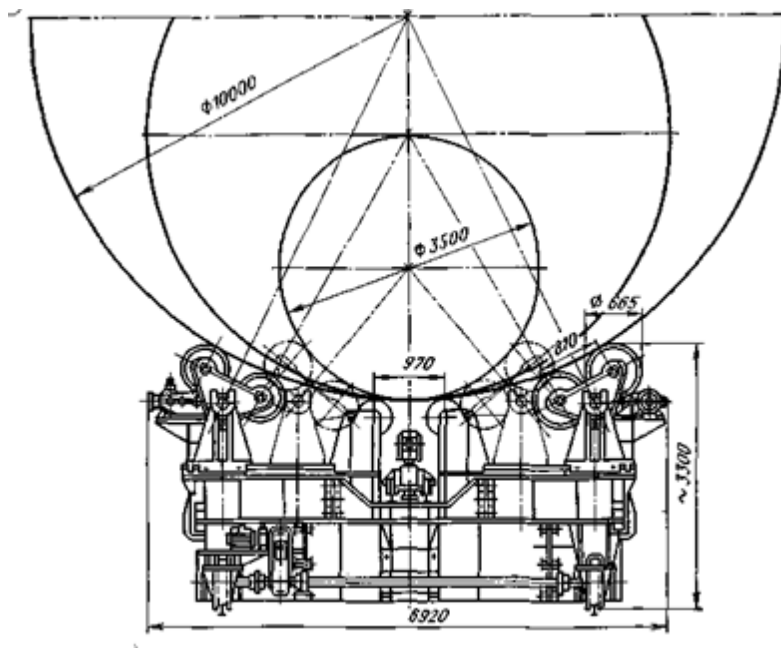


Рисунок 3.2 – Схема роликового стенда для базування деталей циліндричної форми

Беручи до уваги технічні міркування, для встановлення, зафіксування та знерухомлення в пристосування частин корпусу цистерни використовуємо постійні упори, а також притискачі із затискачами на пневматичному приводі.

Вмикання пневматичних та силових приводів здійснюється із допомогою кранів. Пневматичні притискні циліндри односторонньої дії обладнані, зазвичай, триходовими кранами, а пневматичні циліндри двосторонньої дії –кранами, що звуться чотириходовими.

Пневматичний провід для заживлення пневматичних циліндрів має бути достатнього діаметру. Падіння тиску в його конструкції допустиме в межах 10%.

Пневматичні приводи заживлюються стисненим повітрям, яке ретельно очищене фільтрами від пилу та атмосферної вологи, що суттєво підвищує їхню надійність та довговічність.

Якщо обране пристосування має кілька пневмо-циліндрів, то їх спрацювання проходить одночасно, або у заданій нами послідовності. Тому в таких випадках маємо мати хоча б один кран. Для надлишкового знешумлення, спрацьоване повітря випускають через спеціальні пневмо-глушники.

Закріплення вихідних складових одиниць здійснюється за допомоги пневматичних затискачів.

З метою повного забезпечення необхідного зусилля для притискання і більш якісного закріплення зварювальних одиниць, попередньо проводяться розрахунки пневматичних циліндрів.

Серед основними параметрів пневматичних циліндрів є внутрішній діаметр D а також хід поршня L . Діаметр D визначається, зазвичай, в залежності від необхідного нам зусилля. Для обраного пневматичного циліндра двосторонньої дії мінімально необхідне зусилля на штоку P і діаметр D знаходяться в такій залежності

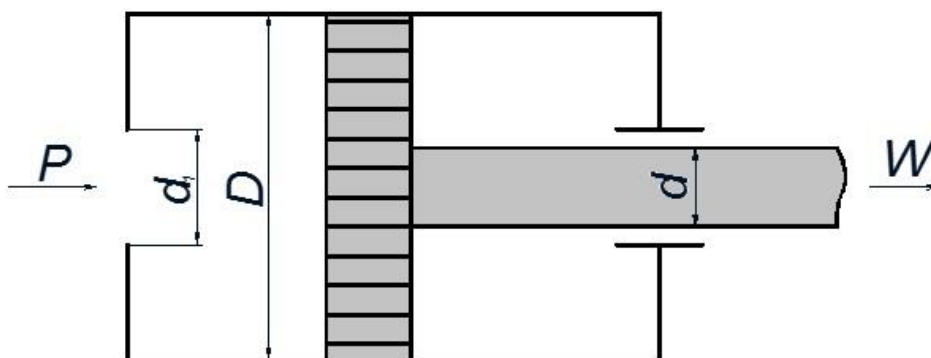


Рисунок 3.3 – Схема пневмоциліндра

$$P = \frac{p \cdot F}{\eta}, \quad (3.1)$$

де p – тиск повітря всередині пневмоциліндра, МПа ($p = 0,4$ МПа);

F - площа поршня (з боку, протилежному штоку), мм²;

η – коефіцієнт корисної дії ($\eta=0,08$).

Для визначення необхідного нам зусилля на штоці P , маємо скласти рівняння моментів сил:

$$P \cdot 160 + P_1 \cdot 112 = 0, \quad (3.2)$$

де P_1 - необхідне нам зусилля притискання деталі, МПа,

З даного рівняння можемо визначити необхідне зусилля на штоці поршня:

$$P = \frac{2 \cdot 10^3 \cdot 112}{160} = 1400 \text{ Н} \quad (3.3)$$

З формули (3.1) знаходимо необхідний діаметр пневмоциліндра:

$$D = \sqrt{\frac{4P}{\pi \cdot p \cdot \eta}}. \quad (3.4)$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot 1400}{3,14 \cdot 0,4 \cdot 0,8}} \approx 64,76$$

Заокруглюючи знайдений нами результат до найближчого стандартного значення можемо прийняти $D = 65$ мм.

Розрахунок необхідних нам зусиль притискання вихідних елементів конструкції

Розрахунок необхідних зусиль - процес трудомісткий. Зусилля затискання потрібно розраховувати для обмеження вільних переміщень, котрі виникають через деформування основи конструкції в процесі зварювання та подальшого

охолодження, а також для затискання деталей при початковому чи так званому базовому складанні та для забезпечення повної відсутності зазорів між вихідними деталями виробу.

Для складання корпусу цистерни необхідно спроектувати всі затискні елементи пристосувань для притискання складових частин.

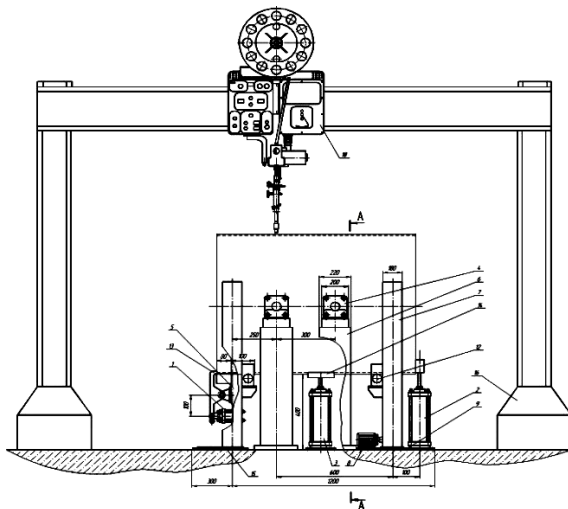
Такі зусилля необхідні для виправлення та надання листовому металу форми обичайки цистерни, а також для притискання деталей в процесі складання та забезпеченні всіх необхідних зазорів між деталями виробу при зварюванні.

Враховуючи попередній виробничий досвід більшості виробництв та проектних організацій, приймаємо для закріплення деталей, зусилля кожного окремого затискача в межах 2 ... 6 кН.

Враховуючи масу нашого пристосування та власне виробу, вибираємо зусилля притискання деталей - 2 кН.

Опис конструктивних схем пристосувань

Складально-зварювальна установка (рис. 3.1) складається із зварювальної головки. Пересування такої головки здійснюється по направляючій рейці при участі самохідного візка. Установка для повного складання та автоматичного зварювання обичайки цистерни забезпечує надійне закріплення виробу до, і на час зварювання пневматичними циліндрами, які закріплені на персональних стійках, стійками ролико-опорними та рухомим колінним важелем, який приводиться в дію обрахованим пневматичним циліндром. Власне обертання обичайки цистерни в процесі зварювання здійснюється спеціальними роликами на ролико-опорах.



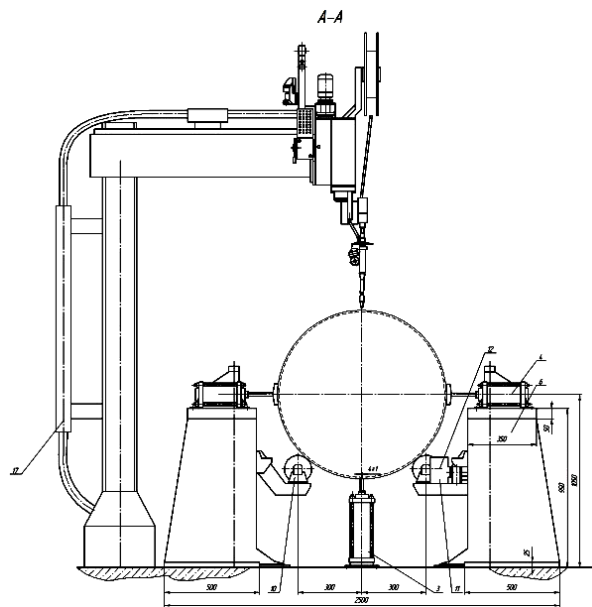


Рисунок 3.4 - Установка для полного складання і автоматичного зварювання обичайки цистерни

Складально-зварювальна установка (рис. 3.6 та 3.5) складається із зварювальної головки описаної в попередньому розділі. Пересування такого апарата здійснюється як завжди по направляючій рейці за допомогою самохідного технологічного візка. Напівсферичні заготовки фіксуються для зварювання із циліндричною частиною корпусу цистерни за допомогою пневматичного циліндра а також рухомої бабки на головному валу. Після проведення власне зварювання корпусу, пневматичними циліндрами забезпечується вивільнення готової конструкції та переміщення по спеціальному нахиленому столу.

4. НАУКОВО ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

У цій частині розглянемо характеристики мікроструктури зварних з'єднань.

Відомо, що збільшення межі текучості підвищує вантажопідйомність і знижує вартість транспортування. Таким чином, висока міцність у поєднанні з високою ударною в'язкістю і формуваністю є основною вимогою в сталеливарній промисловості для виготовлення металевих ємностей. Додавання мікролегуючих елементів, наприклад Nb, V, Ti і Mo, у в поєднанні з передовою технологією термомеханічного контрольованого управління прокаткою (ТМСР) може забезпечити чудове поєднання міцності і ударної в'язкості. Мікролегуючі елементи, такі як Ti і Nb, утворюють дрібнодисперсні карбідні і карбонітридні виділення при ТМСР високоякісних низьколегованих сталей, які підвищують міцність сталі. Встановлено, що досить однорідні дисперсні частинки, що містять мікролегуючі елементи Nb, Ti і V, ефективно гальмують ріст аустенітного зерна. Крім того, добавки Mo, Nb і Cu сприяють формуванню бейнітної мікроструктури.

Вплив розміру карбіду на руйнування може бути опосередковано пов'язаний з розміром зерна. Як відомо найбільший розмір карбідів у мікроструктурі пропорційний розміру феритного зерна у відпалених або нормалізованих сталях. Розмір зерен важливий, навіть коли тріщини зародилися частинками або колоніями перліту, тому що зерна навколо джерела відколу можуть контролювати поширення тріщини. Більші зерна, якщо вони присутні навколо джерела відколу, сприяють зростанню зародженої тріщини більше критичного розміру, необхідного для нестабільного поширення, перш ніж вона зможе бути заблокована межею зерна. В результаті руйнування відбувається при більш низьких напруженнях, ніж потрібно, коли навколо початку відколу присутні більш дрібні зерна. Так, відзначається наявність нерозповсюджених тріщин розміром з феритне зерно на поверхні зламу, великі фасетки відколу в зародку тріщини (більше, ніж середній розмір фасетки), і краща кореляція між напруженням руйнування і найбільшим напруженням тріщин відколу. Розмір зерна (а не середній розмір зерна) в зруйнованих зразках феритно-перлітної сталі важливий при зародженні і поширенні тріщини відколу.

Водночас слід розуміти, що в обсязі конструкційного матеріалу просторові неоднорідності можуть виникати в різних формах, таких як неоднорідний розподіл

неметалевих включень і виділень, просторовий розподіл перліту і фериту, змішана (дрібно- і крупнозерниста) зерниста структура (або кристалографічна текстура). Просторова неоднорідність у будь-якій формі може призвести до більш широкого, ніж зазвичай, розкиду результатів в'язкості руйнування залежно від локальної мікроструктури, відібраної на «критичній відстані» (на якій локальне розтягуюче напруження перевищує напруження відколу). Розмір зерен у низьколегованих сталях може бути неоднорідним, а в деяких сталевих пластинах, підданих термомеханічному контролю прокатки (TMCR), спостерігався бімодальний розподіл зерен фериту за розмірами (великі зерна присутні в матриці з дрібних зерен). Отже, в залежності від того, великі чи дрібні зерна знаходяться біля основи надрізу, значення напруги руйнування для бімодальної феритної структури можуть відрізнятися.

Розуміння розкиду значень енергії Шарпі для сталей після TMCR дуже важливе з промислової точки зору. Однак з наукової точки зору важко вивчити вплив гранулометричного складу на ударну в'язкість за допомогою випробувань за Шарпі. Випробування за Шарпі часто створюють складні поверхні руйнування, які ускладнюють ідентифікацію вихідного місця початку розщеплення. Наприклад, показано, що при випробуванні з тупим надрізом, якщо в активній зоні безпосередньо перед коренем надрізу присутня крупнозерниста смуга, то великі зерна ініціюють скол, і це призводить до низької напруги руйнування при сколюванні. Однак якщо великі зерна відсутні біля основи надрізу, то дрібні зерна ініціюють сколювання, і значення напруги руйнування вище. Аналогічним чином в області ударного переходу Шарпі (ІТ) величина площі пластичного руйнування залежить від розташування крупнозернистої смуги відносно кореня надрізу. Якщо крупнозерниста смуга розташована близько до основи надрізу, то руйнування відколу починається з цього місця, що призводить до низької енергії удару. Однак якщо крупнозерниста смуга розташована далеко від основи надрізу, то спочатку буде поширюватися пластична тріщина, що поглинає більш високу енергію удару.

Додавання великої кількості мікролегуючих елементів є серйозною проблемою для зварюваності трубопровідної сталі через підвищений

еквівалентний вміст вуглецю, особливо це стосується елементів Ni, V, Cr, Mo.

Прогнозування ударної в'язкості на основі мікроструктурних характеристик металів зварних швів є складним через велику кількість задіяних параметрів. Звичайна практика, що пов'язує цю властивість з мікроструктурою останнього валика багатопрохідного зварювання, виявилася незадовільною, оскільки кількість голчастого фериту, найбільш бажаного компонента, не завжди може вносити основний внесок в ударну в'язкість. Такі параметри, як рекристалізована фракція, наявність мікрофаз і включень, також можуть відігравати важливу роль.

Ця ситуація є більш актуальною для зварних металів з високоміцних та низьколегованих сталей, де дуже дрібні мікроструктури не можуть бути чітко визначені, що, призводить до неправильної ідентифікації мікроструктури. Використання скануючої електронної мікроскопії як допоміжного методу до оптичної мікроскопії вже багато десятиліть успішно застосовується для дослідження C-Mn і низьколегованих металів зварних швів, головним чином при оцінці уточненої мікроструктури. Нещодавно, на додаток до раніше згаданих методів, дифракція зворотного розсіювання електронів (EBSD) також була використана для забезпечення більш ефективної аналітичної процедури. Цей метод, який дає цінну інформацію про межі зерен, корисний для уточнених мікроструктур з метою підтвердження таких складових, як голчастий ферит, бейніт і мартенсит.

Механічні властивості трубних високоміцних низьколегованих сталей багато в чому залежать від їх складної мікроструктури. Однак точний кількісний вплив окремих мікроструктурних елементів (наприклад, дислокацій, меж зерен, фазових меж, об'ємних часток відповідних компонентів мікроструктури, типів фаз, дисперсії та форми мартенситних острівців тощо) зазвичай нелегко виміряти традиційними оптичними методами мікроскопії. Таким чином, це загальне питання, як отримати кількісні значення типів і кількостей цих різних мікроструктурних інгредієнтів та їх топологічних особливостей. Різні методи дифракції електронів, що використовуються в основному в скануючій електронній мікроскопії (SEM), здатні дати вичерпні відповіді на ці питання. Сучасні скануючі електронні мікроскопи з термоавтоелектронними гарматами, різними чутливими детекторами і гнучкими предметними столиками є надзвичайно універсальними

інструментами для детального і кількісного аналізу мікроструктури об'ємних зразків з високою роздільною здатністю, з великою статистикою, в 2D і 3D, а також з можливістю роботи в різних видах натурних спостережень. Найбільш важливими сигналами, які необхідно виявити для мікроструктурного аналізу, є зворотньо розсіяні електрони (BSE) для контрастної візуалізації по каналах електронів (ECCI) і орієнтаційна мікроскопія на основі дифракції зворотнього розсіювання електронів (ORM), а також характеристичні рентгенівські промені для композиційного аналізу за допомогою X-променевої спектроскопії (XEDS) і вторинних електронів (SE) для спостереження за морфологією поверхні.

Мета роботи полягає в оцінці різних мікроструктур металів зварних швів С-Мп і високоміцних та низьколегованих сталей на основі аналізу різних досліджень, проведеного методами оптичної мікроскопії, скануючої електронної мікроскопії та методів EBSD з урахуванням впливу рекристалізації в багатопрохідних зварних швах, мікроструктурних складових, мікрофаз і включень. Завданням аналізу є встановлення взаємозв'язку мікроструктури і в'язкості деяких експериментальних результатів, отриманих за останні десятиліття для металів зварних швів з межею міцності при розтягуванні від 400 до 1000 МПа.

На рис. 4.1 показано вплив вуглецевого еквівалента на міцність і ударну в'язкість металу зварного шва з оглядової роботи. Показано, що $S_{\text{екв}}$ має хорошу залежність від межі міцності при розтягуванні металів шва (рис. 1, *a*), і деякі роботи показали майже лінійне збільшення межі міцності металу шва при збільшенні $S_{\text{екв}}$.

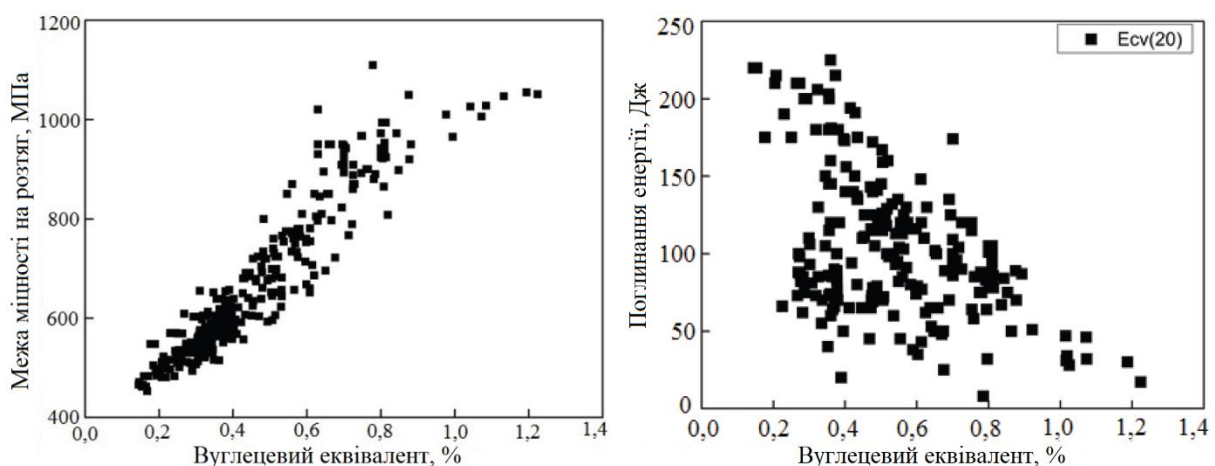


Рис. 4.1 – Вплив вуглецевого еквівалента на міцність при розтягуванні (а) і ударну в'язкість при 20 °С металів шва (б).

Видно, що зі збільшенням міцності металу спостерігається великий розкид значень, що може бути пов'язано з різною швидкістю охолодження, оскільки висока прогартовуваність сплавів сприяє однаковій мікроструктурі всього металу зварного шва. Однак невеликі відхилення в швидкостях охолодження викликають істотні зміни кількості мартенситу, бейніту і голчастого фериту. На рис. 4.2 показано, що висока смуга розкиду спостерігається, коли високоміцні метали зварного шва піддаються охолодженню за різний час перебування в інтервалі температур 800–500 °С.

Стандарти допускають більш широкий діапазон легуючих і мікролегуєчих елементів, тому кожен виробник пропонує свій власний хімічний склад для досягнення вимог до кваліфікації. Вуглецевий еквівалент $C_{\text{екв}}$ був включений в стандарт, оскільки він зазвичай пов'язаний з прожарюваністю.

Межі для $C_{\text{екв}}$ були розраховані на основі мінімального і максимального вмісту легуючих елементів. Тому завжди краще нижче значення $C_{\text{екв}}$, що вказує на хорошу зварюваність. В Європі розраховується критичний параметр металу, що позначається P_{cm} . Показник $CE P_{\text{cm}}$ взятий з документів Японського товариства інженерів зі зварювання; $CE P_{\text{cm}}$ був запропонований спеціально для перевірки зварюваності низьколегованих сталей. Баланс чудової міцності та ударної в'язкості може бути порушений після термоциклювання, яке відбувається під час зварювання, викликаючи погану ударну в'язкість у зоні термічного впливу (ЗТВ).

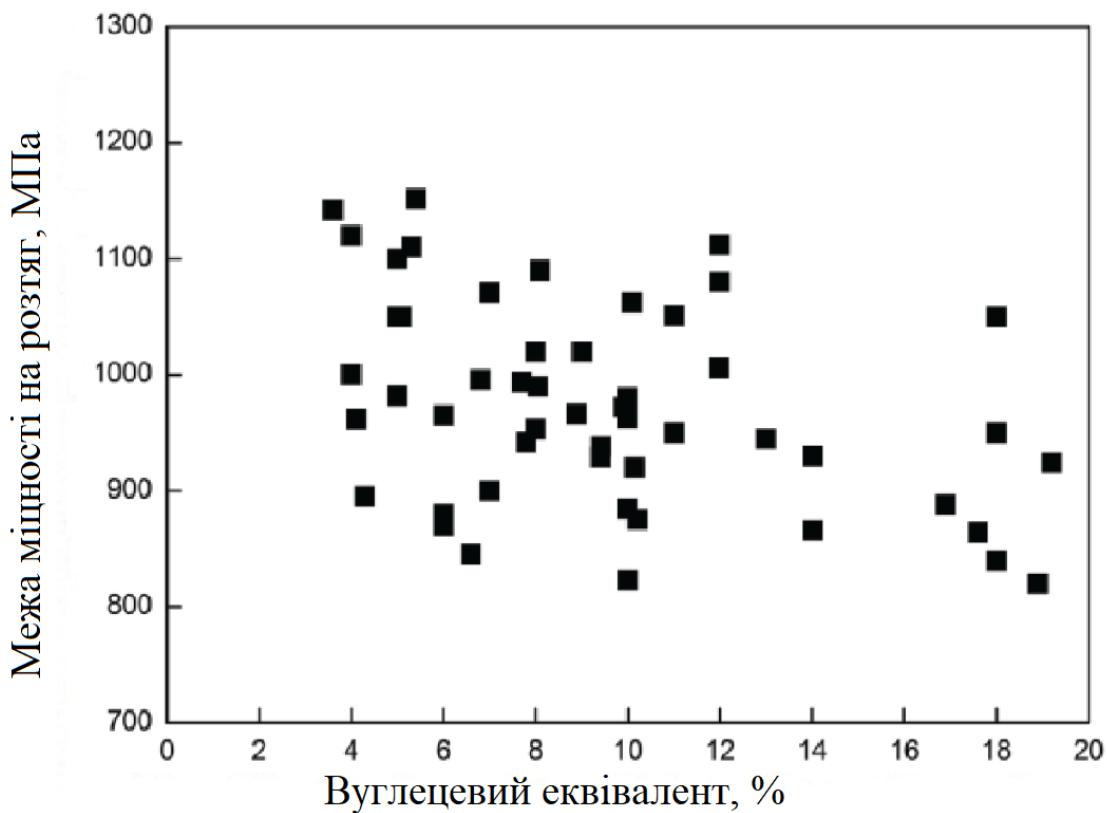


Рис. 4.2 – Вплив швидкості охолодження (Δt 8/5) металу зварного шва на межу міцності на розрив високоміцних сталей трубопроводів

Сучасні низьколеговані сталі, що мають високу міцність і високу ударну в'язкість, знайшли широке застосування в трубопроводах, суднобудуванні та різних галузях обробної промисловості. Зміни в технології виробництва сталі та процесі прокатки сталі становлять проблему для виробництва зварювальних матеріалів і технології з'єднання. Важливо відзначити, що на відміну від виробництва деформованої сталі міцність і в'язкість металів зварних швів, як правило, повинні досягатися шляхом легування. Як наслідок, через складність зварювальних процесів і обмеження теплових вкладень, а значить, і швидкостей охолодження, в'язкість металу шва при низькій температурі нижча, ніж основного металу. Крім того, мікроструктура металів шва з межею текучості 600 МПа і вище складається в основному з бейніту і мартенситу, а не з мікроструктури з переважанням голчастого фериту, тому розрахунок основного складу металу шва повинен бути різним для кожного випадку. Фактично для тих застосувань, де міцність металу зварного шва, що складається з голчастого фериту, недостатня, необхідно додавання спеціальних елементів зміцнення для твердого розчину та

інших легуючих елементів, щоб уповільнити перетворення аустеніт/ферит і отримати мартенситні зварні шви з необхідною високою міцністю.

Досліджено зразки, отримані методом автоматичного дугового зварювання металевим електродом (дротом) під шаром флюсу і в середовищі вуглекислого газу. Метою було оцінити (рис. 4.3), чи може використання процесу зварювання під флюсом сприяти підвищенню продуктивності зварних швів низьколегованих сталей при збереженні хорошої якості навіть при більш низькому рівні повторного нагрівання. Було виявлено, що можна отримати хороший взаємозв'язок між механічною міцністю і ударною в'язкістю.

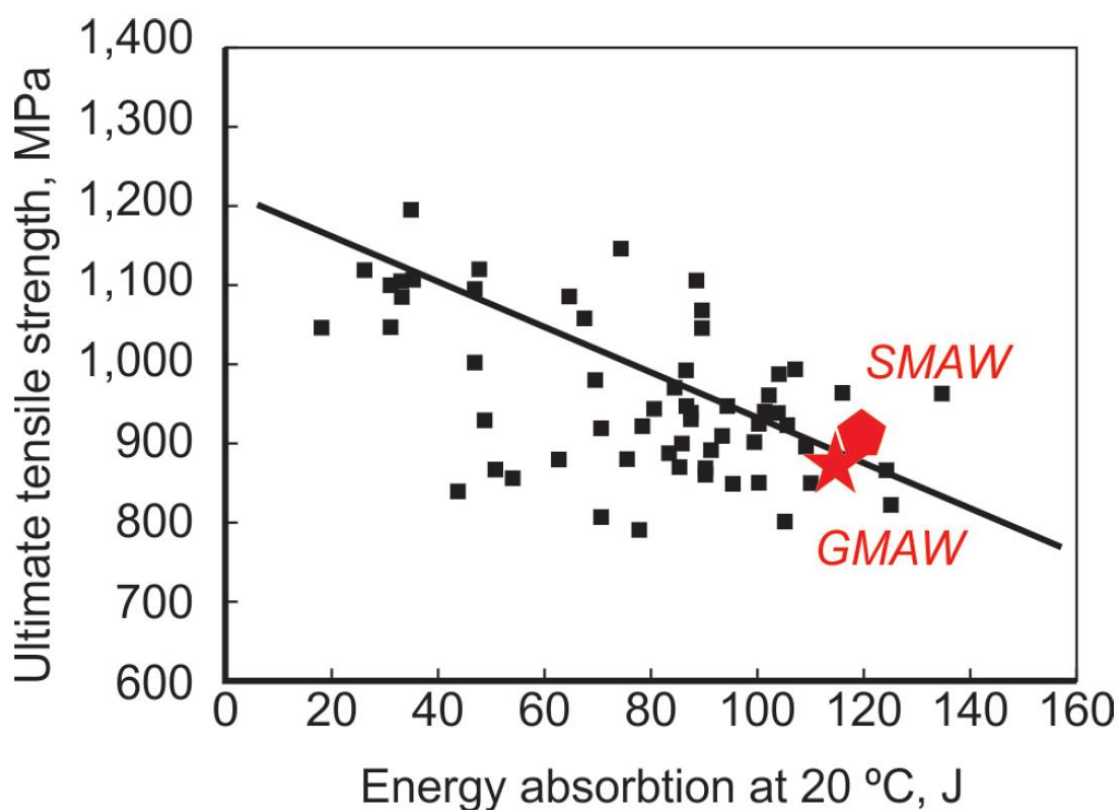


Рис. 4.3 – Залежність між механічною міцністю і ударною в'язкістю наплавлених металів низьколегованих сталей в залежності від способу зварювання

Багатопрхідне зварювання широко використовується при виробництві ємностей, кільцевому зварюванні стикових з'єднань, а також при зварюванні в процесі експлуатації. Для автоматичного зварювання ємностей великого діаметру зазвичай використовується метод кореневого зварювання внутрішньою зварювальною машиною і зварювання кришки зовнішньою зварювальною

машиною. Група горловини труби спочатку приварюється до внутрішнього кореня трубопроводу за допомогою зварювального робота, а потім проводиться зварювання кореня шва (гарячий прохід), далі заповнювальний і облицювальний шарів зварних з'єднань, як показано на рис. 4.4, де шар 0 – це кореневий зварювальний шов, шари 1–6 складають заповнювальний шар, а шари 7–8 являють собою облицювальний шар. Перший шар завершує сплавлення кореневого шва. Через велику кількість шарів заповнення ймовірність появи браку сильно зростає.

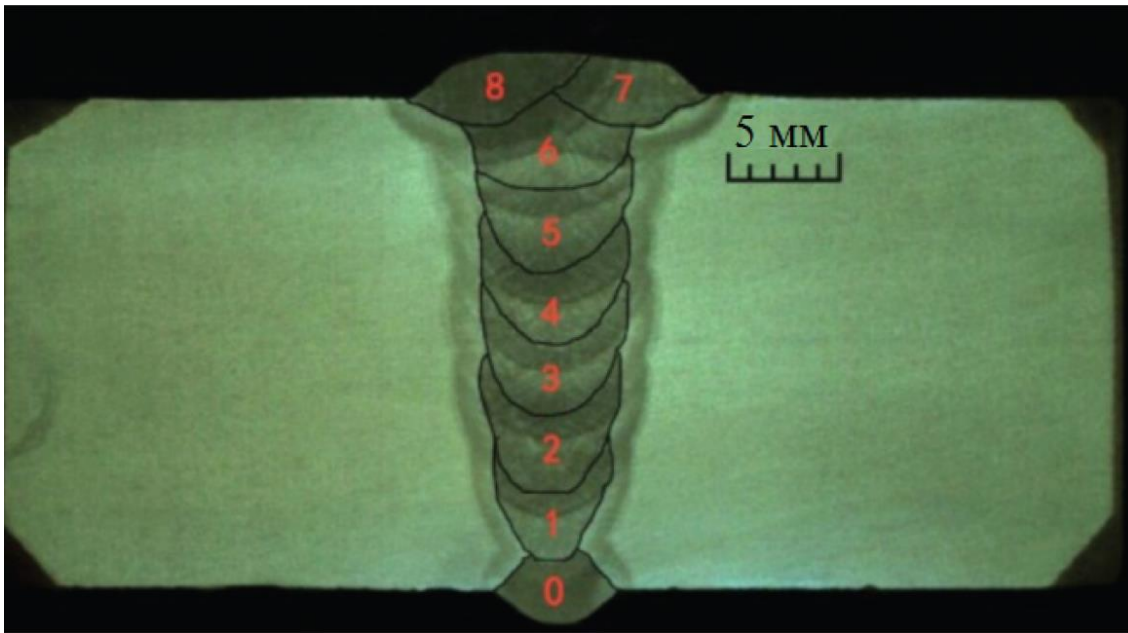


Рис. 4.4 – Поперечний мікрошліф кільцевого зварного з'єднання труб з вузькою обробкою крайок

Термічні цикли, що виникають під час зварювання, характеризуються діапазоном пікових температур, які можуть змінити мікроструктуру і властивості ЗТВ у порівнянні з основним металом. Було встановлено, що надкритичні (повторно нагріті вище A_{c3}) і докритичні (повторно нагріті нижче A_{c1}) області, отримані в результаті другого термічного циклу, зберігають властивості ударної в'язкості, порівнянні з вихідними.

Добре відомо, що ЗТВ є найслабшою частиною зварного з'єднання і визначає безпеку експлуатації конструкції. Зокрема, найнижча ударна в'язкість отримана в крупнозернистій мікроструктурі ЗТВ, яка примикає до лінії сплавлення зварного шва.

Низька ударна в'язкість ЗТВ при низьких температурах є основною проблемою, що обмежує використання низьколегованих сталей для виготовлення ємностей.

Необхідно визнати, що проблеми зварювання низьколегованих сталей далекі від вирішення. Наприклад, відомо, що неметалеві включення, які утворюються в литому металі шва, мають два протилежних впливи на ударну в'язкість. По-перше, включення діють як місця ініціації в'язкого і сколюючого руйнування, а по-друге, вони можуть сприяти утворенню голчастого фериту, який визнаний оптимальною мікроструктурою.

Однією з основних вимог до з'єднань циліндричних конструкцій є отримання металу зварного шва рівної або вищої міцності, ніж у основного матеріалу, щоб уникнути локалізації деформації або руйнування зварного шва під навантаженням. Однак також потрібна достатня міцність, яку зазвичай перевіряють за допомогою випробувань на удар за Шарпі. Поширеним рішенням є розробка зварювального металу з отриманням в структурі металу голчастого фериту (AF), який забезпечує баланс між міцністю і ударною в'язкістю. Цей факт стимулював широкі дослідження механізмів утворення AF в металах зварних швів і визначення того, які фактори контролюють його утворення.

Ключовим фактором формування AF є хімічний склад витраченого зварювального дроту з точки зору як ізолюваного впливу кожного елемента, так і спільної дії загального складу.

Як відомо утворення голчастого фериту в вуглецево-марганцевих наплавках повідомлялося, що на утворення голчастого фериту впливають такі елементи: C, Mn, Si, Ni, Ti, Al, Mo і Nb.

Було досліджено вплив температури аустенізації в діапазоні 850–1000 °C на голчасте феритне перетворення в низьколегованій сталі 17ГС. Як показано на рис. 4.5, початкова і кінцева температури фазового перетворення під час безперервного охолодження, а саме Ar1 і Ar3 відповідно, зменшувалися зі збільшенням температури аустенізації. Цей результат передбачає, що збільшення аустенізації покращує стабільність аустеніту під час охолодження і таким чином затримує розкладання аустеніту. Продукти розпаду аустеніту сталі 17ГС складаються в

основному з полігонального фериту, перліту, голчастого фериту та ін. Підвищення температури аустенізації сприяє утворенню голчастого фериту і перешкоджає утворенню перліту і полігонального фериту (рис. 4.6).

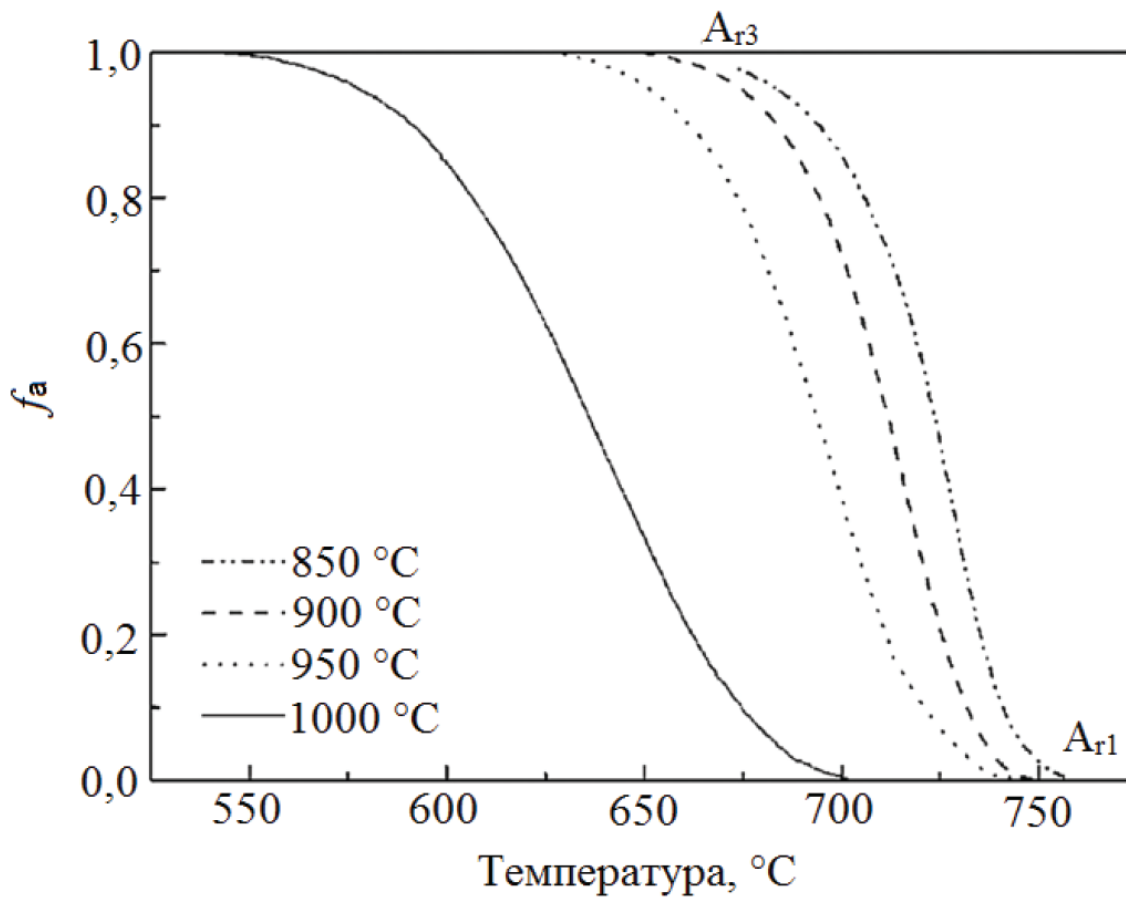
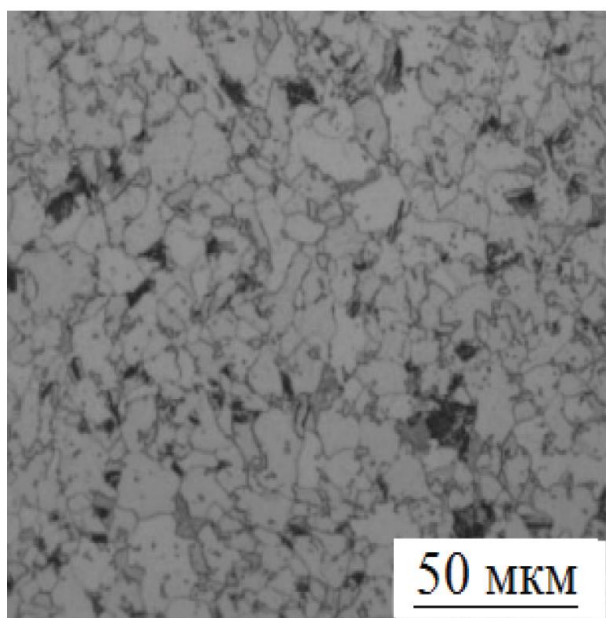
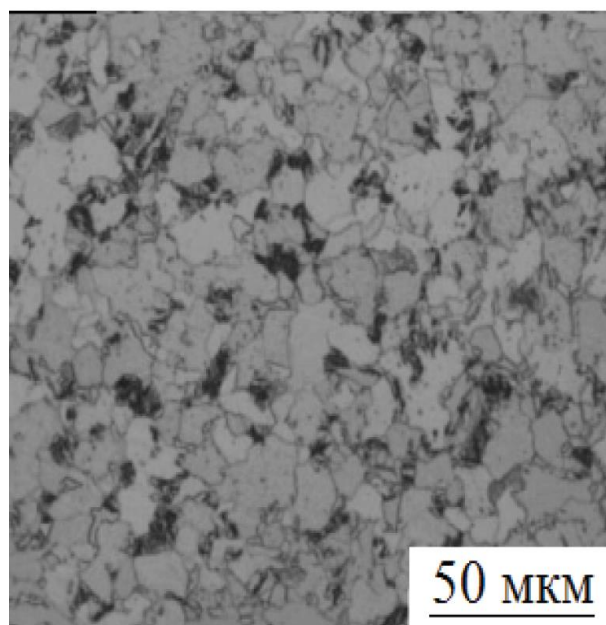


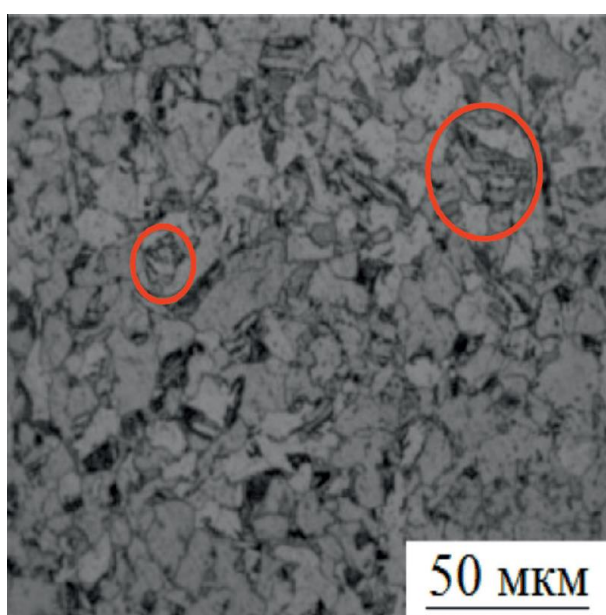
Рис. 4.5 – Частки фазового перетворення, визначені дилатометричними вимірами, залежно від температури при безперервному охолодженні в зразках трубопровідної сталі X65, аустенізованих при різних температурах від 850 °C до 1000 °C



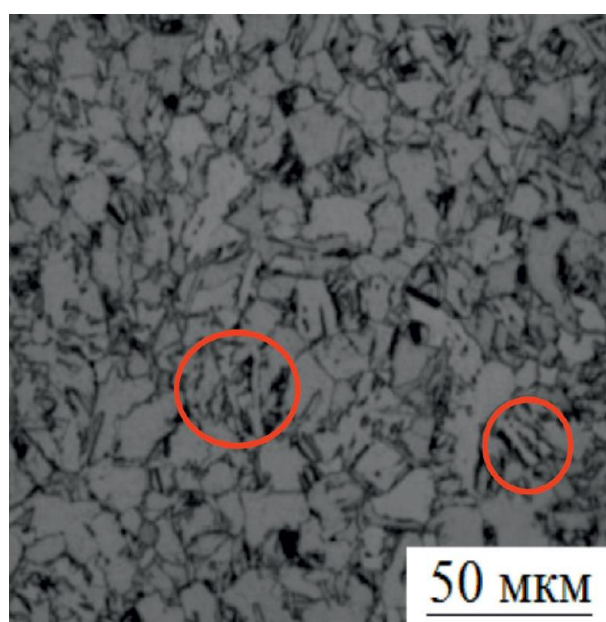
а



б



в



г

Рис. 4.6 – Оптичні мікрофотографії зразків низьколегованої сталі 17ГС після безперервного охолодження з різними температурами аустенізації: 850 °C (а); 900 °C (б); 950 °C (в); 1000 °C (г)

Більш висока температура аустенізації призводить до більш достатнього розчинення карбідотворних елементів, таких як Nb, V і Ti, а також до більш достатньої гомогенізації в аустеніті. Вважається, що розчинені елементи сплаву поліпшують стабільність метастабільного аустеніту. Таким чином, розпад аустеніту затримується до більш низької температури, що також підтверджується рис. 3. Як бездифузійна реакція голчасте феритне перетворення з більшою ймовірністю

відбудеться при відносно низькій температурі, ніж контрольоване дифузією перлітне або полігональне феритне перетворення, оскільки швидкість дифузії атомів знижується зі зниженням температури.

Мідь сприяє утворенню АФ при використанні ручного дугового зварювання. Багато елементів будуть з'єднуватися з киснем, присутнім у металі зварного шва, який можна контролювати за допомогою захисного газу та (або) складу металу зварного шва. Реакція кисню впливає на утворення АФ, або сприяючи утворенню неметалевих включень, таких як оксиди, або пригнічуючи його.

Оксиди діють як центри зародкоутворення АФ, тому збільшення вмісту кисню сприяє утворенню АФ. Утворенню АФ сприяють також великі зерна аустеніту з великою кількістю включень діаметром понад 0,2 мкм. Таким чином, необхідно досягти достатнього попереднього розміру аустенітного зерна і числової щільності неметалевих включень сприятливого хімічного складу, особливо на основі оксидів титану. Однак було також відзначено в багатьох роботах, що якщо кількість неметалевих включень досягає певного рівня в залежності від вмісту кисню, то це згубно впливає на ударну в'язкість, оскільки місця зародження тріщин переважають переваги досягнення тонкої структури АФ.

Два зварювальні матеріали, придатні для з'єднання сталі 17ГС, порівнювалися за мікроструктурою металу зварного шва, твердістю, ударною в'язкістю та властивостями розтягування. Хімічний склад витратних матеріалів був схожим: один з витратних матеріалів мав багатий хімічний склад дроту і містив більш високі легуючі добавки С, Ni, Ti в порівнянні з збідненим дротом. Зварювання валиків на пластину виконувалося з використанням технологічного комплексу газового дугового зварювання (GMAW) для досягнення того ж тепловкладення 0,66 кДж/мм. Результати показали, що для обох дротів мікроструктура металу зварного шва в основному складається з голчастого фериту. Витратний матеріал з більш багатим хімічним складом (С, Ni і Ti) продемонстрував більш високу міцність і твердість завдяки більш тонкій мікроструктурі кінцевого металу зварного шва; проте результати випробувань на удар по Шарпі показали, що дріт з збідненої хімії демонструє більш високу ударну в'язкість при низькій температурі. Оскільки обидва метали зварного шва мали схожу голчасту фериту

структуру, то менша в'язкість зварного шва з більш багатим хімічним складом пояснювалася наявністю включень титану, які можуть стати місцями зародження тріщин.

Відомо, що післязварювальна обробка знижує міцнісні характеристики металу зварного з'єднання. Результати досліджень з оцінки попереднього нагрівання до 200 °C зварювальної обробки зварних з'єднань показали тенденцію до зниження механічної міцності та збільшення ударної в'язкості як наслідок деяких важливих аспектів, таких як нижчий відсоток мартенситу, огрубіння мікроструктури та вища частка великокутових меж ($> 15\%$). Більш тривалий час охолодження (час перебування в інтервалі температур 800–500 °C) демонструє тенденцію до поліпшення ударної в'язкості і зниження механічної міцності наплавлених металів високоміцних сталей.

Для з'єднання листових конструкцій великої товщини необхідне багатопрохідне зварювання, що призводить до перегріву ЗТВ. Це створює свої особливості термічного впливу на метал і, як наслідок, неklasичні фазові та структурні перетворення з різкими градієнтами температур і напружень. Зону ЗТВ (HAZ) можна розділити на крупнозернисту ЗТВ (CGHAZ), дрібнозернисту (FGHAZ), міжкритичну (ICHAZ) і підкритичну (SCHAZ), коли при зварюванні матеріалу застосовується один термічний цикл.

Коли другий зварювальний прохід наноситься поверх існуючого, це призводить до утворення безлічі повторно нагрітих структур ЗТВ, які характеризуються відповідними другими піковими температурами і включають в себе надкритичні, міжкритичні і докритичні структури. Міцність і ударна в'язкість сталі HSLA для трубопроводів можуть значно погіршитися після одного або двох термічних циклів зварювання, тому CGHAZ з міжкритичним повторним нагріванням (ICR) CGHAZ часто вважаються найслабшою ланкою або найбільш крихкою областю зварного з'єднання. Схематичне зображення зварного шва з різними зонами термічного впливу представлено на рис. 4.7. Різні металургійні фактори, такі як розмір зерна аустеніту і розмір пакета бейніту, а також розмір, форма і розподіл будь-якої другої фази (карбідної або мартенситно-аустенітної) можуть впливати на в'язкість руйнування. Зокрема, наявність так званих

мартенситно-аустенітних (МА) складових, що утворюються в ICR CGHAZ, відіграє вирішальну роль у в'язкості руйнування при низьких температурах. Хоча МА широко вивчається в останні десятиліття, вплив швидкості охолодження на його об'ємну частку залишається неоднозначним.

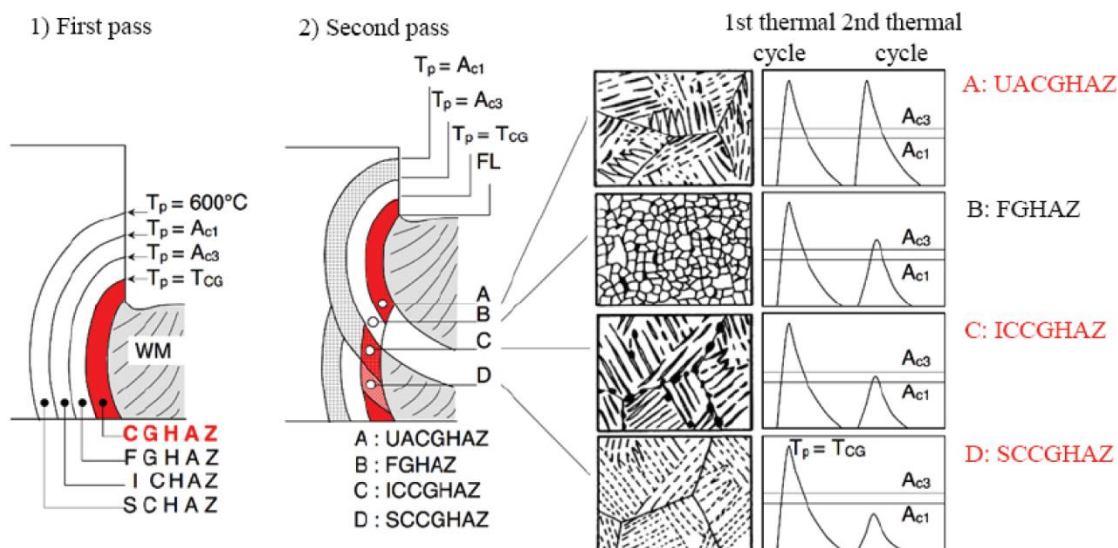


Рис. 4.7 – Схематичне зображення мікроструктур у зоні термічного впливу багатопрохідних зварних швів

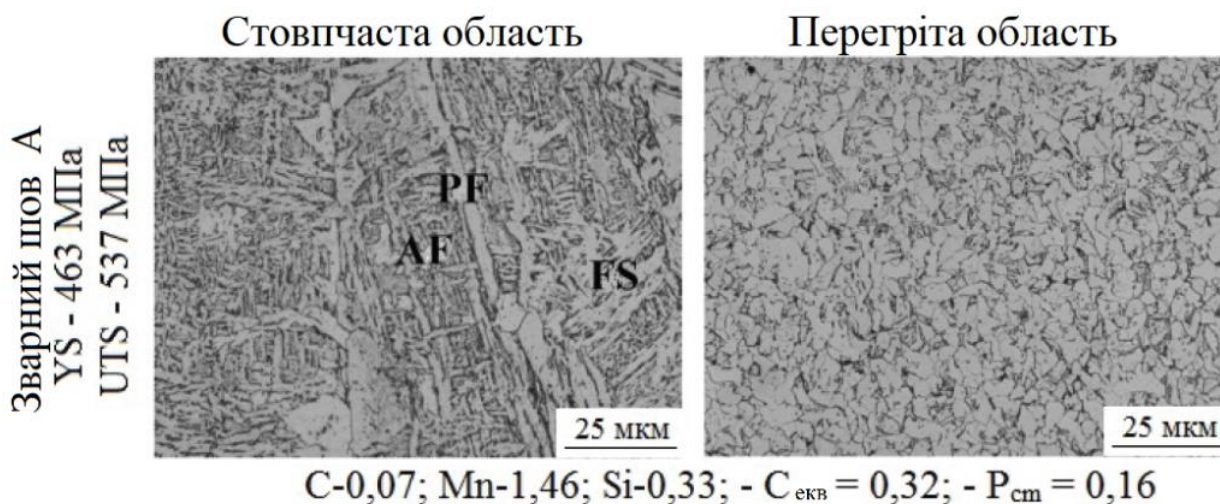
Для подальшого аналізу важлива інтерпретація мікроструктури сталі після зварювання – це спірне питання, оскільки складові, що є частиною однієї і тієї ж первинної структури, можуть здаватися морфологічно різними залежно від площини спостереження (рис. 4.8, 4.9), а деякі структури можуть мати подібні морфологічні особливості, але представляти різні механічні властивості.

Крім тенденції мати суміш мартенситу і бейніту з більш високим вмістом легуючих елементів через підвищення прокалюваності, варто відзначити наявність подібних складових як для стовпчастих, так і для повторно нагрітих областей.

Інше критичне питання пов'язане з низькою роздільною здатністю оптичної мікроскопії для уточнення складових частин рафінованих металів зварного шва навіть при використанні більшого збільшення, ніж рекомендовано. Для вирішення цієї проблеми в останні десятиліття широко використовується скануюча електронна мікроскопія (SEM), в основному для розділення бейніту і мартенситу та оцінки мікрофаз. Однак іноді навіть цей метод має обмеження для розрізнення загальної

мікроструктури. Це відбувається в основному для металів шва з межею міцності понад 600 МПа, де переважає змішана мікроструктура, що складається з голчастого фериту, бейніту (фериту з другою фазою) і мартенситу.

Для належного розрізнення мікроструктури в якості додаткового інструменту застосовується методика EBSD. Цей метод розглядався як цікава альтернатива для подолання недоліків оптичної мікроскопії, він дає цінну інформацію про межі зерен і корисний для уточнених мікроструктур з метою підтвердження таких складових, як голчастий ферит, бейніт і мартенсит. Висока чіткість, що забезпечується методом EBSD (особливо щодо меж зерен), корисна для розділення голчастого фериту і бейніту (фериту з другою фазою). Що стосується оцінки компонентів і включень МА, то для цього завдання більше підходить SEM-аналіз. Таким чином, вважається що поєднання методів OM, SEM і EBSD забезпечує кращу методологію дослідження металів зварних швів сталі С-Мn при наявності уточненої мікроструктури.



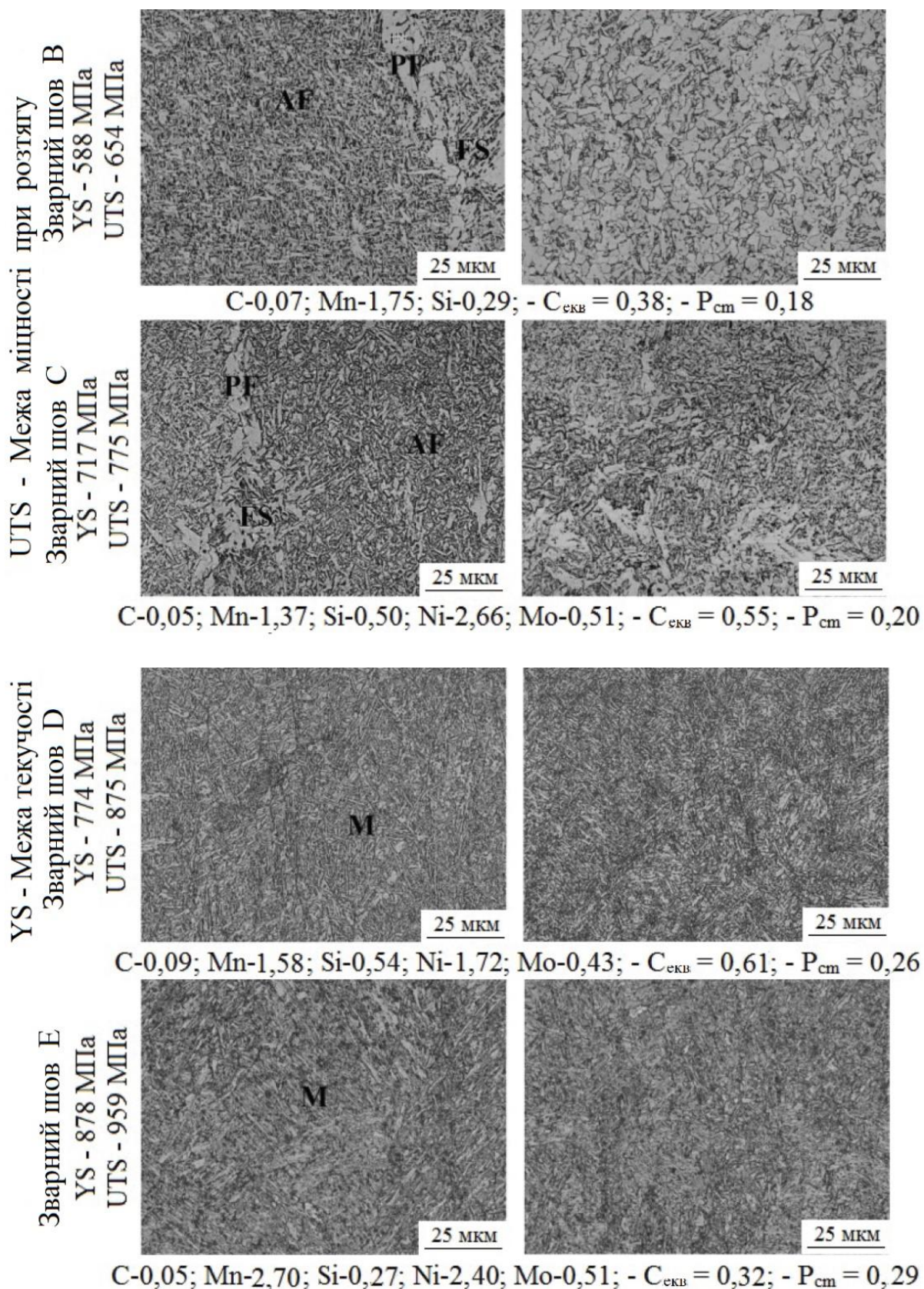


Рис. 4.8 – Мікроструктури, що спостерігаються в металах зварного шва з підвищенням межі міцності при розтягуванні після травлення 2%-м ніталом. Збільшення 1000× (ОМ). Позначення: AF – голчастий ферит; PF – первинний ферит; FS – ферит з другою фазою (FS); M – мартенсит

UTS - Межа міцності при розтягу

Зварний шов С

YS - 717 МПа

UTS - 775 МПа

Зварний шов В

YS - 588 МПа

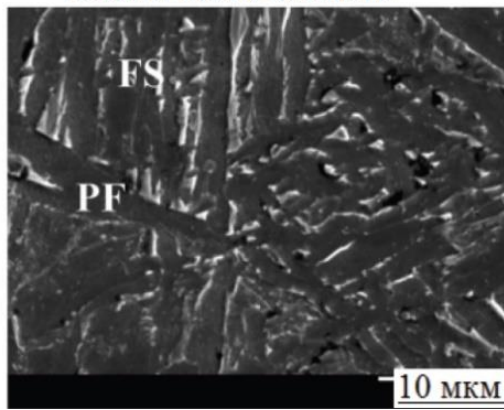
UTS - 654 МПа

Зварний шов А

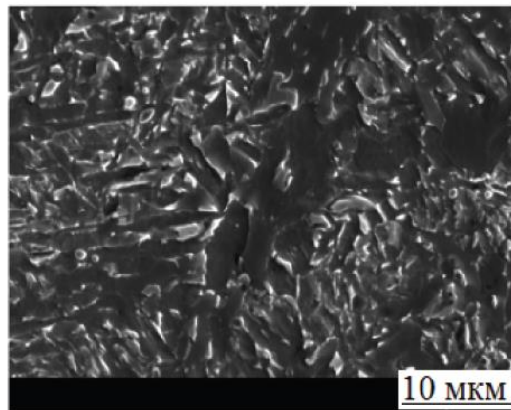
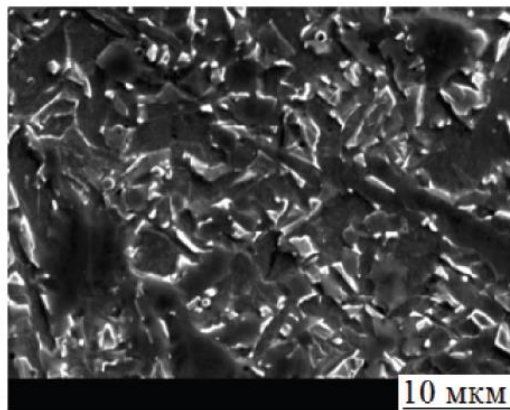
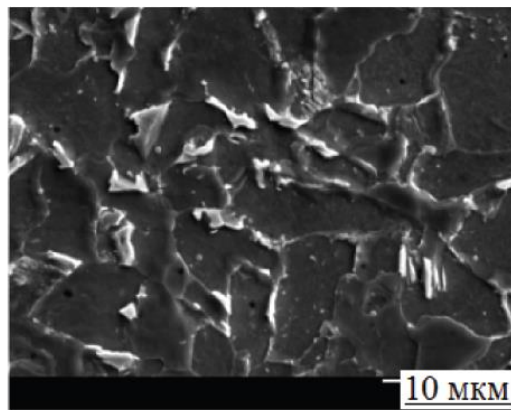
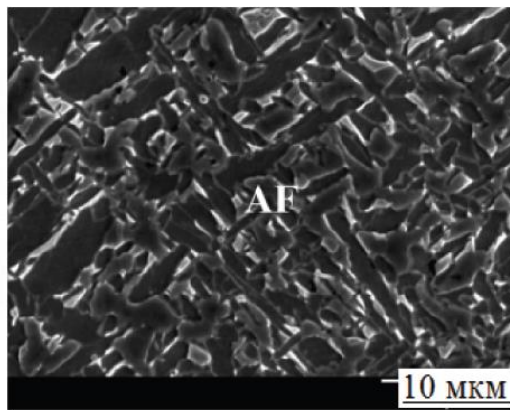
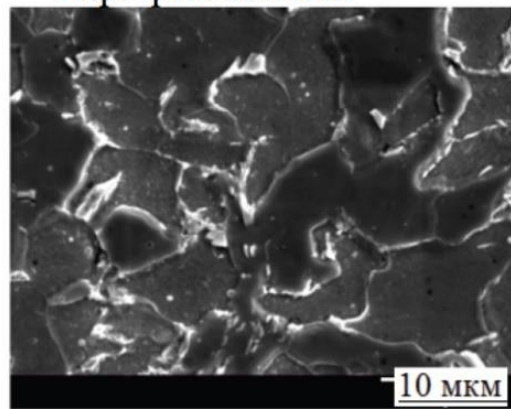
YS - 463 МПа

UTS - 537 МПа

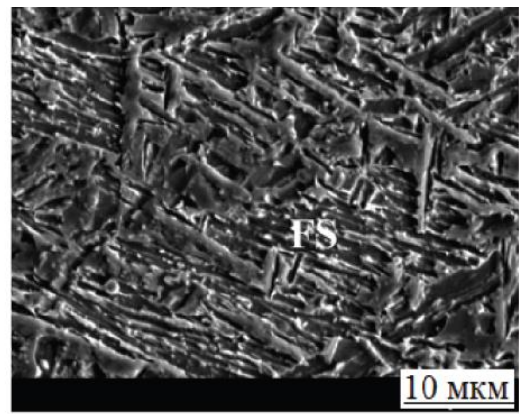
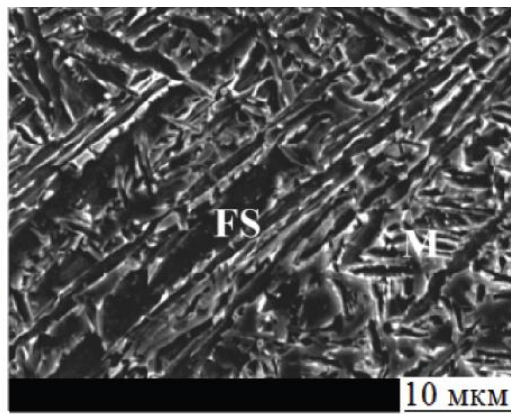
Стовпчаста область



Перегріта область



YS - Межа текучості
Зварний шов D
YS - 774 МПа
UTS - 875 МПа



Зварний шов E
YS - 878 МПа
UTS - 959 МПа

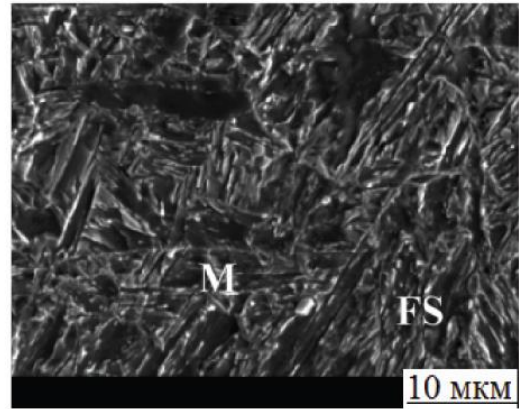
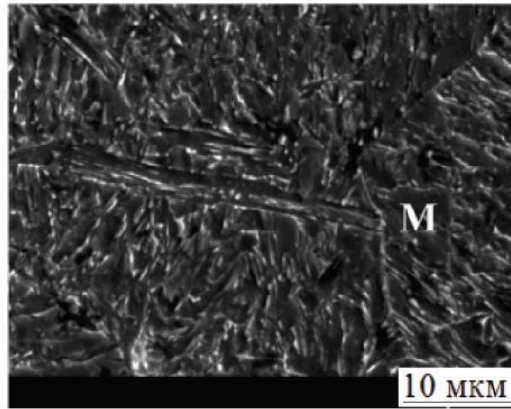


Рис. 4.9 – SEM-зображення металів зварного шва показані після травлення 2%-м ніталом. Позначення: AF – голчастий ферит; PF – первинний ферит; FS – ферит з другою фазою (FS); M – мартенсит

Проведений нами аналіз показує, що стосовно низьковуглецевих та низьколегованих сталей метал зварного шва може мати такі мікроструктури:

- Первинний ферит, який зародився на межі початкових аустенітних зерен (алотриоморфний ферит) і в меншій мірі всередині аустенітних зерен (ідіоморфний ферит), де присутні неметалеві включення (НВ). Первинний ферит із зародками на межі зерен утворюється в інтервалі температур від 1000 до 650 °С при охолодженні.
- Бічні пластини фериту (розділені малокутовими межами), які утворюються при температурі від 750 до 650 °С при охолодженні, також на межі первинно- аустенітних зерен.
- Голчастий ферит, який гетерогенно зародився на поверхні неметалевих включень при переході аустеніт-ферит. У міру перетворення зерна фериту розходяться в різні боки, створюючи хаотичну конструкцію з кристалографічно розорієнтованих пластин довжиною приблизно 5–15 мкм і

шириною 1–3 мкм. Діапазон температур, в якому утворюється голчастий ферит, залежить від загального складу і швидкості охолодження в діапазоні температур перетворення, але зазвичай знаходиться в межах 750–560 °С.

- Бейніт росте у вигляді окремих пластин або субодиноць, які можуть утворювати пучки паралельних феритових рейок. Їх можна розділити на верхній або нижній бейніт залежно від температури перетворення. У верхньому бейніті вуглець осідає у вигляді цементиту (Fe_3C) між пластинами бейнітного фериту (пучками). У нижньому бейніті ферит стає перенасиченим вуглецем, і деякі виділення карбїду відбуваються всередині феритних субодиноць, а також між ними. Початкова температура бейніту залежить від складу і швидкості охолодження, але зазвичай становить приблизно 560 °С. Ефективність зародків неметалевих включень в сучасних металах зварного шва низьколегованих сталей така, що розмір колонії внутрішньозернистого бейніту подібний до розміру голчастого фериту в металі зварного шва сталі С-Mn. Отже, при вивченні в оптичному мікроскопі колонії всередині зернистого бейніту дуже схожі на вигляд голчастого фериту, з яким його плутають в літературі. Деякі автори використовують термін «зернистий бейніт», який не відрізняється від рейкового бейніту за механізмом перетворення, хоча пакети зернистого бейніту утворюються при відносно вищих температурах і в основному складаються з широких паралельних рейок, тоді як пакети рейкового бейніту утворюються при відносно нижчих температурах і складаються з тонких паралельних рейок.

- Перетворення перліту може відбуватися на межі аустенітних зерен або в таких неоднорідностях, як включення. При високих температурах перетворення перліт утворює вузлики з чергуються пластинок фериту і цементиту, які можуть бути досить великими. У міру зниження температури перетворення пластини перліту стоншуються, поки структура не стає невирішеною під світловим мікроскопом. Як альтернатива, спотворені пластини перліту можуть виглядати як практично невирішуваний агрегат фериту/карбїду. Пластинчастий перліт FC(P) можна сплутати з мартенситом, якщо пластини фериту/цементу нерозрізнимі під світловим мікроскопом

- Мартенсит утворюється в результаті швидкого і бездифузійного

перетворення, при якому вуглець залишається в розчині. Мартенсит може зустрічатися у вигляді рейок або пластин. Субструктура рейкового мартенситу характеризується високою щільністю дислокацій, розташованих у комірках, де кожна пластина мартенситу складається з безлічі дислокаційних комірок. Субструктура пластинчастого мартенситу складається з дуже дрібних двійників, тобто двійникового мартенситу.

На відміну від металів однопрохідних зварних швів, метали багатопрохідних швів містять у кожному валику (крім останнього валика) велику частку перегрітих ділянок, які за рахунок наступних валиків повторно нагріваються до температури вище A_{c3} .

Вплив багаторазових проходів зварювання на наплавлені метали C-Mn і низьколеговані сталі дуже складний, оскільки частка стовпчастих і рекристалізованих областей та їх відповідні мікроструктури залежать від різних параметрів, таких як підведення тепла, температура між проходами і хімічний склад. Попередня стовпчаста морфологія змінюється в процесі повторного нагрівання, що призводить до гетерогенної мікроструктури, яка впливає на характеристики зварного з'єднання.

Розкид значень в'язкості в металі багатопрохідного зварного шва сталей C- Mn дуже складне, навіть якщо враховувати ефект повторного нагрівання через кілька проходів. Значні зміни ударної в'язкості металів зварного шва C-Mn обумовлені особливостями мікроструктури, що існує в надрізі Шарпі-V, які є сукупним результатом хімічного складу, процедури зварювання, послідовності наплавлення і конкретних методів зварювання.

Крім факторів, згаданих вище, вкрай важливо враховувати положення надрізу Шарпі-V щодо частки повторно нагрітого металу зварного шва. Для кожного випадку повинна бути зроблена конкретна оцінка. Бо, що хоча повна рекристалізація спостерігалася для двох пересічних областей на шар і частка повторно нагрітих областей становила близько 75– 80 % для трьох шарів на шар, але для обох послідовностей була отримана однакова ударна в'язкість залежно від вмісту Mn.

В цілому ударна в'язкість зростає, коли частка рекристалізованої області

збільшується через переважання полігонального фериту, подрібнення мікроструктури або ефекти відпуску при подальших осадженнях. На рис. 4.10 показано зображення надрізу Шарпі-V, отримане методом ОМ, де співвідношення стовпчастих і повторно нагрітих областей можна легко визначити для металів зварного шва С-Mn, оскільки ці області чітко визначені. Для більш легованих металів зварного шва ця відмінність може бути більш складною. У такому випадку може знадобитися кілька етапів полірування і травлення для посилення контрасту між областями.

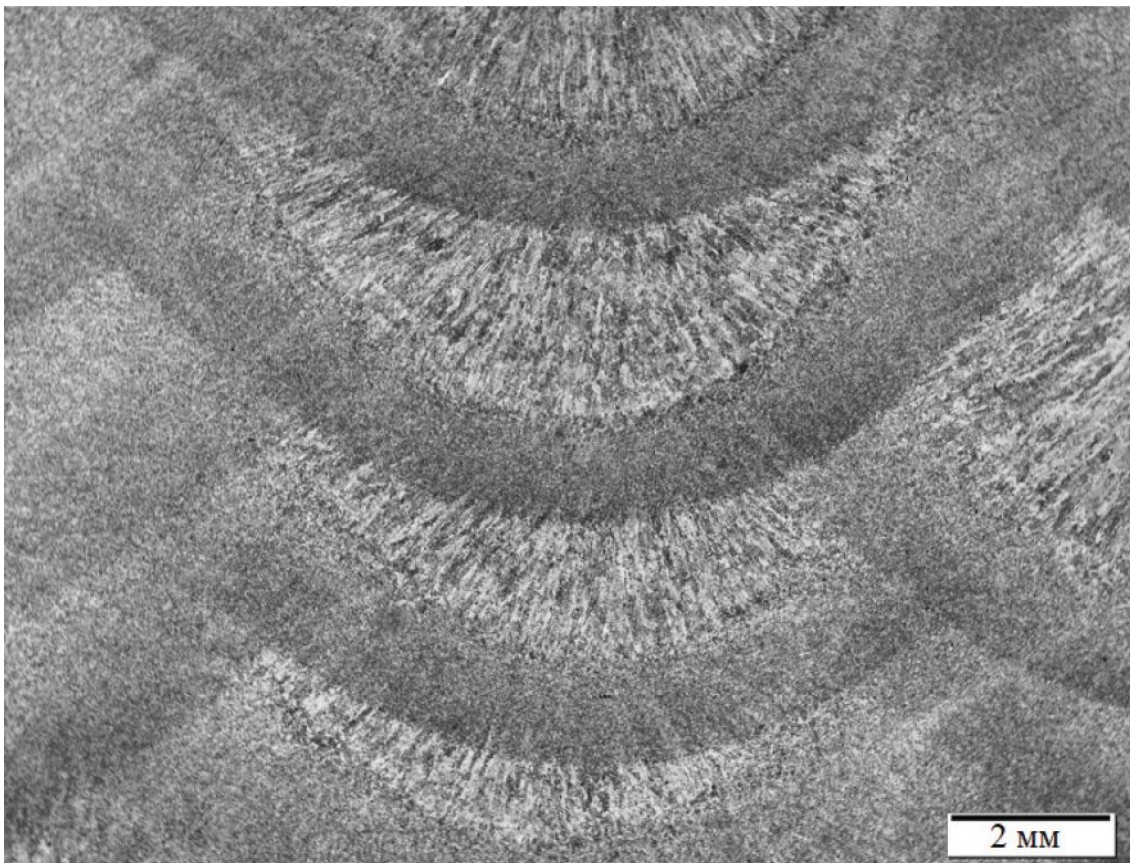


Рис. 4.10 – Оптична мікроскопія при малому збільшенні положення надрізу за Шарпі-V для металу зварного шва С-Mn після травлення 2%-м ніталем

Кілька досліджень були зосереджені на мікроструктурі та ударній в'язкості реального металу зварного шва. Це пов'язано з тим, що дуже складно проаналізувати їх кореляцію, використовуючи справжню зварену деталь, а точне визначення кореляції між компонентою МА кільцевого типу в зоні повторного нагрівання металу шва і ударною в'язкістю досі залишається невизначеним.

У той же час після металографічних досліджень, коли отримано точну характеристику мікроструктури, можна провести оцінку ударної в'язкості на основі наступних критеріїв.

1. Повторний нагрів. Цей критерій не є настільки репрезентативним у багатьох проаналізованих роботах, оскільки для всіх наплавлених наплавок була отримана однакова частка рекристалізації.

2. Мікроструктура. Результати EBSD підтверджують цю тенденцію, показуючи, що більш тонка мікроструктура має більш високу частоту великокутових меж (HAB), які можуть ефективно змусити поширення тріщин відколу відхилятися або зупинятися. Така ж поведінка відмічена і для області повторного нагрівання подрібненого зерна, де переважає полігональний ферит.

3. Відсутність металевих включень. Відомо, що неметалеві включення можуть чинити два протилежних ефекти на ударну в'язкість. Один з них полягає в тому, що включення діють як місця зародження тріщин, як пластичних, так і відколу. По-друге, вони можуть сприяти утворенню голчастого фериту. Було помічено, що збільшення вмісту Ti сприяє утворенню включень, достатніх для підтримки утворення очищеного голчастого фериту, відповідно до інших робіт.

Пропонована методологія належного опису мікроструктури для пояснення ударної в'язкості металів зварного шва така: – механічні властивості металів зварного шва є наслідком мікроструктури, головним чином пов'язаної з їх легуючими елементами та швидкістю охолодження. Незалежно від хімічного складу, протягом десятиліть час охолодження від 800 до 500 °C ($\Delta t_{8/5}$) використовувався як орієнтир для досягнення бажаних характеристик зварювання, і в певних випадках для забезпечення чудової продуктивності рекомендується використовувати обмежений інтервал. Наприклад, в деяких роботах для високоміцних металів зварного шва рекомендований діапазон 5–20 с;

– хоча $\Delta t_{8/5}$ не враховує жодних мікроструктурних перетворень, таких як нижній бейніт, що утворюється при температурі нижче 500 °C, цей показник можна використовувати для низьколегованих сталей, оскільки він стосується не тільки часу, що витрачається на охолодження між 800 і 500 °C, але і всього термічного циклу, включаючи час, проведений при високих температурах. Зазвичай для

досягнення рекомендованого максимального значення $\Delta t_{8/5}$ погонну енергію зварювання обмежують, що призводить до зниження швидкості наплавлення металу шва і необхідності більшої кількості зварювальних проходів.

В цілому більш тривалий час охолодження через більш високі теплонавантаження призводить до більш грубої мікроструктури і в кінцевому підсумку до присутності небажаних компонентів, таких як зернистий бейніт, зрощений бейніт або сукупні ферит-карбіди. Хоча розкладання компонентів МА може поліпшити механічні властивості, заміна великими карбідами не обов'язково дає позитивний результат.

Щоб подолати ці проблеми, постачальники можуть змінити базовий склад зварювальних матеріалів – це пов'язано з тим, що стандарти на зварювальні матеріали допускають більш широкий діапазон легуючих і мікролеуючих елементів, і тому кожен виробник пропонує свій власний хімічний склад для досягнення вимог кваліфікації.

Відповідно до цілей даної роботи і завдання оглядового дослідження проведений нами аналіз численних джерел показує, що для металу зварного шва листової низьколегованої сталі голчастий ферит (AF) є найбільш бажаним компонентом через його дрібний розмір зерна і взаємопов'язану структуру з межами під великим кутом, що забезпечують високу ударну в'язкість.

Також повідомляється, що AF є компонентом металу зварного шва, який найкраще підвищує ударну в'язкість сталей HSLA з межею плинності близько 600 МПа. Менші розміри зерна мають більше меж і змінюють напрямок поширення тріщини, діючи як ефективні бар'єри, оскільки вони мають різні кристалографічні орієнтації. Тому в останні десятиліття велика робота була спрямована на виявлення факторів, що контролюють утворення голчастого фериту. Згідно з дослідженням з використанням аналізу дифракції зворотного розсіювання електронів, полігональний ферит також діє як зміцнювальна фаза, оскільки його межі відносяться до більшокутових меж, а всередині зерен існує відносно низька щільність дислокацій.

Як уже згадувалося, велика кількість голчастого фериту має вирішальне значення для ударної в'язкості металів зварного шва. Наплавлений метал зі

значною кількістю голчастого фериту може більш ефективно контролювати інші важливі параметри, такі як включення і компоненти МА. Це пов'язано з тим, що голчастий ферит подрібнює мікроструктуру, а значить, сприяє поліпшенню розміру і розподілу МА, що визначає рівень крихкості, викликаной МА. Крім того, велика кількість голчастого фериту, якому сприяють дрібні включення, зводить до мінімуму шкідливий вплив включень, що виступають в якості місць ініціювання як пластичних, так і розкольних руйнувань.

Поєднання хорошої ударної в'язкості з високою часткою голчастого фериту у верхньому валику зварювальних відкладень не є найбільш підходящою процедурою навіть при однопрохідному зварюванні. У цьому відношенні важливо підкреслити положення надрізу Шарпі-V щодо появи стовпчастого наплавленого або повторно нагрітого металу зварного шва. Більш того, необхідно враховувати вплив включень, безпосередньо пов'язаний з результатами випробувань за Шарпі-V при більш високих температурах. Ця ситуація може бути іншою для більш високих рівнів міцності сталі, оскільки в мікроструктурі домінують бейніт і мартенсит, а не голчастий ферит, а їх відносні кількості і морфологія мають вирішальне значення для ударної в'язкості. Навіть якщо мікроструктура більш однорідна як у стовпчастих, так і в нагрітих областях, то багаторазові проходи зварювання також актуальні через рекристалізацію. Очевидно, що всі ці фактори вносять свій внесок у результати, отримані при випробуваннях Шарпі-V, і роблять їх аналіз значно складнішим, ніж аналіз, пов'язаний з випробуваннями на розтяг.

Всі аналізи повинні проводитися в положенні надрізу Шарпі-V, де вимірюються механічні властивості.

Етап 1. Вимірювання частки стовпчастих і повторно нагрітих областей, обумовлених ефектом рекристалізації, методом оптичної мікроскопії з малим збільшенням. Однак це не застосовується до металів однопрохідного шва.

Етап 2. Якісний і кількісний аналіз основних мікроструктурних складових, а саме первинного фериту, голчастого фериту, полігонального фериту, фериту з другою фазою і мартенситу, з використанням оптичної мікроскопії (1000-кратне збільшення). Однак для більш міцних металів зварного шва, що містять суміш голчастого фериту, фериту з другою фазою і мартенситу, іноді необхідний аналіз

СЕМ для уточнення основних складових (збільшення ~1000–3000 разів). Крім того, метод EBSD може використовуватися як додатковий. У цьому випадку корисні результати, що в ь включають ефективний розмір зерна (EGS) і частоту великокутових меж (HAB), отримані з профілів розорієнтації меж зерен.

Етап 3. Якісний і кількісний аналіз мікрофаз, карбідів і компонентів МА за допомогою СЕМ (збільшення ~ 2000–5000 разів). У деяких дослідженнях стверджується, що EBSD є відмінним методом підтвердження присутності компонентів МА. Однак важливо пам'ятати, що статистичні результати залежать від кількості вимірних точок, і в цьому відношенні кількісний аналіз за допомогою СЕМ простіший і швидший. Автори цієї статті вважають, що доступне для EBSD програмне забезпечення досі недостатньо надійне для цього завдання через його складність.

Етап 4. Якісний і кількісний аналіз неметалевих включень за допомогою SEM/EDS (збільшення ~ 1500 разів). Такий аналіз корисний для більш високих рівнів енергії і при порівнянні різних процесів зварювання. Крім того, це може підтвердити потенціал включень в якості зародків голчастого фериту.

Проведений нами аналіз ряду джерел інформації з оцінки різних мікроструктур металів зварних швів низьколегованих сталей і встановлення взаємозв'язку мікроструктури і ударної в'язкості на основі експериментальних результатів, отриманих за останнє десятиліття для металів зварних швів з межею міцності при розтягуванні від 400 до 1000 МПа, дозволили сформулювати висновки для подальших досліджень з цієї теми.

Висновки до розділу

1. Показано, що низьколеговані сталі (HSLA) мають хороше поєднання міцності, ударної в'язкості та зварюваності і широко використовуються в системах транспортування нафти. Листові низьколеговані сталі для виготовлення ємностей виробляються за допомогою контрольованої термомеханічної обробки з подальшим прискореним охолодженням для досягнення чудових механічних властивостей. Важливим міркуванням при підготовці зварних з'єднань є

досягнення рівної або більш високої міцності і ударної в'язкості металу шва в порівнянні з основним металом, щоб уникнути руйнування металу шва.

2. На основі аналізу експериментальних даних різних авторів показано, що вкрай важливо мати оптимальну мікроструктуру металу шва, яка багато в чому залежить від складу електродного дроту. Основні легуючі елементи, такі як Cu, Ni і Mo, а також мікролегуючі елементи, такі як V, Nb, Ti і B, широко використовуються для її оптимізації мікроструктури і властивостей сталей для ємностей.

3. Показано, що переважаюча мікроструктура голчастого фериту (AF) з острівцями M/A в якості другої фази є оптимальною мікроструктурою для металу зварного шва низьколегованої сталі. Широкі дослідження механізмів утворення голчастого фериту в металах зварного шва показують, що такі елементи, як C, Mn, Si, Ni, Al, Ti, Nb і Mo, впливають на зародження голчастого фериту всередині аустенітних зерен. Вплив добавки Ti на мікроструктуру і утворення включень в сталевих з'єднаннях трубопроводів, зварених автоматичним зварюванням під шаром флюсу, показав, що найкраще поєднання мікроструктури і ударної в'язкості може бути отримано при додаванні Ti в діапазоні 0,02-0,05 мас.%. Поліпшення ударної в'язкості при збільшенні вмісту титану обумовлено великою кількістю голчастого фериту, оскільки інші фактори не заважають.

Додавання Mo в кількості 0,881 мас.% в метал зварного шва забезпечує оптимальну ударну в'язкість при температурі -45°C завдяки мікроструктурі, що складається з 77 % голчастого фериту і 20 % гранульованого бейніту.

4. Необхідно враховувати загальний хімічний склад зварювального дроту, який істотно впливає на утворення голчастого фериту (AF). В даний час показано, що найкращі механічні властивості в зварних швах сталей X70 відповідали двом складам електродних дротів: 1,92 мас.% Mn з 0,02 мас.% Ti і 1,40 мас.% Mn з 0,08 мас.% Ti. Подальше збільшення вмісту Ti або Mn сприяло зародженню бейніту на межах зерен, а не внутрішньозерновому зародженню голчастого фериту. Отже, задовільне поєднання міцності та ударної в'язкості залежить від контролю складу металу зварного шва.

5. Важливим фактором, що визначає мікроструктуру зварного шва, є

швидкість охолодження, яка зазвичай визначається як час, необхідний для охолодження від 800 до 500 °C ($\Delta t_{8/5}$). Має сенс у подальших роботах досліджувати еволюцію мікроструктури металу шва при різних теплових навантаженнях.

6. Показано, що при виготовленні або ремонті сталевих трубопроводів з відносно великою товщиною перетину, як правило, потрібне багатопрохідне зварювання. У численних роботах широко досліджувалася крихкість зони термічного впливу (ЗТВ), викликана термічними циклами від послідовних термічних циклів зварювання. Точно так само метали зварних швів піддаються термічним циклам від наступних зварювальних проходів. Ефект нерівномірного повторного нагрівання викликає неоднорідну мікроструктуру зварних швів. У зв'язку з цим в ході подальших досліджень дуже важливо розуміти вплив термічних циклів зварювання на мікроструктуру металу шва при багатопрохідному зварюванні, виконаному різними способами.

5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Заходи, що забезпечують безпечні умови праці при зварюванні в захисних газах

Забезпечення безпечних умов праці під час здійснення зварювальних робіт вимагає використання електричних пристроїв, а також взаємодії з горючими та вибухонебезпечними газами, що випромінюють електричні дуги та плазму, спрямовані на інтенсивне розплавлення і випаровування металу і тому подібне. Це створює потребу в заходах безпеки та захисту працівників від можливого виробничого травматизму.

Серед можливих видів виробничого травматизму при електрозварювальних роботах можуть виникнути такі проблеми, як ураження електричним струмом, ураження зору та відкритої поверхні шкіри променями електричної дуги, опіки від крапель металу та шлаків, а також отруєння організму шкідливими газами, пилом і випарами, що виділяються під час зварювання. Затримання місць, поранення та ураження від вибухів балонів стисненого газу під час зварювання посудин із горючих речовин можуть також стати потенційними небезпеками.

Для забезпечення умов, які запобігають зазначеним видам травматизму, рекомендується вживати наступні заходи. З метою уникнення ураження електричним струмом слід дотримуватися конкретних вимог. Корпуси джерел живлення дуги та зварювального допоміжного обладнання повинні бути надійно заземлені. Заземлення слід проводити за допомогою мідного провідника, один кінець якого кріпиться до корпусу джерела живлення дуги за допомогою спеціального болта із написом "Земля", а інший кінець приєднується до заземлювальної шини чи металевого штиря, який вбивається в землю.

Заземлення пересувних джерел живлення слід проводити до їхнього підключення до мережі живлення, а зняття заземлення може відбуватися тільки після відключення від мережі живлення.

Під час виконання зовнішніх робіт із зварювання необхідно забезпечити належні умови, такі як наявність навісу, намету або будки для захисту від дощу та снігу. У випадку неможливості дотримання цих умов, зварювальні роботи не

проводяться, а зварювальну апаратуру обов'язково укривають, щоб уникнути впливу вологи.

Персонал, що має відповідальність за електрозварювальне устаткування, повинен відповідально приєднувати та від'єднувати його від мережі, а також систематично слідкувати за його справним станом під час експлуатації. Зварникам категорично заборонено виконувати ці операції.

Всі зварювальні проводи повинні мати надійну ізоляцію, яка відповідає струмам, що застосовуються. Використання проводів із старою або розпатляною ізоляцією абсолютно заборонено.

З метою захисту зору та шкіри від світлових і невидимих променів дуги електрозварники та їх асистенти повинні користуватися щитками, масками або шоломами, в основні отвори яких вставлені спеціальні скла - світлофільтри. Вибір світлофільтра залежить від зварювального струму та характеру зварювальних робіт.

В стаціонарних цехах для запобігання впливу випромінювань встановлюють закриті зварювальні kabіни, а при будівельних та монтажних роботах використовують переносні щити або ширми.

При використанні балонів із стиснутим газом слід дотримуватись установлених заходів безпеки, таких як уникання кидання балонів та їх розташування подалі від нагрівальних пристроїв. Балони має зберігатись у вертикальному положенні.

У процесі зварювання та оббивці шлаків необхідно пам'ятати, що краплі розплавленого металу та шлаків можуть потрапити в складки одягу, кишені та черевики, спричиняючи опіки та пропали одягу. Зварникам рекомендується працювати в спецодязі із брезенту або щільного сукна, у рукавицях та головному уборі. При зварюванні швів у вертикальних, горизонтальних та стельових площинах слід надягати брезентові нарукавники і щільно зав'язувати їх поверх рукавів у кисті рук. Шви слід зачищати лише після повного остигання та обов'язково в окулярах із простим склом.

Зварювання електродами з якісним покриттям може призводити до особливого забруднення повітря пилом та газами. Склад пилу та газів залежить від

вмісту покриття та складу зварюваного металу та електроду. При автоматичному зварюванні кількість газів та пилу значно менша, ніж при ручному зварюванні.

Загально-обмінна штучна вентиляція при зварюванні в середовищі захисних газів

Усунення шкідливих газів та пилу з зони зварювання та подача чистого повітря забезпечується за допомогою місцевої та загальної вентиляції. При облаштуванні зварювальних кабін обов'язково передбачається місцева витяжна система з верхнім, бічним або нижнім відсмоктувачем, яка ефективно видаляє гази та пил безпосередньо з зони зварювання. Загальна вентиляційна система повинна працювати у витяжному режимі, виводячи забруднене повітря з робочих приміщень та забезпечуючи подачу свіжого повітря. У холодний період року повітря підігрівається до температури 20...22°C за допомогою спеціального нагрівача-калорифера.

У процесі зварювання у закритих приміщеннях та замкнутих конструкціях важливо забезпечити надходження свіжого повітря під невеликим тиском через спеціальний шланг безпосередньо в робочу зону зварника. Мінімальний об'єм свіжого повітря повинен становити не менше 30 м³/м. Відсутність вентиляції під час зварювання в закритих приміщеннях та конструкціях є неприпустимою. Вентиляційне обладнання має забезпечити ефективний повітрообмін під час ручного електродугового зварювання з електродами із якісними покриттями у розрахунку 4000...6000 м³ на 1 кг витрати електродів; для автоматичного зварювання під флюсом — приблизно 200 м³ на 1 кг дроту; у випадку зварювання у вуглекислому газі — до 1000 м³ на 1 кг дроту.

Система загально-обмінної вентиляції при зварюванні в атмосфері вуглекислого газу призначена для створення необхідних умов мікроклімату та підтримання чистоти повітря в усьому робочому просторі приміщення. Вона ефективно видаляє зайве тепло в умовах відсутності токсичних викидів, а також у випадках, коли технологічний процес та особливості виробничого обладнання виключають можливість використання місцевої системи витяжної вентиляції.

Розглядаючи чотири основні схеми організації повітрообміну при загально-обмінній вентиляції, можна виділити важливі аспекти, що визначають ефективність цих схем.

Схеми "зверху-вниз" та "зверху-вверх" є доцільними у випадку, коли припливне повітря в холодну пору року має температуру нижчу, ніж температура в приміщенні. У цих випадках припливне повітря, перш ніж досягти робочої зони, нагрівається за рахунок тепла повітря у приміщенні.

Схеми "знизу-вверх" та "знизу-вниз" рекомендуються, коли припливне повітря в холодну пору року попередньо підігрівається, і його температура вища, ніж температура в приміщенні.

В разі виокремлення газів та парів з густиною, що перевищує густину повітря, загально-обмінна вентиляція повинна забезпечити видалення 60% повітря з нижньої зони приміщення та 40% з верхньої, забезпечуючи ефективне усунення забрудненого повітря. У випадках, коли густина газів менша за густину повітря, видалення забрудненого повітря здійснюється у верхній зоні.

Протипожежні заходи на виробничій ділянці

У зварювальних цехах, на будівельно-монтажних площадках, на зварювальних і наплавочних ділянках необхідно суворо виконувати наступні правила, що запобігають можливості виникнення пожежі від іскор, що розлітаються і бризок розплавленого металу:

Робоче місце зварника повинне бути цілком очищене від легкозаймистих або вибухонебезпечних матеріалів. Легкозаймисті рідини і різні горючі матеріали повинні знаходитись від місця зварювання на відстані не менш 30 м., ацетиленові генератори і балони з горючими газами – на відстані не менш 10 м.

У місцях виконання зварювальних робіт захист від іскор, що розлітаються, і бризок металу повинна забезпечуватися металевими або брезентовими ширмами, на ділянках зварювання повинні бути вогнегасники, шухляди з піском, бочки з водою, різний пожежний інвентар, обов'язково телефонний зв'язок і пристрої для звукових сигналів.

Усі робітники та службовці при надходженні на роботу або при зміні робочих місць повинні бути проінструктовані з протипожежної безпеки і по прийнятому на підприємстві протипожежному режимі. На великих ділянках і в цехах повинні бути офіційно назначені відповідальні за стан протипожежних засобів і виконання протипожежного режиму роботи.

Обов'язково два рази в тиждень перевіряти стан зварювального обладнання.

При гасінні пожежі, що виникла в результаті витті загорання рідин (бензину, гасу, рідких мастильних матеріалів), не можна користуватися водою або рідкопінним вогнегасниками, необхідні пісок або спеціальні густо-пінні вогнегасники. Відповідальність за протипожежний стан окремих цехів, майстерень, складів і інших об'єктів, а також за своєчасне виконання протипожежних заходів на них покладається персонально на начальників цехів, майстерень, складів і т. д. Тому з усіх питань, зв'язаних із уживанням заходів протипожежної безпеки, необхідно звертатися насамперед до зазначених керівників. При аваріях зварювані роботи допускається робити під спостереженням начальника цеху без письмового дозволу. Після закінчення вогневих робіт зварник зобов'язаний ретельно оглянути місце проведення цих робіт, полити водою легкозаймисті конструкції й усунути порушення, що можуть привести до виникнення пожежі. У даний час існують загальні правила й інструкції про пожежну безпеку для найбільш розповсюджених виробництв усіх міністерств і відомств. Вимоги по пожежній безпеці для різних виробництв у відповідні правила техніки безпеки і виробничої санітарії при електрозварювальних роботах для цих виробництв.

Стійкість роботи підприємства в надзвичайних ситуаціях

Цивільна оборона є складовою частиною соціальних та захисних заходів, які проводяться в мирний і воєнний час з метою захисту населення і народного господарства від наслідків аварій, катастроф, стихійного лиха і сучасних засобів ураження.

Цивільна оборона України організовується за територіально-виробничим принципом на всій території і являє собою сукупність структур державного

управління, підприємств, організацій і спеціально створених органів керівництва та сил цивільної оборони. Заходи цивільної оборони проводяться на всій території держави, як правило, з врахуванням особливостей кожного району.

Кабінет Міністрів України постійно приділяє увагу розвитку цивільної оборони, підвищенню її ролі у захисті населення, підвищенню її значення, визначає основні принципи її побудови, характер і обсяг завдань, що вирішуються.

Територіальний принцип полягає в організації цивільної оборони на території областей, міст і районів, сільських місцевостей відповідно до адміністративного поділу території. Згідно з цим, відповідальність за стан цивільної оборони на цих територіях несуть виконавчі органи влади, а начальниками цивільної оборони, які безпосередньо здійснюють керівництво цивільною обороною є голови виконавчих органів влади.

Виробничий принцип полягає в організації цивільної оборони в кожній установі, підприємстві.

На цивільну оборону підприємства покладені такі основні обов'язки:

- оповіщення працівників та членів їх сімей при загрозі нападу, стихійного лиха і катастроф;
- забезпечення сховищами працюючої зміни, підтримка в сані постійної готовності захисних споруд і спеціальних споруд ЦО;
- проведення заходів, що забезпечують стійкість роботи об'єкту в мирний та воєнний час;
- створення, підготовка і підтримка в постійній готовності сил ЦО об'єкту.

Сучасний типовий комплекс промислового підприємства складають споруди і будівлі, в яких розміщуються виробничі цехи, верстатне і технологічне обладнання, будівлі енергетичного господарства, системи енергопостачання, інженерні і паливні комунікації, окремо розташовані технологічні установки, мережа внутрішнього транспорту, системи зв'язку і управління, складське господарство, різноманітні будівлі і споруди адміністративного, побутового і господарського призначення.

Принципами стійкості роботи промислового підприємства в надзвичайних ситуаціях є єдина нормативна і директивна база, яка включає:

- Конституцію України;
- Закон про цивільну оборону України;
- положення по цивільній обороні;
- нормативні документи по стійкості роботи об'єктів;
- директиви начальника штабу цивільної оборони України.

Під стійкістю роботи промислового підприємства розуміють їх можливість в умовах надзвичайних ситуацій мирного і воєнного часу виробляти продукцію в запланованому обсязі і номенклатурі, а при слабких пошкодженнях відновлювати виробництво в мінімальні терміни.

Стійкість роботи промислового підприємства складається із:

- 1) стійкості інженерно-технічного комплексу до дій зовнішніх факторів при аваріях, катастрофах, стихійному лихові, а також при застосуванні щодо них сучасної зброї;
- 2) стійкості виробничої діяльності.

Під стійкістю роботи об'єктів, які не виробляють матеріальних цінностей, розуміють їх можливість виконувати свої функції в умовах надзвичайних ситуацій.

Фактори, від яких залежить стійкість роботи об'єктів в надзвичайних ситуаціях мирного і воєнного часу:

- 1) надійність захисту робітників і службовців;
- 2) безпечність розташування об'єкту відносно зон можливих зруйнувань;
- 3) можливість інженерно-технічного комплексу протистояти ударній хвилі будь-якого вибуху і уражаючим діям ядерної зброї;
- 4) безперервність постачання електроенергією, паливом, сировиною, газом і всім необхідним для випуску продукції;
- 5) надійність керування виробництвом, силами і засобами цивільної оборони;
- 6) підготовленість підприємства до поновлення виробництва і проведення рятувальних і інших невідкладних робіт.

Основними документами для організації дослідження стійкості роботи об'єкту є: наказ керівника підприємства; календарний план основних заходів по підготовці та проведенню дослідження; план проведення досліджень.

ВИСНОВКИ

1. Отже в даній роботі проведено аналіз існуючого технологічного процесу виготовлення резервуара для зберігання і транспортування нафтопродуктів, описано недоліки і запропоновано вдосконалення технологічного процесу включно із новим обладнанням.
2. Описано та обгрунтовано вибір баз для складання та запропоновано складально зварювальні пристосування із розрахунками притискних та базоутворюючих елементів.
3. Показано, що низьколеговані сталі мають хороше поєднання міцності, ударної в'язкості та зварюваності і широко використовуються в системах транспортування нафти. Важливим міркуванням при підготовці зварних з'єднань є досягнення рівної або більш високої міцності і ударної в'язкості металу шва в порівнянні з основним металом, щоб уникнути руйнування металу шва.
4. На основі аналізу експериментальних даних різних авторів показано, що вкрай важливо мати оптимальну мікроструктуру металу шва, яка багато в чому залежить від складу електродного дроту. Основні легуючі елементи, такі як Cu, Ni і Mo, а також мікролегуючі елементи, такі як V, Nb, Ti і B, широко використовуються для її оптимізації мікроструктури і властивостей сталей для ємностей.
5. Необхідно враховувати загальний хімічний склад зварювального дроту, який істотно впливає на утворення голчастого фериту (AF). В даний час показано, що найкращі механічні властивості в зварних швах сталей X70 відповідали двом складам електродних дротів: 1,92 мас.% Mn з 0,02 мас.% Ti і 1,40 мас.% Mn з 0,08 мас.% Ti. Подальше збільшення вмісту Ti або Mn сприяло зародженню бейніту на межах зерен, а не внутрішньозерновому зародженню голчастого фериту. Отже, задовільне поєднання міцності та ударної в'язкості залежить від контролю складу металу зварного шва.
6. Важливим фактором, що визначає мікроструктуру зварного шва, є швидкість охолодження, яка зазвичай визначається як час, необхідний для охолодження від 800 до 500 °C ($\Delta t_{8/5}$). Має сенс у подальших роботах досліджувати еволюцію мікроструктури металу шва при різних теплових

навантаженнях.

7. Надано рекомендації щодо охорони праці та заходів безпеки в разі виникнення надзвичайних ситуацій на виробництві.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Паньків В.Р., Козак Б.О. Особливості зварювання тонкостінних труб: тези доп. XIV Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» 11-12 грудня 2025 р. Тернопіль : ТНТУ ім. І. Пулюя, 2023. С. 30 – 32.
2. Кривов Г.О., Зворикін К.О. Виробництво зварних конструкцій : підручник для студентів вищих навчальних закладів. К.: КВІЦ, 2012. 896 с.
3. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением : під ред. академіка Б. Є. Патона. К.: Машинобудування, 1974. 767 с.
4. Костін О.М. Зварювальні матеріали: навч. посібник. Миколаїв : НУК, 2004. 225 с.
5. ДСТУ 8713-79 Зварювання під флюсом. З'єднання зварні основні типи, конструктивні елементи і розміри.
6. ДСТУ 14771-76 Дугове зварювання в захисних газах. З'єднання зварні основні типи, конструктивні елементи і розміри.
7. Александров О.Г., Антонюк Д.А., Капустян О.Є. Джерела живлення для дугового зварювання та наплавлення : навч. посібник. Львів : Новий світ, 2013. 224 с.
8. Биковський О.Г. Зварювання, різання й контроль якості під час виробництва металоконструкцій : підручник. К.: Основа, 2021. 400 с.
9. Левченко О.Г. Охорона праці у зварювальному виробництві. Навчальний посібник. К.: Основа, 2010. 240 с.
10. Барановський В.М. Конспект лекцій з дисципліни «Складально-зварювальне оснащення». Вид. Тернопільського нац. технічного університету. Тернопіль : ТНТУ ім. І. Пулюя, 2015. 254 с.
11. Барановський В.М. Конспект лекцій з дисципліни «Проектування технологічних процесів зварювального виробництва». Вид. Тернопільського національного технічного ун-ту. Тернопіль : ТНТУ ім. І. Пулюя, 2015. 58 с.
12. Барановський В.М., Сенчишин В.С. Конспект лекцій з дисципліни «Виробництво зварних конструкцій». Вид. Тернопільського національного технічного університету. Тернопіль : ТНТУ ім. І. Пулюя, 2015. 66 с.
13. Барановський В.М., Підгурський М.І., Сенчишин В.С. Методичні

вказівки до виконання курсового проекту з дисципліни «Проектування технологічних процесів зварювального виробництва» для студентів денної та заочної форми навчання для підготовки фахівців освітньо-кваліфікаційного рівня «Спеціаліст» і «Магістр» зі спеціальності 7.05050401, 8.05050401 «Технологія та устаткування зварювання». Вид. Тернопільського національного технічного університету. Тернопіль : ТНТУ ім. І. Пулюя, 2015. 54 с.

14. Барановський В.М., Підгурський М.І., Мариненко С.Ю. Конспект лекцій з дисципліни «Безпека життєдіяльності для студентів всіх спеціальностей і форм навчання. Вид. Тернопільського національного технічного університету. Тернопіль : ТНТУ ім. І. Пулюя, 2015. 141 с./67 с.

15. Барановський В.М., Пулька Ч.В., Сенчишин В.С. Конспект лекцій з дисципліни «Основи наукових досліджень» для студентів спеціальності 8.05050401 – «Технологія та устаткування зварювання». Вид. Тернопільського національного технічного університету. Тернопіль : ТНТУ ім. І. Пулюя, 2015. 86 с.

16. Безпека життєдіяльності: Навчальний посібник / Під ред. Я.Г. Бедрія. Львів, 1997. 275с.

17. Жидецький В. Ц., Джиги рей В. С., Мельников О. В. Основи охорони праці : підручник (видавн. 5-те, доповнене). Л.: Афіша, 2000. 350 с.

18. <https://shop.metsol.com.ua/ua/p2493591680-svarochnyj-traktor-esab.html>

17. Jorge J.C.F., Monteiro J.L.D., Gomes A.J.C., Bott I.S., Souza L.F.G., Mendes M.C., Araújo L.S. Influence of welding procedure and PWHT on HSLA steel weld metals. *Journal of Materials Research and Technology*, 2019, vol. 8 (1), pp. 561–571. DOI: 10.1016/j.jmrt.2018.05.007.

18. Pickering F.B. Overview of titanium microalloyed steels. *Titanium technology in microalloyed steels*. Ed. By T.N. Baker. London, The Institute of Materials, 1997, p. 10–43.

19. Morrison W.B. Microalloy steels – the beginning. *Materials Science and Technology*, 2009, vol. 25 (9), pp. 1066–1073. DOI: 10.1179/174328409X453299.

20. Morrison W.B. Influence of small niobium additions on properties of carbon-manganese steels. *Journal of the Iron and Steel Institute*, 1963, vol. 201 (4), pp. 317–325.

21. Midawi A.R.H., Santos E.B.F., Huda N., Sinha A.K., Lazor R., Gerlich A.P. Microstructures and mechanical properties in two X80 weld metals produced using similar heat input. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, vol. 226, pp. 272–279. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2015.07.019.
22. Sha Q., Li D. Microstructure, mechanical properties and hydrogen induced cracking susceptibility of X80 pipeline steel with reduced Mn content. *Materials Science and Engineering: A*, 2013, vol. 585, pp. 214–221. DOI: 10.1016/j.msea.2013.07.055. 2019, vol. 560 (1), p. 012190. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012190.
23. Zhang Q., Yuan Q., Xiong Z., Liu M., Xu G. Effects of Q&T parameters on phase transformation, microstructure, precipitation and mechanical properties in an oil casing steel. *Physics of Metals and Metallography*, 2021, vol. 122 (14), pp. 1463–1472. DOI: 10.1134/S0031918X21140180.
24. Kim Y.M., Kim S.K., Lim Y.J., Kim N.J. Effect of microstructure on the yield ratio and low temperature toughness of linepipe steels. *ISIJ International*, 2002, vol. 42 (12), pp. 1571–1577. DOI: 10.2355/isijinternational.42.1571.
25. Jorge J.C.F., Souza L.F.G. de, Mendes M.C., Bott I.S., Araújo L.S., Santos V.R. dos, Rebello J.M.A., Evans G.M. Microstructure characterization and its relationship with impact toughness of C–Mn and high strength low alloy steel weld metals – a review. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, vol. 10, pp. 471–501. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.12.006.
26. Babu S.S. The mechanism of acicular ferrite in weld deposits. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 2004, vol. 8 (3–4), pp. 267–278. DOI: 10.1016/j.cossms.2004.10.001.
27. Thewlis G. Classification and quantification of microstructures in steels. *Materials Science and Technology*, 2004, vol. 20 (2), pp. 143–160. DOI: 10.1179/026708304225010325.
28. Dolby R.E. Guidelines for the classification of ferritic steel weld metal microstructural constituents using the light microscope. *Welding in the World*, 1986, vol. 24 (7), pp. 144–149.
29. Ramirez J.E. Examining the mechanical properties of high-strength steel weld metals. *Welding Journal*, 2009, vol. 88 (1), pp. 32–38.

30. Matsuda F., Fukada Y., Okada H., Shiga C., Ikeuchi K., Horii Y., Shiwaku T., Suzuki S. Review of mechanical and metallurgical investigations of martensite-austenite constituent in welded joints in Japan. *Welding in the World/ Le Soudage dans le Monde*, 1996, vol. 3 (37), pp. 134–154.
31. Abson D.J. Acicular ferrite and bainite in C–Mn and low-alloy steel arc weld metals. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2018, vol. 23 (8), pp. 635–648. DOI: 10.1080/13621718.2018.1461992.
31. An G., Park J., Ohata M., Minami F. Evaluation of fracture safety according to plastic deformation with high strength steel weld joints. *Journal of Welding and Joining*, 2019, vol. 37 (6), pp. 547–554. DOI: 10.5781/JWJ.2019.37.6.3.
32. De-Castro D., Eres-Castellanos A., Vivas J., Caballero F.G., San-Martín D., Capdevila C. Morphological and crystallographic features of granular and lath-like bainite in a low carbon microalloyed steel. *Materials Characterization*, 2022, vol. 184, p. 111703. DOI: 10.1016/j.matchar.2021.111703.
33. Lan L., Qiu C., Zhao D., Gao X. Microstructural evolution and mechanical properties of Nb-Ti microalloyed pipeline steel. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2011, vol. 18 (2), pp. 57–63. DOI: 10.1016/S1006-706X(11)60024-1.

ДОДАТКИ