

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет інженерії машин, споруд та технологій  
(повна назва факультету)

кафедра інжинірингу машинобудівних технологій  
(повна назва кафедри)

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: **Розроблення технологічного процесу зварювання магістральних  
трубопроводів другого охолоджуючого контуру АЕС з дослідженням  
закономірностей деформування**

Виконав(ла): студент(ка) 6 курсу, групи МПзм-61  
спеціальності 131 Прикладна механіка

(шифр і назва спеціальності)

Собко С.М.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник Підгурський М.І.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль Дячун А.Є.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри Окіпний І.Б.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Тернопіль  
2023

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра на тему: " Розроблення технологічного процесу зварювання магістральних трубопроводів другого охолоджуючого контуру АЕС з дослідженням закономірностей деформування " складається із розрахунково-пояснювальної записки об'ємом 84 аркушів формату А4 і графічної частини об'ємом 6 аркушів формату А1. Розрахунково-пояснювальна записка складається із таких частин: аналітична, дослідницька, технологічна, конструкторська, охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.

Для висвітлення питань, які розглядаються у кваліфікаційній роботі, розрахунково-пояснювальна записка містить 27 рисунків, 17 таблиць, 1 додаток. При написанні розрахунково-пояснювальної записки використано 31 першоджерел.

В роботі проведено аналіз впливу температури на деформаційні властивості теплостійкої сталі 15ХМ1Ф. Встановлено, що підвищення температури деформації з 423К до 623К призводить до зниження напруження при однаковій деформації, як при прямому розтязі, так і при комбінованому розтязі. Особливу увагу зосереджено на впливі водню, який знижує межу текучості сталі приблизно на 10% в порівнянні з ненаводненим матеріалом. Важливим є виявлення того, що присутність водню сприяє збільшенню індексу деформаційного зміцнення сталі. Проведені дослідження лягли в основу розробки технологічного процесу зварювання магістрального трубопроводу, де використовується метод автоматичного орбітального аргоно-дугового зварювання з присадковим дротом. Для вдосконалення якості складально-зварювальних робіт було розроблено спеціальний центратор труб. В результаті цих досліджень було визначено оптимальні умови та обладнання для зварювання сталей перлітного класу, що включає попередній підігрів торців труб перед зварюванням.

Ключові слова: ОРБІТАЛЬНЕ ЗВАРЮВАННЯ, НЕПЛАВКИЙ ЕЛЕКТРОД, ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС, РЕЖИМИ ЗВАРЮВАННЯ, НАПРУЖЕННЯ.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА .....	7
1.1. Опис конструкції виробу та умов його роботи.....	7
1.2 Технічні умови до конструкції виробу.....	16
1.3 Аналіз технологічного процесу зварювання стиків труб.....	21
2 НАУКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА.....	23
2.1 Кінетика деформування матеріалів за сумісної дії статичного і циклічного навантаження .....	23
2.2 Вплив наводнювальних середовищ на закономірності деформування теплостійких сталей .....	26
2.3 Вплив температури випробувань 423...623К.....	29
2.4. Вплив параметрів циклічного навантаження .....	31
2.5. Вплив наводнювальних середовищ.....	37
3 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА .....	42
3.1 Обґрунтування способу зварювання. ....	42
3.2 Опис технологічного процесу .....	59
4 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА .....	65
4.1 Вибір складально-зварювальних пристосувань .....	65
4.2 Розрахунок зовнішнього центратора.....	68
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	72
5.1 Протипожежні заходи, передбачені в технологічному процесі .....	72
5.2 Оцінка технологічного процесу з умов техніки безпеки .....	73
5.3 Організація цивільної оборони .....	76
ВИСНОВКИ .....	79
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....	81
ДОДАТКИ.....	84

## ВСТУП

Магістральні трубопроводи другого охолоджуючого контуру є ключовими елементами в системі охолодження АЕС, оскільки вони забезпечують циркуляцію охолоджуючої рідини, яка відводить тепло від реактора. Ці трубопроводи працюють у складних умовах, включаючи високі температури, тиск та вплив радіації. Тому якість та надійність зварних з'єднань в цих системах є надзвичайно важливими для забезпечення безпеки та довговічності експлуатації АЕС.

Зварювання магістральних трубопроводів вимагає високої точності та компетентності, оскільки будь-які дефекти в зварних швах можуть призвести до серйозних наслідків, включаючи витіки радіоактивних матеріалів. Використання передових технологій зварювання та строгий контроль якості є обов'язковими для гарантування надійності цих важливих конструкцій [1].

## 1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

### 1.1. Опис конструкції виробу та умов його роботи

Технологічна конструкція енергоблоку атомної електростанції з реактором типу ВВЕР-1000 (рис.1.1) включає два основних контури: перший та другий (рис.1.2) [1].

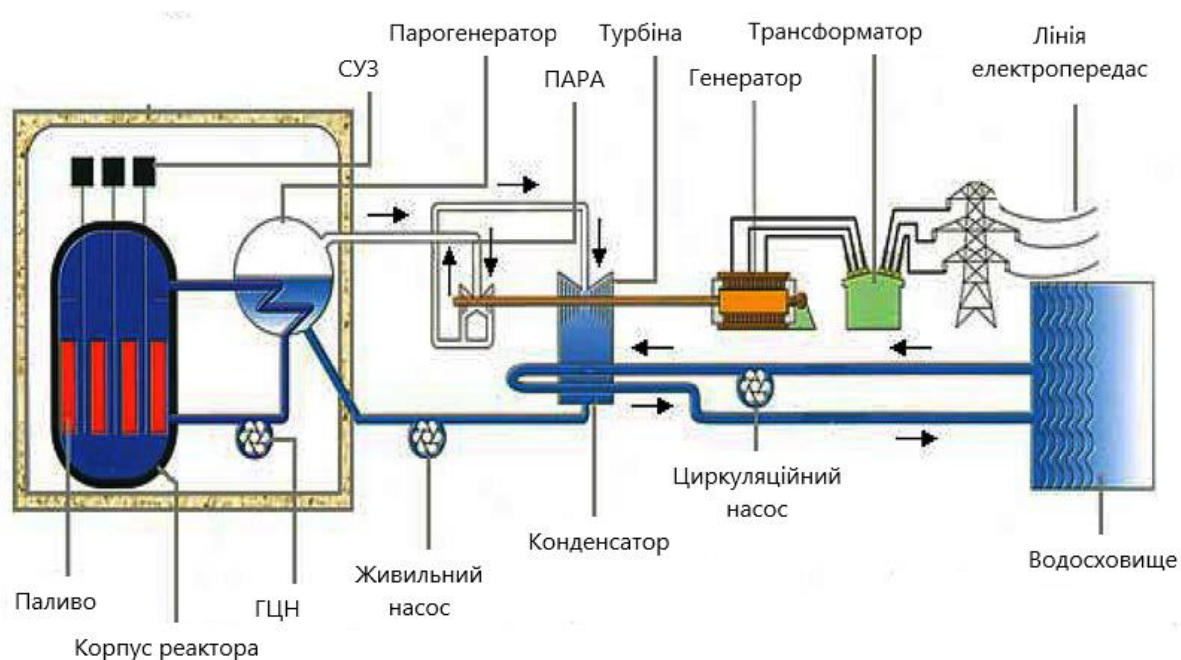


Рис. 1.1. Технологічна схема енергоблоку з атомним реактором ВВЕР-1000 [1]

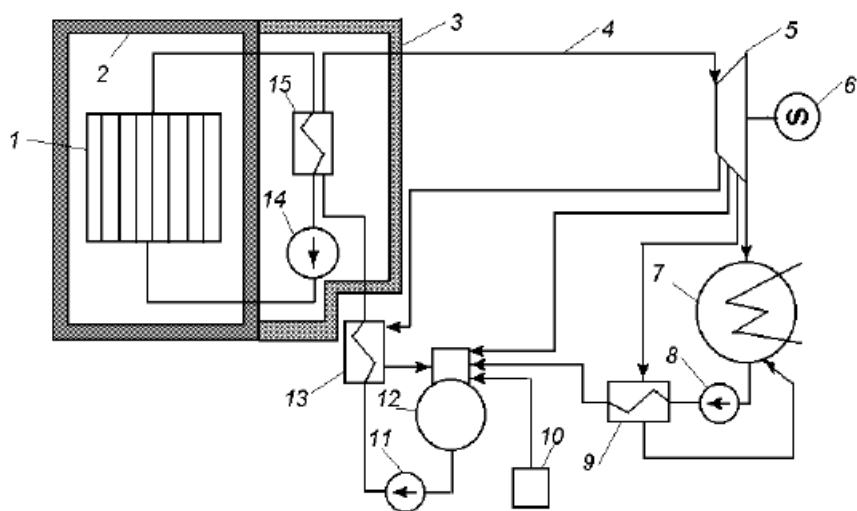


Рис. 1.3. Принципова схема двоконтурної АЕС [1]

Перший контур, що містить реактор ВВЕР та системи циркуляції охолоджуючої рідини, відомий як контур теплоносія. Він включає в себе основні циркуляційні насоси, парогенератори та інші важливі елементи, такі як компенсатор тиску, який дозволяє підтримувати стабільний тиск в системі. Цей контур відповідає за транспортування тепла від реактора до парогенератора, де відбувається обмін тепла між контурами.

Другий контур (рис. 1.3) називають контуром робочого тіла, не радіоактивний і включає в себе системи, що обслуговують парогенератори, турбіни, деаератори, насоси та інші компоненти. В цьому контурі тепло з першого контуру використовується для вироблення пари, яка згодом направляється на турбіни для генерації електроенергії. Після цього пара конденсується та повторно використовується в системі [1].

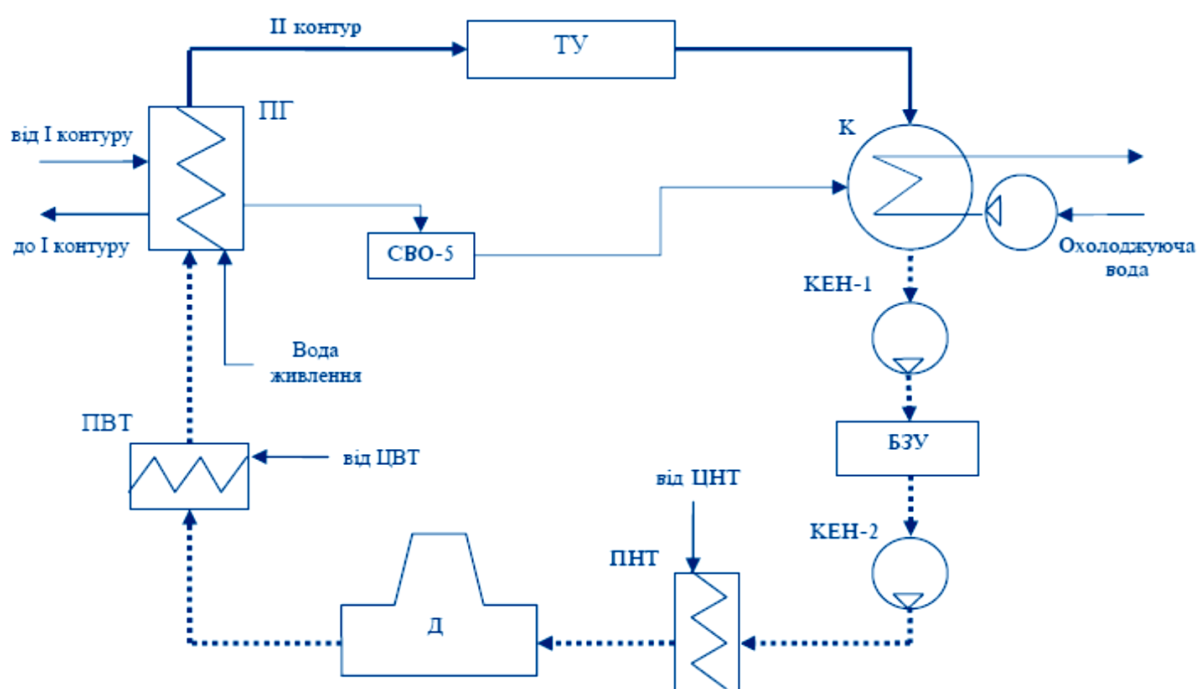


Рис. 1.3. Принципова технологічна схема другого контуру енергоблока із ВВЕР-1000 [2]: ПГ — парогенератор; ТУ — турбінна установка; К — конденсатор; КЕН-1, КЕН-2 — конденсатні електронасоси першого та другого ступенів; БЗУ — блокова знесолююча установка; ПНТ — підігрівач низького тиску; Д — деаератор; ПВТ — підігрівач високого тиску; СВО-5 — установка спеціального водоочищення

Важливість обох контурів полягає у їх взаємодії та ефективному обміні тепловою енергією. Перший контур забезпечує безпечне та ефективне

відведення тепла від реактора, в той час як другий контур перетворює це тепло на електричну енергію. Також до складу кожного з контурів входять додаткові системи, які сприяють підтримці безпеки, ефективності та надійності роботи АЕС. Наприклад, у першому контурі система аварійного охолодження активної зони та системи підживлення та очищення в обох контурах.

Всі компоненти цих контурів, включаючи трубопроводи, підігрівачі, сепаратори та інші, повинні відповідати чітким стандартам безпеки та ефективності, тому, що вони забезпечують функціонування основних систем АЕС.

В даній роботі розглядається питання розроблення технології процесу зварювання магістральних трубопроводів другого охолоджуючого контуру АЕС діаметром 273 з товщиною стінки 12 мм з дослідженням закономірностей деформування. Загальний вигляд труби 273x12 мм приведено на рис. 1.4, а на рис. 1.5 наведено ескіз трубопроводу який підлягає зварюванню.



Рис. 1.4 Загальний вигляд безшовної труби 273x12 мм із сталі 15X1М1Ф

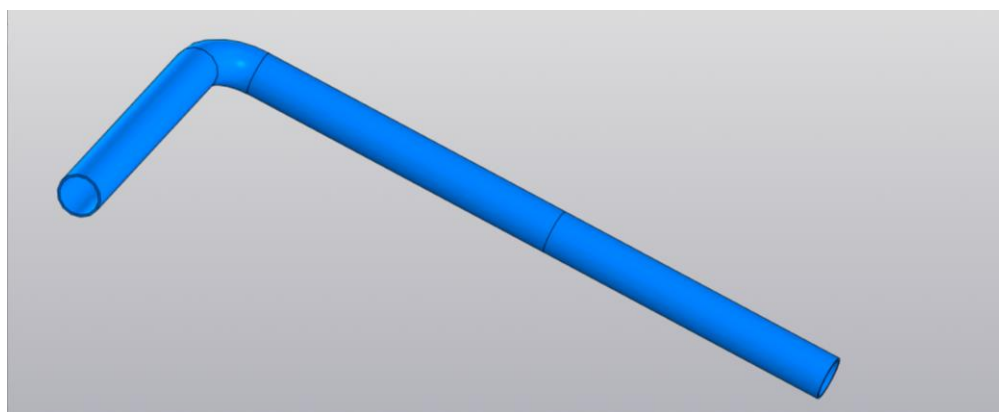


Рис. 1.5 Ескіз елементів зварного трубопроводу 273x12

Слід підкреслити, що матеріали, використані для створення обладнання другого контура атомних електростанцій з водо-водяними енергетичними реакторами (ВВЕР), є майже ідентичними до тих, які використовуються у станціях на основі органічного палива. Паропроводи, які з'єднують парогенератор і турбіну, а також трубопроводи конденсатно-живильного тракту від конденсатора до парогенератора, зазвичай виготовляють з низьколегованих жароміцних перлітних сталей (табл.1.1).

Таблиця 1.1 – Призначення низьколегованих жароміцних сталей перлітного класу [3-4]

Сталь	Призначення	Робоча температура, °С	Строк служби	Температура початку інтенсивного окалиноутворення, °С
12МХ	Труби паронагрівачів, паропроводів і колекторів енергетичних установок, арматура парових котлів і паропроводів	500–510	Вельми тривалий	570
15ХМ		520–530		570
12Х1МФ		570–585		600
15Х1М1Ф		570–585		600
18Х3МВ	Труби для гідрогенізаційних установок і нафтохімічної апаратури	450–500	Тривалий	600
20Х3МВФ		500–550		600
20Х3МВФ	Поковки (ротори, диски), болти	530–560		600
25Х1МФ	Кріпильні деталі (болти, шпильки), плоскі пружини	500–510	Тривалий	600
25Х2М1Ф		520–550		600



З'єднання окремих агрегатів атомних електростанцій вимагає значної кількості трубопроводів, серед яких особливо важливими є ті, що належать до головного циркуляційного контуру, через які протікає радіоактивне середовище під високими параметрами та об'ємами.

У конструкціях атомних електростанцій переважно використовують безшовні труби – як холоднотягнуті, так і гарячекатані, а для допоміжних систем – зварні. Так, вибір сталі для виготовлення труб дійсно залежить від ряду факторів, зокрема температури і характеру агресивного середовища, яке трубопровід буде транспортувати. Для середовищ з температурою у діапазоні 450–570 °С застосовують леговані хромом, молібденом та ванадієм перлітні сталі.

В нашому випадку застосовується сталь 15ХМ1Ф. Ця ж сталь використовують і при нижчих температурах для трубопроводів великого діаметру, щоб зменшити товщину стінок, що особливо актуально для трубопроводів насиченої пари, що подається до турбін. Інші трубопроводи АЕС, які не несуть критичної відповідальності, виготовляють з простих вуглецевих сталей. Враховуючи відповідальність конструкції застосовуємо сталь марки 15ХМ1Ф. Характеристика сталі приведена в таблицях 1.2, 1.3 та 1.4.

Таблиця 1.2 Хімічний склад матеріалу 15Х1М1Ф (ДСТУ ISO 683-17:2008) [5]

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Mo	V	Cu
0.1-0.16	0.17-0.37	0.4-0.7	до 0.25	до 0.025	до 0.025	1.1-1.4	0.9-1.1	0.2-0.25	до 0.25

Таблиця 1.3 Механічні властивості при T=20°C [5]

Сортамент	$s_b$	$s_T$	$d_5$	$y$	КСУ
-	МПа	МПа	%	%	кДж / м <sup>2</sup>
Труба	500	320	18	50	500

Таблиця 1.4 Фізичні властивості (ДСТУ ISO 683-17:2008) [5]

<b>T</b>	<b>E 10<sup>-5</sup></b>	<b>a 10<sup>6</sup></b>	<b>l</b>	<b>ρ</b>
°C	МПа	1/Град	Вт/(м·град)	кг/м <sup>3</sup>
20	2.14			7800
100	2.08	11.2	41.58	
200	2.01	11.7	40.3	
300	1.94	12.5	38.6	
400	1.87	13	36.9	
500	1.77	13.5	32.7	
600	1.69	13.7	34	
700	1.6			

У процесі зварювання, з метою адаптації до умов тривалої експлуатації за високих температур, сталі повинні демонструвати високу стійкість до повзучості, надійність у тривалому використанні, збереження властивостей протягом часу та витривалість при високих температурах. Досягнення цих характеристик можливе шляхом додавання 0,5...2,0 % хрому, 0,2...1,0% молібдену та 0,1...0,3 % ванадію, а інколи й невеликих кількостей рідкісних земельних елементів та бору. Хром у легуванні забезпечує підвищену жароміцність сталей при температурах більше 450 °С, а в поєднанні з молібденом покращує тривалу міцність та опір повзучості завдяки формуванню зміцнюючих фаз Лавеса Fe<sub>2</sub>Mo. Ванадій, у комбінації з вуглецем, забезпечує зміцнення сталі через утворення високодисперсних карбідів. В контексті ступеня легування, теплостійкі сталі охоплюють низько- та середньолеговані варіанти, а також хромомартенситні та мартенситно-феритні сталі, розраховані для використання при температурі до 500...550 °С. [6]

За період експлуатації відбуваються зміни в структурі сталі, що впливають на її жароміцність. Для довготривалого використання зазвичай обирають сталі з низькою початковою жароміцністю, але з більш стабільною структурою. В зварних конструкціях переважно вдаються до першого типу структурного

зміцнення, оскільки тверді розчини заміщення забезпечують більш пластичний метал у зоні термічного впливу під час зварювання, на відміну від карбідного зміцнення. Хромомолібденові теплостійкі сталі ідеально підходять для зварних конструкцій завдяки своїй структурній стабільності при тривалому використанні при високих температурах. Основними легуючими елементами в теплостійких сталях є хром і молібден. Легування сталей і металу шва хромом (0,5 % і вище) запобігає графітизації при температурах 400° С і вище, а також збільшує стійкість до корозії. Хром позитивно впливає на тривалу міцність сталі, особливо при вмісті хрому в межах 1,0...1,4% і додаванні 0,5 % молібдену, що особливо помітно при температурі 538° С. [6]

Молібден широко використовується у легуванні теплостійких сталей та металу швів, особливо ефективно збільшуючи опір повзучості при додаванні у концентрації 0,5...1,0%. Він підвищує температуру рекристалізації заліза, що сприяє зміцненню металу при високих температурах.

Теплостійкі сталі перлітного класу відносяться до групи сталей з поганою зварюваністю. Вони дуже чутливі до термічного циклу зварювання і тому вимагають застосування попереднього та супутнього підігріву, а після зварювання проведення термічної обробки для зняття зварювальних напружень – відпуск.

З метою оцінки здатності даної сталі до утворення зварних з'єднань визначимо її зварюваність. Визначення зварюваності включає ряд аспектів:

- важливо враховувати, наскільки матеріал чутливий до утворення оксидів під час зварювання, що може впливати на якість та міцність з'єднання;
- схильність матеріалу утворювати пори (порожнини) під час процесу зварювання;
- здатність зварюваного з'єднання відповідати вимогам щодо міцності, стійкості до корозії та інших властивостей, необхідних для конкретного застосування;
- реакція матеріалу на зміни температури під час зварювання та охолодження.

Зазначений комплекс параметрів особливо важливий для вуглецевих і низьколегованих сталей, і опірність утворенню тріщин є найсуттєвішою характеристикою при зварюванні цих матеріалів.

Гарячі тріщини утворюються при ослабленні деформаційної здатності металу через виникнення легкоплавких крихких евтектик, дефектів кристалічної будови та напружень [7].

Показник Вілкінсона (H.C.S) є одним із методів визначення імовірності появи гарячих тріщин під час зварювання і знаходиться його за формулою:

$$H.C.S. = 1000 \cdot C \cdot \frac{(S+P+\frac{Si}{25}+\frac{Ni}{100})}{(3 \cdot Mn+Cr+Mo+V)} \quad (1.1)$$

$$H.C.S. = 1000 \cdot 0,16 \cdot \frac{(0,025+0,025+\frac{0,37}{25}+\frac{0,25}{100})}{(3 \cdot 0,7+1,4+1,1+0,25)} = 2,2.$$

Для сталей із межею міцності  $\sigma_B < 700$  МПа умовою появи гарячих тріщин є  $H.C.S. > 4$ . В нашому випадку поява гарячих тріщин малоімовірна.

Оцінку опірності стали тріщинам при термічній обробці (ТТО) проводять за параметром  $\Delta G$ :

$$\Delta G = Cr + 3,3 \cdot Mo + 8,1 \cdot V + 10C - 2, \quad (1.2)$$

$$\Delta G = 1,1 + 3,3 \cdot 0,9 + 8,1 \cdot 0,2 + 10 \cdot 0,1 - 2 = 3,6$$

При  $\Delta G < 0,5$  сталь не схильна утворювати тріщини при повторному нагріванні у процесі термічної обробки. Якщо параметр  $\Delta G > 2$ , то при високій відпустці можливе утворення тріщин повторного нагріву.

Так, вуглецевий еквівалент є важливим показником для оцінки схильності металу до появи холодних тріщин під час зварювання. Він використовується для визначення впливу хімічного складу металу на зварюваність і може бути корисним при попередній оцінці ризику виникнення холодних тріщин.

Таблиця 1.5 - Класифікація сталей по зварюваності

Група сталей	Зварюваність	Еквівалент Се, %	Технологічні заходи			
			підігрів		термооброблення	
			перед зварюванням	під час зварювання	перед зварюванням	після зварювання
1	Добра	< 0,38	-	-	-	бажано
2	Задовільна	0,38 - 0,45	необхідний	-	бажано	необхідне
3	Обмежена	0,46 - 0,6	необхідний	бажано	бажано	необхідне
4	Погана	> 0,6	необхідний	необхідний	необхідне	необхідне

$$C_e = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn+Cu+Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5 \cdot B + \frac{S}{600} + \frac{H}{60}; \quad (1.3)$$

$$C_e = 0,16 + \frac{0,37}{30} + \frac{0,7 + 0,25 + 1,4}{20} + \frac{0,25}{60} + \frac{1,1}{15} + \frac{0,25}{10} + \frac{0,025}{600} + \frac{2,5}{60} = 0,43$$

За проведеними розрахунками, можна сказати, що дана сталь має задовільну зварюваність і поява гарячих тріщин цілком можлива.

Упродовж зварювання теплостійких сталей однією з основних проблем є запобігання утворенню холодних тріщин у металі шва та прилеглих зонах. Для цього зварювання таких сталей проводиться при підвищеній температурі підігріву в межах 200...400°C і здійснюється їх термообробка безпосередньо після зварювання, не допускаючи охолодження до кімнатної температури, або не пізніше ніж через 72 години після завершення зварювання.

Так, забезпечення необхідних властивостей зварного з'єднання є однією з ключових задач при зварюванні сталей. Це включає в себе дотримання вимог щодо міцності, стійкості до корозії, тривалості служби та інших властивостей, які необхідні для конкретного застосування звареного конструкційного елемента чи деталі.

Існуючі методи зварювання та зварювальні матеріали забезпечують достатню стійкість шва проти утворення гарячих тріщин та задовільні характеристики зварного з'єднання. Однак, вони не гарантують повного усунення ризику появи холодних тріщин та зміцнення металу в області

термічного впливу зварювання. Холодні тріщини можуть утворюватися під час або відразу після зварювання внаслідок утворення троостита й мартенситу в зонах, що нагріваються до температури вище  $A_{c3}$ , під впливом водню та напружень, спричинених нерівномірним нагріванням та структурними змінами. Відтак, для зварювання рекомендується використовувати низьководневі матеріали, такі як електроди з основним покриттям, осушені захисні гази та прожарені флюси.

Так, додатковий місцевий чи загальний підігрів є ефективним способом запобігання утворенню холодних тріщин під час зварювання.

Підігрів зменшує температурні перепади в зоні зварювання, що пом'якшує напруження в металі навколо шва та перешкоджає перетворенню аустеніту в мартенсит. Вища температура металу також сприяє дифузії водню, його виведенню зі зварного з'єднання, а також підвищує пластичність і деформаційну здатність металу. Проте, під час зварювання теплостійких сталей необхідно контролювати не тільки мінімальну, але й максимальну межу температури підігріву, оскільки при високих температурах може відбутися розпад аустеніту, утворюючи грубу феритно-перлітну структуру зі зниженою межею тривалої міцності та низькою ударною в'язкістю.

У деяких випадках також доцільно витримувати зварні з'єднання після зварювання при  $150...200\text{ }^{\circ}\text{C}$  на кілька годин для завершення перетворення залишкового аустеніту та виведення водню.

## **1.2 Технічні умови до конструкції виробу.**

Розробка та монтаж трубопровідних систем мають бути у відповідності зі стандартами СОУ НАЕК 158:2020 і НП 306.2.227-2020. Їхні конструкції мають гарантувати функціональність, довговічність та безпечність використання на протязі визначеного у технічних документах та паспортах продукції строку служби. Також вони мають забезпечувати легкість у проведенні перевірок, ремонтів, гідравлічних (пневматичних) тестувань, а також неруйнівного контролю основного металу та зварених з'єднань, як під час виготовлення

(монтажу), так і під час експлуатації.

Розміщення трубопроводів має уникати їх пошкодження через взаємні рухи. Шляхом зварювання повинно здійснюватися з'єднання елементів трубопроводів. Можна використовувати роз'ємні фланцеві з'єднання (в тому числі різьбові з ущільненням, конусного типу) за необхідності, визначеної в обслуговуванні обладнання або трубопроводів.

Компенсація температурних розширень трубопроводів можлива через самокомпенсацію або з використанням спеціальних компенсаторів. Використання лінзових компенсаторів допускається лише для трубопроводів з робочим тиском до 2,45 МПа.

Середній радіус вигину трубопроводів (гнучких відводів) повинен бути:

- для холодного згинання - не менше 3,5 від зовнішнього діаметра коліна;
- для гарячого деформування (з використанням згинання, протяжки, штампування, опади) і для штампо-зварних колін - не менше зовнішнього діаметра коліна;
- номінальний зовнішній діаметр вимірюється на кінцях коліна.

Зварні секторні відводи, трійники та переходи можна використовувати для трубопроводів групи В з робочим тиском до 1,57 МПа і розрахунковою температурою до 100 °С, а також для трубопроводів групи С з робочим тиском до 3,9 МПа та розрахунковою температурою до 350 °С.

У зварних секторних відводах кут  $\theta$  повинен бути не більше 15°, відстань  $l$  не менше 100 мм (рис. 1.6).

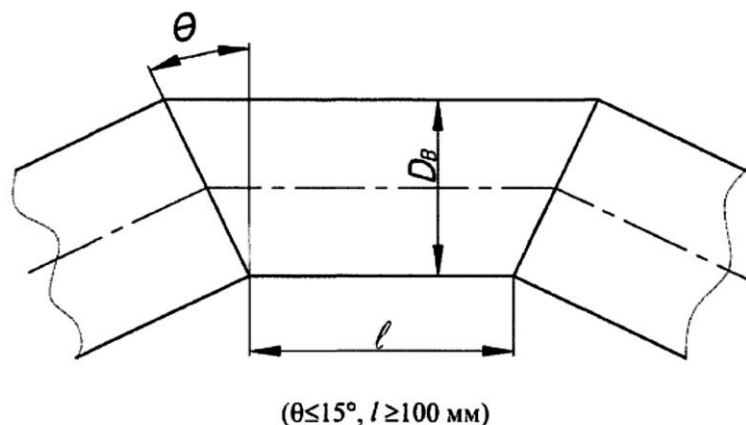


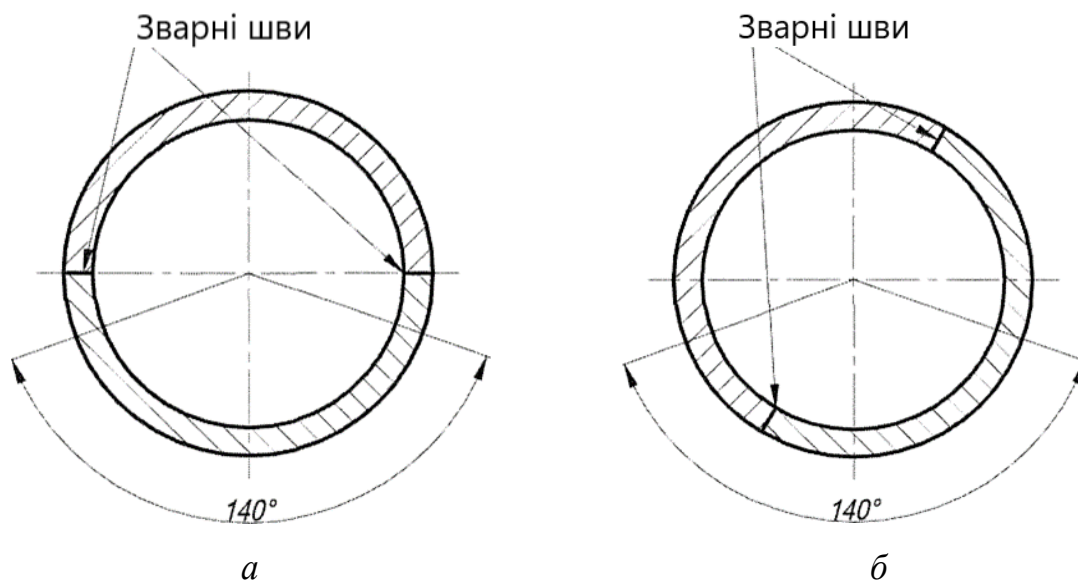
Рис. 1.6 — Схема секторного відводу [3]

Горизонтальні частини трубопроводів мають бути встановлені з мінімальним нахилом 0,004 у напрямку до системи дренажу. У випадку паропроводів, цей нахил необхідно підтримувати при температурі, яка відповідає температурі насиченого пару при визначеному робочому тиску.

Зварювання повинно проводитися у відповідності з вимогами СОУ НАЕК 159. Повне проплавлення визначається як стан, при якому всі частини з'єднання пройшли процес плавлення та сполучені в єдину масу металу без наявності порожнеч, тріщин чи інших дефектів.

У стикових зварних з'єднаннях елементів з різною товщиною стінок необхідно забезпечити плавний перехід між елементами.

При розробці обладнання, яке функціонує в горизонтальному положенні, розміщення поздовжніх зварних з'єднань у будь-якому сегменті центрального кута  $140^\circ$ , як показано на рис. 1.7. Виключення можливі тільки тоді, коли ці з'єднання легко доступні для перевірки та контролю під час експлуатації.



а - рекомендоване; б - не рекомендоване

Рис 1.7 — Розміщення зварних швів у нижній частині трубопроводів [3]

Зазвичай зварні з'єднання повинні бути встановлені в місцях, що не перебувають безпосередньо під опорами. Розміщення опор над або під зварними з'єднаннями можливе, якщо виконані наступні умови:

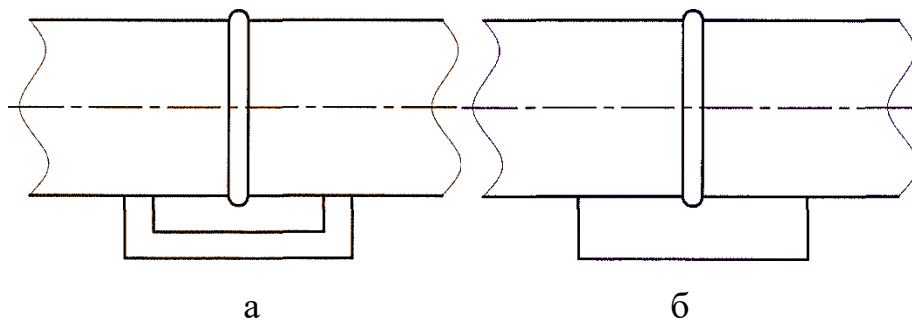
- конструкція та місце розташування опори мають забезпечувати



доступність для контролю зварного з'єднання під нею протягом усього періоду експлуатації (рис.1.8);

- зварне з'єднання, яке виконане під час виготовлення або монтажу обладнання, повинне бути піддане комплексному ультразвуковому або радіографічному контролю. Додатково, ділянка зварного з'єднання, яка знаходиться безпосередньо під опорою, має пройти магніто-порошкове або капілярне випробування.

За будь-яких обставин забороняється закривати опорами місця, де зварні з'єднання перетинаються або з'єднуються.



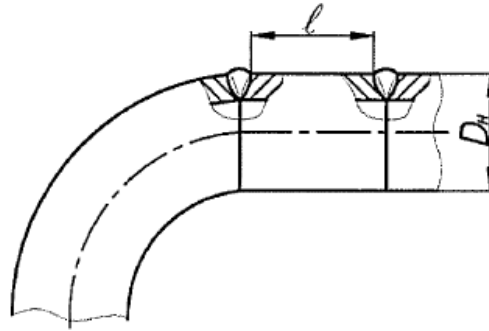
а - допустиме; б - недопущене

Рис. 1.8 - Розташування опор в зоні зварних швів [3]

На криволінійних сегментах зварних колін допустимо мати тільки одне поперечне кільцеве з'єднання.

В поперечних стикових зварних з'єднаннях елементів з поздовжніми зварними з'єднаннями не допускається співпадання осей поздовжніх швів сусідніх деталей. Осі цих швів мають бути зміщені відносно одне одного на відстань, що втричі перевищує номінальну товщину більш товстостінної з деталей, але не менше 100 мм.

Зазначена вимога стосується дотримання мінімальної відстані між краєм шва стикового зварного з'єднання трубопроводу з фланцем (штуцером) та краєм шва найближчого стикового зварного з'єднання на трубопроводі. Для трубопроводів з номінальним зовнішнім діаметром понад 100 мм встановлено, що ця відстань повинна бути не менше 100 мм (рис. 1.9).



(при  $D_n > 100$  мм  $l \geq 100$  мм)

Рис. 1.9 - Розміщення зварних швів при приварюванні коліна до труби [3]

Процес різання заготовок та вирізання отворів має здійснюватися з використанням технологій, що запобігають формуванню тріщин. Після термічного різання необхідно виконати механічну обробку кромки.

Овальність зігнутих ділянок труб не повинна перевищувати 6% для деталей трубопроводів групи А, 8% для деталей трубопроводів групи В, та 12% для деталей трубопроводів групи С, крім випадків, коли технічна документація на виріб встановлює менші значення овальності.

Торці труб необхідно обрізати так, щоб вони були строго перпендикулярні, з максимальним відхиленням від правильного кута не більше 1,2 мм. Краї труб слід підготувати до зварювання з ухилом кромки під кутом  $30^\circ$ , припускаючи відхилення до мінус  $5^\circ$ , та з закругленням країв від 1 до 3 мм.

Перед зварюванням стиків труб здійснюється їх сушіння або підігрів, щоб запобігти утворенню тріщин. Довжина прихваток повинна складати 20-120 мм, відстань між ними — 400-600 мм, причому їх переріз не повинен бути більше третини перетину шва.

Зварні з'єднання на трубопроводах мають відповідати таким критеріям:

- Зварні шви мають бути виконані багат шарово і без внутрішніх непроварів;
- Вигляд і геометрія швів мають відповідати нормативам:
  - 1) кореневий шов без зовнішніх дефектів;

- 2) перехідний шар кореневого шва з плавним переходом до основного металу, без підрізів, шириною 8-10 мм та опуклістю 1-3 мм;
- 3) внутрішній шов також має плавний перехід до основного металу, без підрізів;
- 4) заповнюючі та облицювальні шви виконуються з перекриттям кожного наступного шару на  $\frac{1}{3}$  ширини попереднього;
- 5) облицювальний шар з плавним переходом до основного металу, без підрізів, з перекриттям основного металу на 1.5-3 мм з кожного боку;
- 6) зовнішня поверхня швів і біляшовної зони повинні бути зачищені.

У зварних з'єднаннях неприпустимі тріщини, напливи, несплавлення, підрізи, пропали металу в місцях контакту електроду з поверхнею зварюваних елементів, незаварені кратери та їх виведення на основний метал.

Для зварювання трубопроводів слід використовувати матеріали, зазначені в СОУ НАЕК 159.

### **1.3 Аналіз технологічного процесу зварювання стиків труб**

Процес зварювання трубопроводів здійснюється з використанням передових методів виробництва заготовок, їх складання та зварювання. Цей процес можна розділити на чотири основні етапи:

а) Підготовчі роботи:

- доставка деталей трубопроводу на місце робіт та їх розвантаження;
- обробка і підготовка кромek деталей трубопроводу.

б) Складання:

- складання сегментів трубопроводу у проектне положення;
- перевірка положення геометрії осі трубопроводу в вертикальній та горизонтальній площинах згідно проектних параметрів.

в) Зварювання:

- здійснення зварювальних робіт на складених ділянках трубопроводу.

г) Контроль якості: включає перевірку виконання робіт на кожному етапі, а також якість зварних швів.

При виготовленні трубопроводу використовують метод ручного аргонно-дугового зварювання з неплавким вольфрамовим електродом. Зварювання проводять на режимах які приведено в таблиці 1.6.

Таблиця 1.6 – Режими зварювання за базовою технологією

Товщина, мм	Кількість проходів	Зазор, мм	$d_e$ , мм,	$d_{пр.е}$ , мм	$I_{зв}$ , А	U, В	$V_{зв}$ , м/год	$Q_T$ , л/хв
12,0	3-4	2,5	5,0	4,0	240...250	10...15	15...20	4...6

Перед початком зварювання виконуються обширні підготовчі роботи, які займають значно більше часу, ніж саме зварювання.

Монтажні стики трубопроводу збираються за допомогою зовнішнього центратора. Процес складання включає наступні кроки: труби розташовують на необхідний зазор відповідно до вимог, на них надягають центратор для вирівнювання труб, фіксують їх і проводять зварювання кореня шва. Зварювання кореня шва виконується без присадного матеріалу на режимах, вказаних у таблиці 1.4, при цьому зменшуючи струм зварювання на 40-60В. Після зварювання кореня шва здійснюють якісний контроль і очищають поверхню шва. Наставляють наступні шари шва на встановлених режимах, але перед цим обов'язково очищають кожен шар за допомогою металевих щіток для видалення окалини, що утворилася після зварювання. По завершенні всіх зварювальних операцій проводять ультразвукову дефектоскопію зварного з'єднання.

До основних недоліків цього підходу можна віднести низьку продуктивність та не завжди високу якість зварного шва. Тому, враховуючи вищесказане, необхідно розробити технологію автоматизованого аргонно-дугового зварювання монтажних стиків трубопроводу.

## 2 НАУКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА

### 2.1 Кінетика деформування матеріалів за сумісної дії статичного і циклічного навантаження

Відомо, що кінетика деформування і руйнування за одночасної дії статичного і низькоамплітудного циклічного навантаження є актуальною і складною задачею. Даний вид навантажень наявний при експлуатації мостів, резервуарів високого тиску, нафто-газових та трубопроводів, і їх вивченню присвячена значна кількість праць. Встановлено, що низькоамплітудна циклічна складова навантаження змінює деформаційні параметри і кінетику руйнування, а саме: деформаційні діаграми, руйнівну деформацію, тримку здатність, а також мікроструктурні параметри матеріалу.

Врахування циклічної зміни навантаження на напружено-деформований стан тіл з тріщинами є достатньо складною задачею, її точний розв'язок поки що відсутній. Складність побудови розв'язку вказаної задачі обумовлена наступними чинниками:

- змінне навантаження призводить до виникнення в околі вершини тріщини залишкових стискаючих напружень;
- циклічне пластичне деформування в околі вершини тріщини істотно впливає на напружено-деформований стан у зв'язку з процесами зміцнення та зміцнення;
- при циклічному навантаженні в додатній частині циклу настає закриття тріщини, тобто під час розвантаження протилежні береги тріщини контактують, і це також істотно впливає на напружено-деформований стан конструкційного елемента чи зразка з тріщиною.

Закриття тріщини може бути зумовлене циклічною пластичністю в околі вістря тріщини, окисненням поверхонь тріщини, а також шорсткістю зламу.

У випадку, коли розмір пластичної зони істотно менший від довжини тріщини, для визначення поля напружень за її межами формально можуть бути використані співвідношення лінійної теорії пружності.

При циклічному пружнопластичному деформуванні розподіл напружень і деформацій в околі вершини тріщини у першому наближенні обчислюють на основі розв'язків для монотонного навантаження. У цьому випадку використовують діаграму циклічного деформування та враховують ефект Баушінгера. Деякого поширення набули спрощені підходи, наприклад, метод суперпозиції.

Розраховуючи НДС тіл з тріщинами при пружнопластичному циклічному навантаженні науковці досить ефективно застосовують чисельні методи.

Застосування додаткового циклічного навантаження може призвести до збільшення, зменшення або взагалі не впливати на деформацію і руйнування в залежності від матеріалу, температури та відносної величини циклічної і статичної компонент напруження.

У багатьох наукових висновках зауважується, що вплив циклічного навантаження на довговічність конструкцій не має чіткої однозначності. Ті самі матеріали може вести себе по-різному при різних температурах, рівнях статичних та циклічних напружень, амплітудах навантаження [10-12]. Дане явище має як негативний, так і позитивний вплив на тримку міцність і довговічність елементів конструкцій, особливо за наявності дефектів, таких як тріщини. Як показано авторами в праці [13] наявність тріщини і сумісна дія циклічного і статичного навантаження при реалізації попереднього теплового перевантаження збільшує опір крихкому руйнуванню сталі.

Взаємодія розтягу та інших впливів може породжувати специфічні структурні та мікроструктурні зміни у матеріалах, що, в свою чергу, мають вплив на параметри деформації та руйнування. Під структурними змінами розуміють динамічну рекристалізацію, яка характерна для певних матеріалів (наприклад, нікелю), а під мікроструктурними - зміни в дислокаційних конфігураціях, які спостерігались для широкого кола матеріалів (мідь, нікель,

хромо-молібденові сплави). Дослідження показали, що у нікелі при накладенні циклічного навантажування середній розмір зерен у рекристалізованій області в 4,5 рази менший, ніж при руйнуванні, яке відбувалося за статичного навантажування. Як правило коефіцієнт асиметрії циклу залежать від конфігурації дислокацій [14].

Дані авторів [15] свідчать, що комбіноване навантажування з амплітудою циклічної складової 15 Гц значно збільшує загальну деформацію при однаковому рівні напружень. Це пов'язують з процесами повзучості за циклічного навантажування з малою амплітудою. Слід зауважити, що відношення деформації при комбінованому навантажуванні до деформації при статичному залишається приблизно сталим для всього діапазону, де помітна різниця між діаграмами. Відхилення від пропорційної ділянки при комбінованому навантажуванні спостерігається при меншому напруженні порівняно із квазістатичним навантажуванням для діаграм  $\sigma_c$ - $\varepsilon_c$  і  $\sigma_{\max}$ - $\varepsilon_{\max}$  (тут  $\sigma_c$  і  $\varepsilon_c$  - статична складова напружень і деформації за комбінованого навантаження,  $\sigma_{\max}$  і  $\varepsilon_{\max}$  - найбільші значення напружень і деформації). Встановлено, що умовна границя текучості за розтягу під дією циклічного навантажування зменшується з 175МПа до 165МПа [15].

Циклічне навантажування, яке накладається на квазістатичний розтяг зразка з тріщиною із сплаву АМг6, збільшує розкриття її вершини порівняно з квазістатичним розтягом. Максимальний ефект досягається при накладенні циклічної складової з частотою 25 Гц та амплітудою коефіцієнту інтенсивності напружень (КІН)  $K_a = \pm 1,6 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$  (тут  $K_a = (K_{\max} - K_{\min})/2$ , де  $K_{\max}$  і  $K_{\min}$  - відповідно найбільше і найменше значення КІН). Збільшення частоти до 50 Гц за однакових умов приводить до зменшення розкриття вершини тріщини [6].

Виявлено, що основним механізмом зростання деформації при накладанні додаткової циклічної складової є подрібнення зерна. При деформуванні комбінованим розтягом зменшується ширина базових зерен порівняно з первісним матеріалом (до 30 %) і з квазістатичним навантажуванням (до 10 %), а подрібнення рівновісних зерен становило – 13 бал при комбінованому розтягу

порівняно з 11 – 12 балом при квазістатичному розтязі та 11 балом у первісному стані [15].

У дослідженні, зазначеному у праці [15], виявлено, що накладання додаткової циклічної складової на квазістатичний розтяг сплаву АМг6 призводить до змін у механізмі руйнування. Це включає стабілізацію процесу утворення та розвитку макротріщин відриву, формування стрічкового рельєфу та появу тонких і протяжних мікротріщин, яких не спостерігається при квазістатичному розтягу.

## **2.2 Вплив наводнювальних середовищ на закономірності деформування теплостійких сталей**

Проблема впливу водню на фізико-механічні властивості матеріалів стала однією із найважливіших при надійності конструкцій. Водень, проникаючи в конструкційний метал, суттєво знижує його опір руйнуванню, а пластичний метал окрихчується. При цьому машини і обладнання, які мають достатні міцність, ресурс, та надійність при звичайних умовах, під дією водню втрачають роботоздатність і передчасно руйнуються. Виявлено, що матеріали з більш високою межею міцності, які широко використовуються в техніці, як правило є більш чутливі до впливу водню, що призводить до пониження навантаженості конструкцій, підвищення її металоємкості, зниження ефективності.

Вивчення впливу водню на структуру та фізико-механічні властивості металів в Україні було започатковано Г. В. Карпенком. Пізніше такі дослідження проводили В. В. Панасюк, Р. І. Крип'якевич, В. І. Похмурський, О. Є. Андрейків, Г. М. Никифорчин, М. М. Швед, В. І. Ткачов, В. В. Федоров, В. А. Яртись та ін.

Перші досягнення пов'язують з вивченням впливу електролітичного наводнювання та внутрішнього водню на міцність металу. Виявлено, що наводнювання зразків маловуглецевої сталі з перлітно-феритною структурою суттєво знижує їх відносне видовження та відносне звуження під час розриву і майже не впливає на границі текучості та міцності. Карпенко Г.В. довів, що із



зменшенням швидкості розтягу зразків відпаленої маловуглецевої сталі суттєво збільшується негативний вплив водню на її пластичність – відносне видовження і відносне звуження знижуються майже в 2 рази. Електролітичне насичення воднем до двох порядків підвищує швидкість РВТ у вуглецевих сталях при малих значеннях КН, причому більш негативний вплив спостерігається для сталей з мартенситною структурою встановив Похмурський В.І.

Вплив водню на деформаційні і руйнівні процеси металів досліджено в працях В. І. Похмурського, М. М. Шведа, В. В. Федорова та ін. В працях Панасюка В.В. розроблена дислокаційно – декогезійна концепція ролі водню у руйнуванні металів, яка враховує зменшення під впливом водню сил міжатомної взаємодії в ядрах дислокацій, що полегшує їх рух та злиття в зародкові тріщини в процесі деформування тіла.

Вплив водню на міцність і руйнування конструкційних матеріалів поділяють на три види. Оборотно водневе окрихчення – це погіршення характеристик, що відповідають за довговічність і міцність металів при деформуванні в водні. Процес руйнування не супроводжується ні хімічними реакціями ні мікроструктурними змінами. Найбільший вплив водень має на границю міцності і деформації. Властивості металу, після усунення водню, повністю відновлюються.

Хімічна та фізико-хімічна деградація – утворення в сплавах нових фаз водневмісних сполук, структурні перетворення, воднева корозія вуглецевих сталей.

Третій вид впливу водню це воднева деструкція, виникнення в недеформованих металах несучільностей, хімічних реакцій. Несучільності появляються внаслідок пересичення металу воднем.

Два останні види впливу характеризуються незворотніми змінами, які залишаються навіть після усунення водню з металу або середовища.

В праці Походні І.К. досліджено природу оборотної водневої крихкості сплавів заліза з ОЦС-граткою, які наводнювали електролітично. Вплив наводнювання на механічні властивості визначали за одновісного розтягу

циліндричних зразків з воднем і без водню. Потім ці величини співставляли при однакових рівнях деформації для зразків з воднем і без водню.

Виявлено, що в інтервалі температур 77...293 К водень не впливав на границю плинності сталі Ст3, а сталь ВМНЛ при середній концентрації водню 3,0 см<sup>3</sup>/100гр. руйнувалася майже на границі текучості, тобто окрихчення виявилось катастрофічним.

Походня І.К. з співавторами виявили, що вирішальна роль в механізмі оборотної водневої крихкості належить дислокаціям, переміщення яких є елементарним актом пластичної деформації, що ініціює крихке руйнування. Також пластична деформація є найефективнішим методом транспортування водню в об'ємі металу.

В працях Студент О.З. досліджено вплив газоподібного і внутрішнього (абсорбованого металом під час старіння) водню на міцнісні параметри, пластичність та циклічну тріщиностійкість сталі 15Х2МФА ( $\sigma_{0,2} = 470$  МПа при 298К) з врахуванням температури та стан металу після тривалого впливу сумісної дії водню, високої температури та механічних напружень. Виявлено, що водень знижує границю міцності  $\sigma_B$  на 13 %, границю текучості  $\sigma_{0,2}$  на 15 % у порівнянні з первинним матеріалом.

В праці Походні І.К з співавторами досліджено вплив електролітичного водню на напруження сколювання сталей Ст3, 09Г2С, 08Х4Н2М. Виявлено, що наявність водню в сталі істотно зменшує напруження сколювання з 1300 МПа до 760 МПа для сталі Ст3, з 1800 МПа до 920 МПа для сталі 08Х4Н2М і змінює рельєф поверхні руйнування зразків; приводячи до появи ділянок крихкого руйнування з численними мікротріщинами.

Вчені виявили, що сколювання реалізується внаслідок одночасного зародження руйнування в декількох полосах ковзання які перетинаються і передують значна пластична деформація в цих полосах. Виявлено, що водень в результаті послаблення когезивної сили полегшує деформаційні процеси пластичної на початкових стадіях навантаження.

Площини ковзання є місцями локалізації водню в аустенітних сталях, внаслідок чого водень послаблює когезивні сили і призводить до раннього зародження в них мікротріщин, які сприяють локалізації пластичної деформації.

Співробітника ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАНУ встановлено, що вплив водню на здатність заліза і його сплавів до пластичної деформації проявляється в зміні показників пластичності або в зниженні загальної довговічності наводненого металу. Порівняння первісних і наводнених зразків показало, що при низьких амплітудах за присутності водню досягається більше деформаційне зміцнення, а при високих циклічних навантаженнях зразки стрімко знеміцнюються.

В праці Крижанівського Є.І. з співавторами встановлено, що попереднє пластичне деформування (ППД) суттєво змінює механічні властивості конструкційних сталей, в першу чергу окрихчує матеріал, що проявляється в зменшенні видовження при розриві, підвищенні твердості, зниженні температури в'язко-крихкого переходу. У випадку експлуатації сталей у воденьмістких середовищах важливо враховувати сумісний вплив наводнювання та ППД на їх механічну поведінку. При цьому спостерігається складний вплив пластичного деформування матеріалів на їх механічні властивості і катастрофічне зниження статичної та циклічної тріщиностійкості за присутності водню. Дана проблема особливо актуальна для теплостійких сталей, що експлуатуються за складних умов механічного навантаження та дії агресивного робочого середовища, і для яких тримка здатність крихкому руйнуванню є головним показником роботоздатності.

### **2.3 Вплив температури випробувань 423...623К**

Дослідження було здійснено за допомогою циліндричних гладких зразків зі сталі 15ХМ1Ф, діаметр робочої частини яких становив 5 та 8 мм. Випробування проводилися на сервогідрравлічній випробувальній машині СТМ – 100 відповідно до вимог [16].

На рис. 2.1. подано загальний вигляд діаграм деформування сталі 15ХМ1Ф за розтягу і комбінованого розтягу.

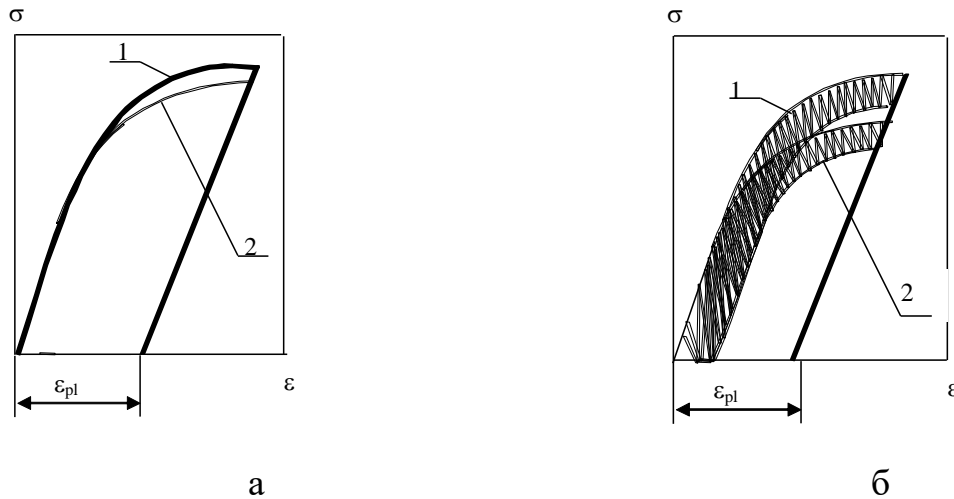


Рис. 2.1. Загальний вигляд діаграм деформування за розтягу – а і комбінованого розтягу – б при 423 К – 1 і 623 К – 2.

З рисунку 2.1 випливає, що діаграма попереднього деформування при температурі 423 К має більші значення напружень порівняно з діаграмою деформування при 623 К. Важливо відзначити, що ця тенденція спостерігається як при розтязі, так і при комбінованому розтязі, хоча значення напружень при комбінованому розтязі менше, ніж при розтязі, для обох температур.

Шляхом використання діаграм деформування для зразків із сталі 15ХМ1Ф, що деформувалися на рівні 0,5%, 1,0% і 3,0% при одновісному розтязі, були визначені показники та коефіцієнти деформаційного зміцнення ( $n$  і  $\alpha$  відповідно) з рівняння, яке зв'язує напруження та пластичну деформацію. Важливо відзначити, що показник деформаційного зміцнення був визначений в відносних координатах за середньою складовою напружень при обох типах навантаження.

На рис. 2.2 приведено залежність впливу температури попереднього пластичного деформування на показник деформаційного зміцнення  $n$ , визначений з формули

$$\bar{\varepsilon} = \alpha \bar{\sigma}^n. \quad (2.1)$$

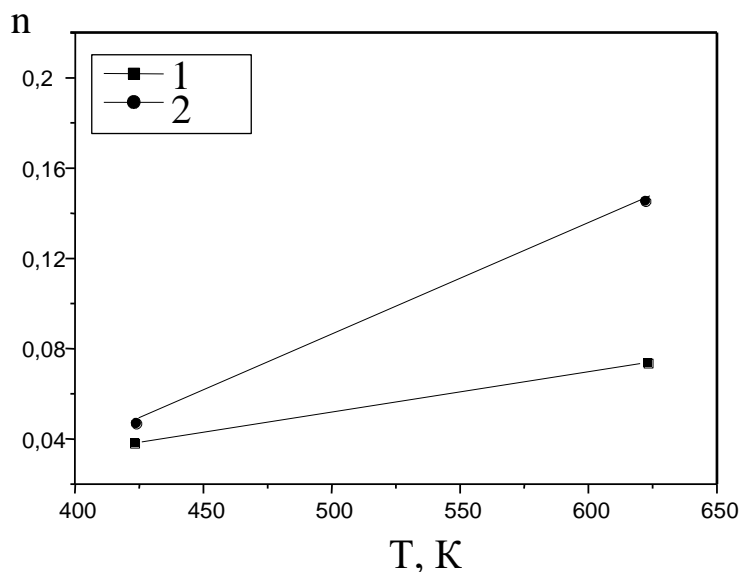


Рис. 2.2. Вплив температури деформування сталі 15XМ1Ф на показник деформаційного зміцнення за розтягу – 1 і комбінованого розтягу – 2.

Згідно з рисунком 2.2, при збільшенні температури пружно-пластичного деформування при 423 К і 623 К показник деформаційного зміцнення зростає, і це відбувається більш швидко для комбінованого розтягу у порівнянні з одновісним розтягом. Важливо відзначити, що деформування за температури 423 К практично не впливає на показник деформаційного зміцнення.

Отже, можна зауважити, що низькоамплітудна циклічна складова у поєднанні з розтягом та високою (623 К) деформаційною температурою істотно зміцнює матеріал у порівнянні з розтягом.

#### 2.4. Вплив параметрів циклічного навантаження

На рис. 2.3 представлений вигляд діаграм деформування під час попереднього пластичного деформування.

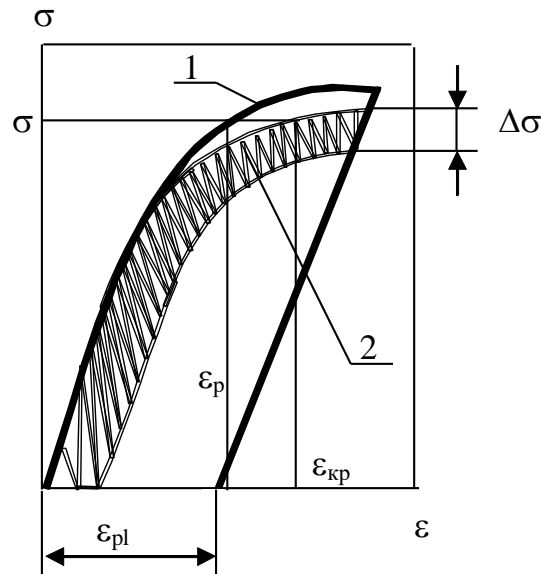


Рис. 2.3. Схеми навантажування. 1 –розтяг, 2 – комбінований розтяг (розтяг з накладанням циклічної складової).

З рисунку 2.3 можна вивести, що під час комбінованого розтягу (розтяг з накладанням циклічної складової) деформація сталі 15ХМ1Ф відбувається при менших напруженнях порівняно з одновісним розтягом.

Встановлено, що для досягнення деформації з рівнем  $\epsilon_{pl} = 1,0\%$  при температурі 623 К при комбінованому розтязі достатньо напруження 200 МПа, в той час як для досягнення такого ж рівня деформації при одновісному розтязі потрібно прикласти напруження 300 МПа. Отже, комбінований розтяг істотно знижує границю текучості вивченої сталі, а значення на діаграмах деформування також трошки менше порівняно із звичайним розтягом.

Таким чином, комбіноване навантаження за температури 623 К суттєво понижує значення напружень на діаграмах деформування сталі 15ХМ1Ф у порівнянні із деформуванням розтягом.

На рисунку 2.4 показано вплив розмаху напружень на умовну границю текучості за температур 623 і 423 К. Виявлено зменшення умовної границі текучості із зростанням розмаху напружень  $\Delta\sigma$  при комбінованому розтязі за температури попереднього пружно-пластичного деформування 623 К (1) і 423 К

(2). Важливо відзначити, що із збільшенням температури пружно-пластичного деформування границя текучості сталі 15ХМ1Ф зменшується.

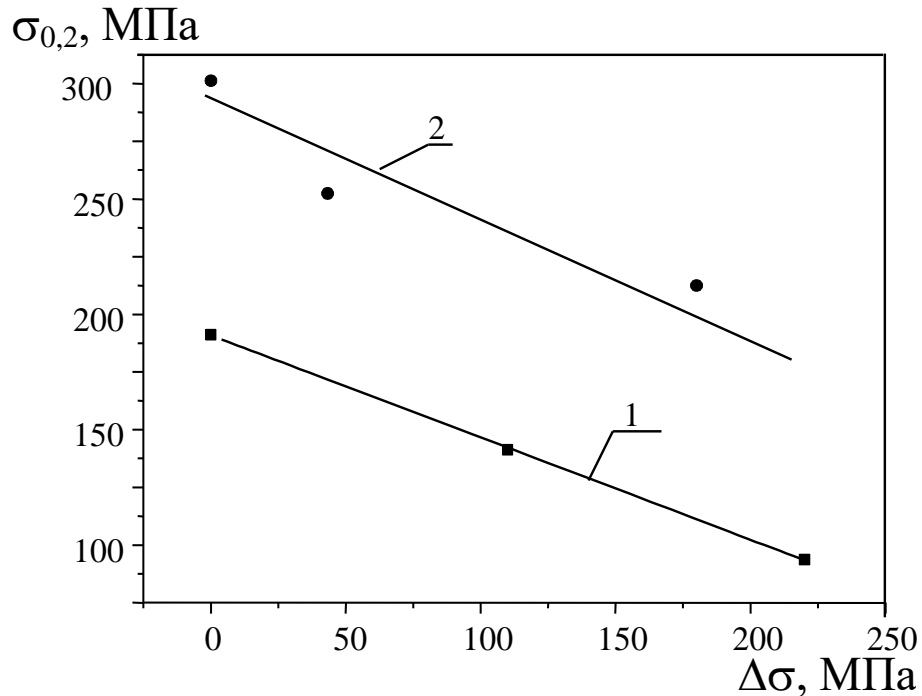
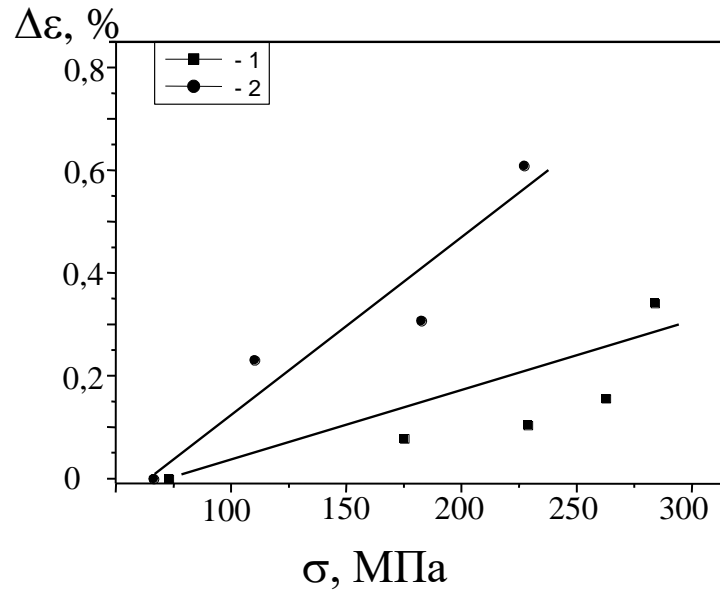


Рис. 2.4. Залежність  $\sigma_{0,2}$  сталі 15ХМ1Ф від розмаху напружень за температури попередньої деформації 623К (1) і 423К (2).

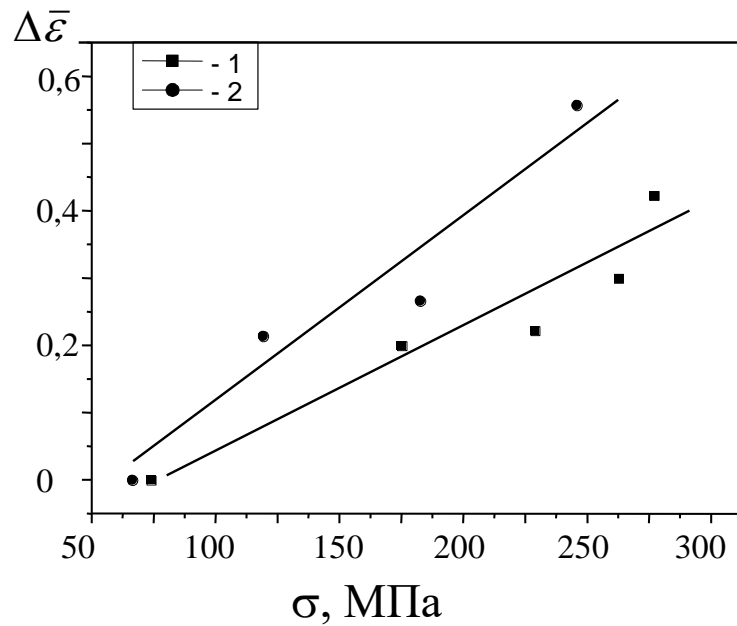
Для оцінювання за комбінованого розтягу інтенсифікації пластичної деформації було запропоновано параметр  $\Delta\bar{\epsilon} = \Delta\epsilon / \epsilon_p$ , тут  $\Delta\epsilon = \epsilon_{кр} - \epsilon_p$ ,  $\epsilon_{кр}$  і  $\epsilon_p$  – ППД відповідно за комбінованого розтягу і розтягу за однакових напруженнях (рис. 2.3).

Експериментальний аналіз даних свідчить, що комбінований розтяг істотно збільшує пластичну деформацію ( $\Delta\epsilon$ ) за однакових напружень (рис. 3.7 а). Важливо відзначити, що більше значуще зростання пластичної деформації ( $\Delta\epsilon$ ) під впливом комбінованого навантаження спостерігається при температурі 623 К порівняно з 423 К.

Збільшення напруження призводять до зростання  $\Delta\bar{\epsilon}$  як за  $T = 623$  К (2), так і за  $T = 423$  К (1) (рис. 2.5), причому за температури деформування 623 К зростає більш стрімко.



a



б

Рис. 2.5. Залежність  $\Delta\varepsilon$  (а) і  $\Delta\bar{\varepsilon}$  (б) від напруження при  $T = 423$  К,  $\varepsilon_{pl} = 1,0$  % (1) та при  $T = 623$ К,  $\varepsilon_{pl} = 3,0$  % (2).

На рис. 2.6 представлено вплив розмаху напружень при комбінованому розтязі на показник деформаційного зміцнення сталі 15ХМ1Ф.



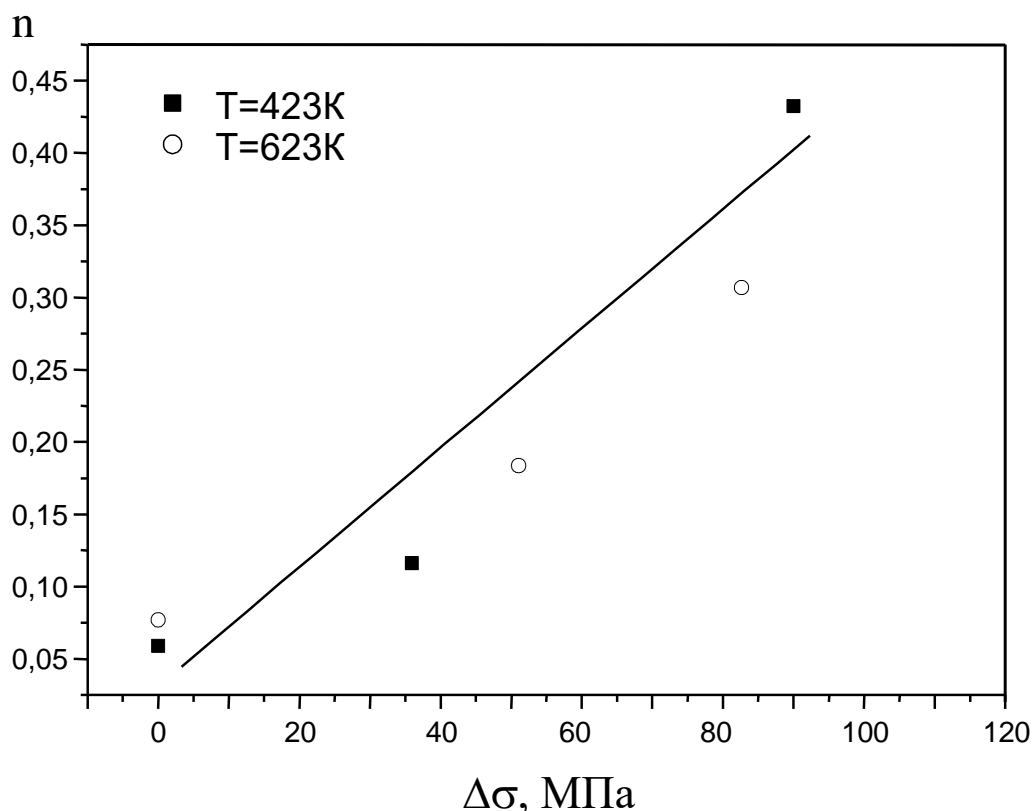
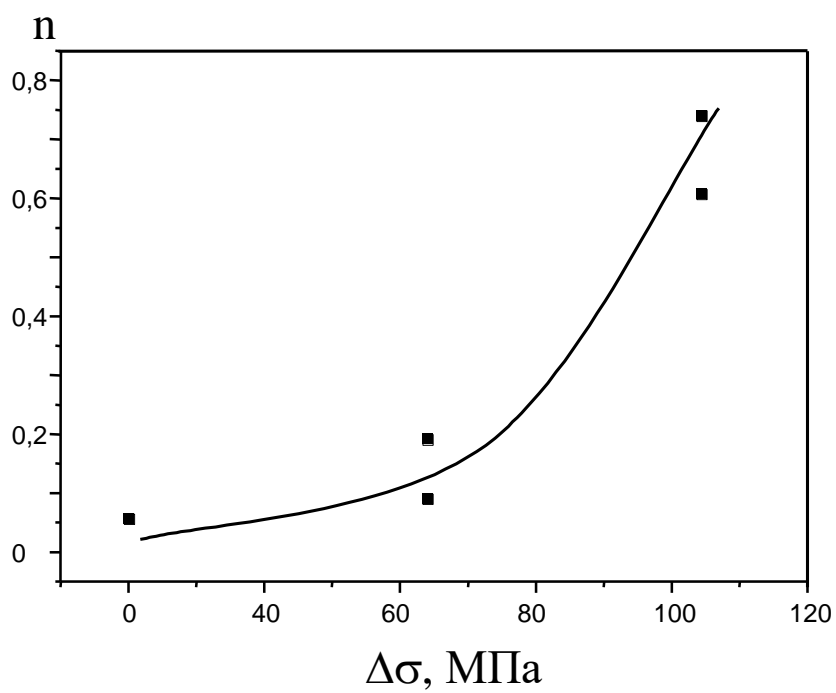


Рис. 2.6. Вплив розмаху напружень при пластичному деформуванні сталі 15ХМ1Ф до 1,0 % на показник деформаційного зміцнення.

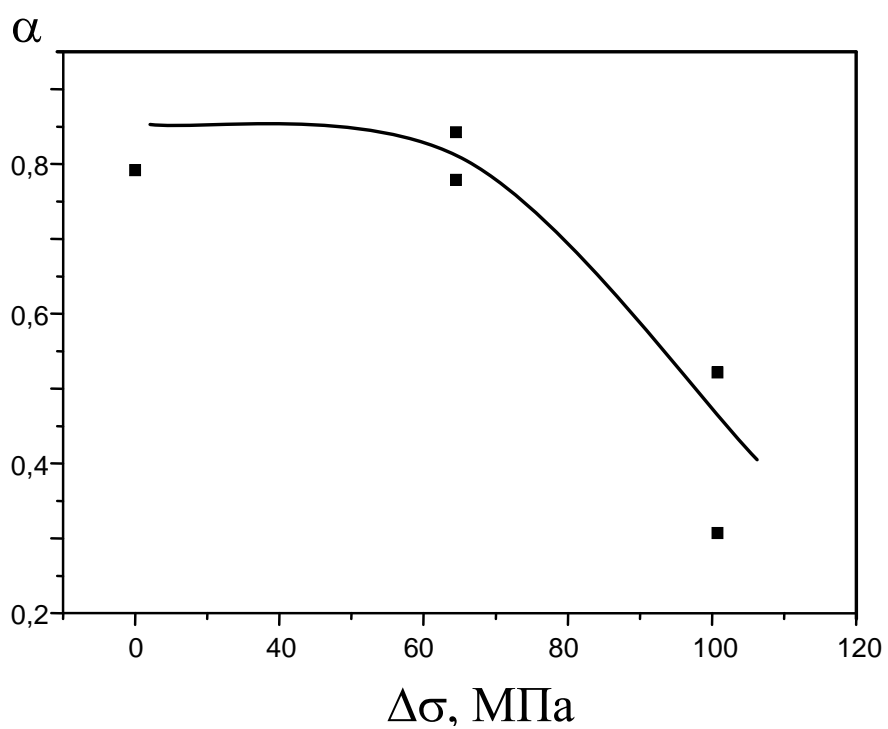
Виявлено, що збільшення розмаху напружень до 100 МПа за високих температур збільшує показник деформаційного зміцнення для обох режимів деформування.

На рис. 2.7 наведено вплив розмаху напружень на показник і коефіцієнт деформаційного зміцнення сталі 15ХМ1Ф.

На рис. 2.7а виявлено, що зі збільшенням розмаху напружень під час комбінованого розтягу сталі 15ХМ1Ф за температури 623 К показник деформаційного зміцнення збільшується. З рисунку 2.7б можна визначити, що коефіцієнт деформаційного зміцнення зменшується зі зростанням величини  $\Delta\sigma$ .



а



б

Рис. 2.7. Вплив розмаху напружень на показник – а і коефіцієнта – б деформаційного зміцнення сталі 15ХМ1Ф.

## 2.5. Вплив наводнювальних середовищ

Вплив наводнювальних середовищ на деформаційні діаграми сталі 15ХМ1Ф досліджували за допомогою гладких циліндричних зразків діаметром 5 мм і довжиною робочою зоною 20 мм.

Випробування проводили на електрогідравлічній машині СТМ-100 згідно методик [16].

На рис. 2.8 подано величини границі плинності  $\sigma_{0,2}$  сталі 15ХМ1Ф.

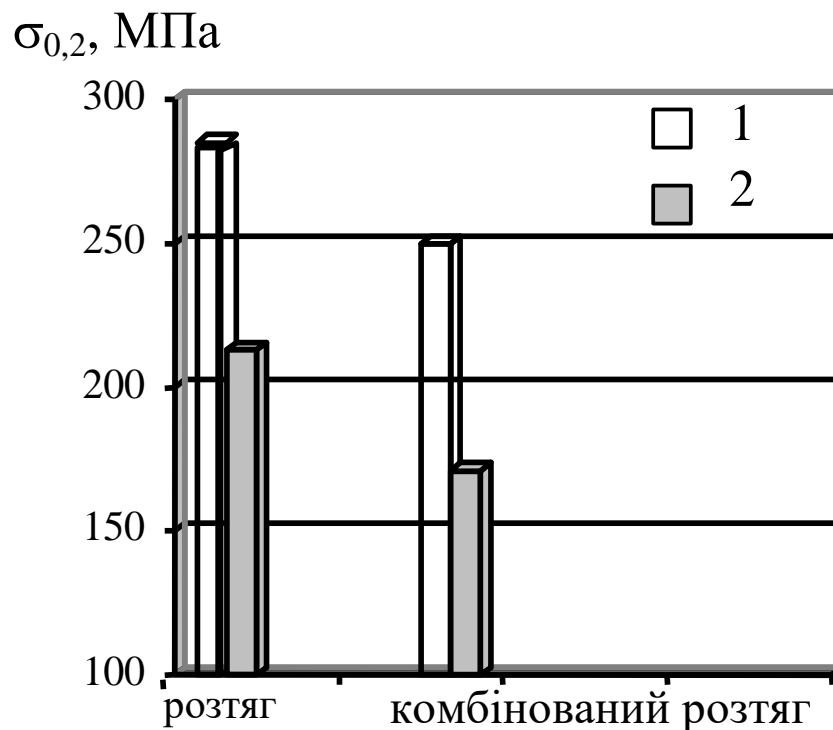


Рис. 2.8. Границі плинності ненаводненої (1) і наводненої (2) сталі 15ХМ1Ф за розтягу та комбінованого розтягу

Виявлено, що границя плинності сталі 15ХМ1Ф вища при одновісному розтязі порівняно з комбінованим розтягом як для наводненого, так і для ненаводненого матеріалу.

Вплив водню на рівні приблизно 10% призводить до зниження границі текучості в порівнянні з ненаводненим матеріалом як при одновісному розтязі, так і при комбінованому розтязі.

Важливо відзначити, що комбінований розтяг (розтяг з накладанням низькоамплітудної циклічної складової) також знижує границю текучості як для наводненого, так і для ненаводненого матеріалу в порівнянні з одновісним розтягом.

Отже поєднання водню і комбінованого навантаження зменшує границю текучості теплостійкої сталі 15ХМ1Ф.

Виявлено, що для того, щоб наводнений зразок здеформувати розтягом до  $\varepsilon_{pl} = 3,0 \%$  при температурі 623К потрібно прикласти більші напруження як для деформування аналогічного зразка при тих самих режимах за комбінованого розтягу.

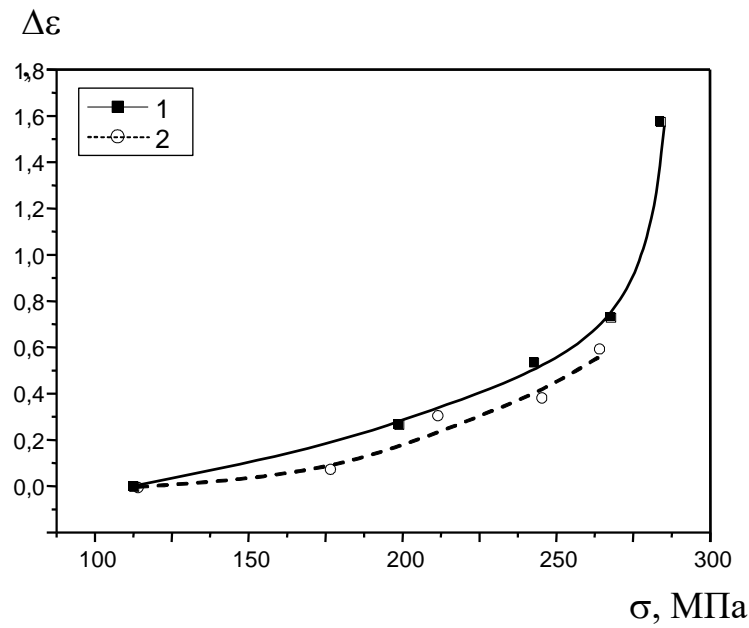
Також слід зазначити, що за однакових умов деформування значення напружень залишаються дещо нижчі для наводненого зразка за розтягу так і за комбінованого розтягу.

Отже, наявність водню під час ППД суттєво знижує рівень напружень як за розтягу так і комбіновано розтягу порівняно з ненаводненим металом.

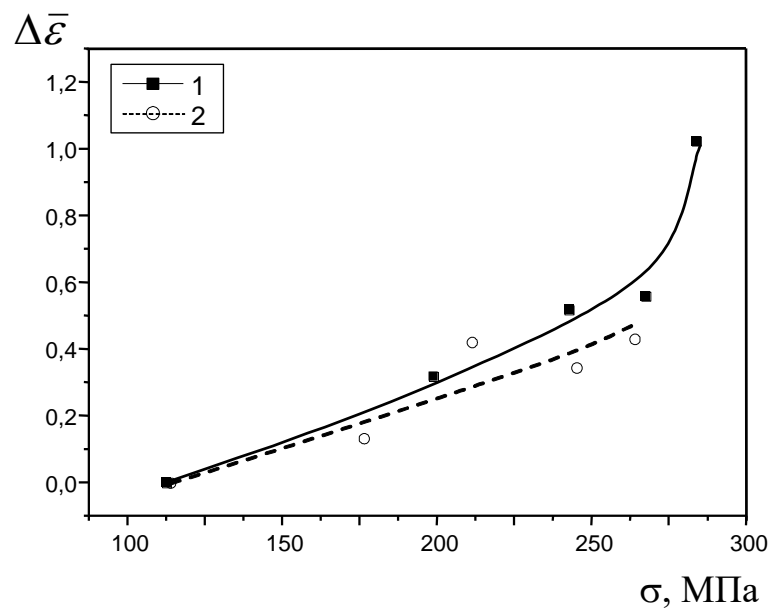
З експериментальних деформаційних діаграм сталі 15ХМ1Ф було знайдено  $\varepsilon_p$  і  $\varepsilon_{кр}$  (значення деформації за однакового значення напружень за розтягу і комбінованого розтягу відповідно) для визначення  $\Delta\varepsilon$  і  $\Delta\bar{\varepsilon}$ . Графіки залежності  $\Delta\varepsilon$  і  $\Delta\bar{\varepsilon}$  від напружень представлено на рис. 2.9.

Експериментальні дані показують, що комбіноване навантаження підвищує пластичну деформацію  $\Delta\varepsilon$  за рівних напружень (рис. 2.9 а), а водень з свого боку її зменшує.

Аналогічна ситуація спостерігається для залежності  $\Delta\bar{\varepsilon}$  від напружень. Тобто наводнювання також дещо понижуює  $\Delta\bar{\varepsilon}$ .



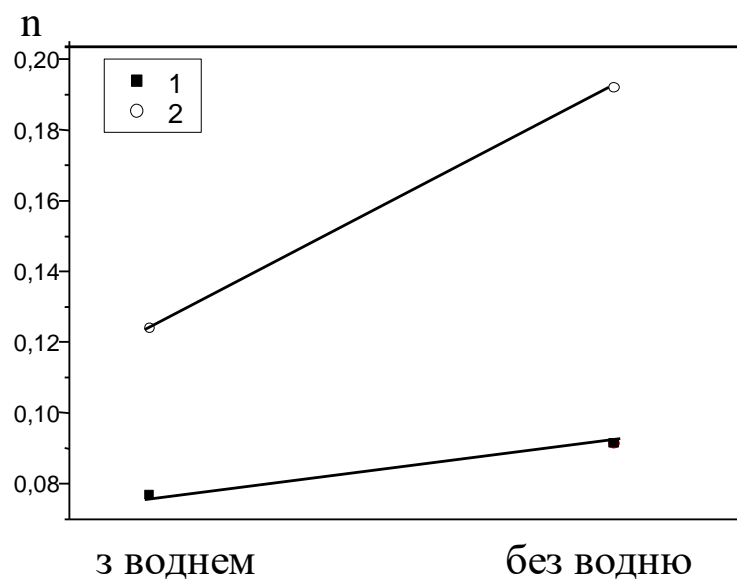
а



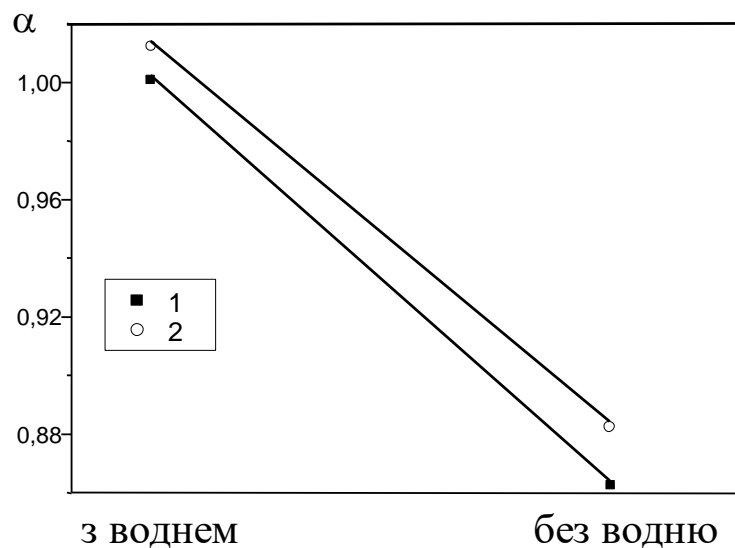
б

Рис. 2.9. Вплив напруження комбінованого ППД при  $T = 623$ ,  $\varepsilon_{pl} = 3,0\%$  ненаводненої (1) і наводненої (2) від  $\Delta\varepsilon$  (а) і  $\Delta\bar{\varepsilon}$  (б) сталі 15ХМ1Ф.

На рис. 2.10 приведено графіки впливу наводнювання на показник  $n$  і коефіцієнт  $\alpha$  деформаційного зміцнення сталі 15ХМ1Ф.



а



б

Рис. 2.10. Вплив електролітичного наводнення на показник – а і коефіцієнт деформаційного зміцнення – б при рівні пластичної деформації 3,0 % - 1 і 1,0 % - 2.

Наявність водою зменшує показник деформаційного зміцнення (рис. 2.10 а), а коефіцієнт деформаційного зміцнення істотно збільшує (рис. 2.10 б).

Присутність водою приблизно на 16 % знижує показник деформаційного зміцнення за деформування до 3,0 % і на 35 % знижує при деформуванні до 1,0

%. Тобто можна констатувати, що електролітичне наводнювання знеміцнює сталь 15ХМ1Ф.

Треба зауважити, що збільшення пластичної деформації призводить до зменшення показника і коефіцієнта деформаційного зміцнення.

Виявлено, що у наводнених зразків коефіцієнт деформаційного зміцнення значно більший у порівнянні із ненаводненими (на 15% і на 12 % за деформування до 1,0 % і 3,0 % відповідно).

### 3 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

#### 3.1 Обґрунтування способу зварювання.

При монтажі магістральних трубопроводів застосовуються різні методи зварювання залежно від умов і вимог. Основними методами зварювання при монтажі трубопроводів на АЕС у відповідності до СОУ НАЕК 159:2020 є: ручне дугове зварювання покритими електродами (РДЗ), аргано-дугове зварювання (АД) та автоматичне зварювання під флюсом (АФ).

**РДЗ.** Одним із найпоширеніших методів в даний час залишається дугове зварювання із застосуванням металевими електродами з покриттям. Простота і мобільність застосовуваного обладнання в дуговому зварюванні металевими електродами з покриттям пояснюються кількома відомими ключовими аспектами. Істотний недолік РДЗ покритим електродом – низька продуктивність праці та залежність від практичних навичок зварювальника якості зварного шва.

До електроду та зварювального виробу, для утворення та горіння зварювальної дуги підводиться постійний і змінний зварювальний струм від джерела зварювального струму. Дуга 1 розплавляє металевий стрижень електрода 2, його покриття та основний метал 3 [17]. Металевий стрижень електрода, що розплавляється, у вигляді окремих крапель 4, покритих шлаком, переходить у зварювальну ванну 5. У зварювальній ванні розплавлений метал електрода і основного металу змішується, а розплавлений шлак спливає на поверхню, утворюючи шлакову кірку 6 як показано рис. 3.1.

Розміри зварювальної ванни залежать від режиму зварювання і зазвичай знаходяться в межах: глибина до 7 мм, ширина 8-15 мм, довжина 10-30 мм. Частка участі основного металу у формуванні металу шва зазвичай становить (15 – 35%).

Переваги ручного дугового зварювання:

- можливість зварювання просторових швів;
- можливість зварювання в місцях з обмеженим доступом;
- порівняно швидкий перехід від одного матеріалу, що зварюється до



іншого;

- можливість зварювання найрізноманітніших сталей завдяки широкому вибору марок електродів, що випускаються;
- простота та транспортабельність зварювального обладнання.

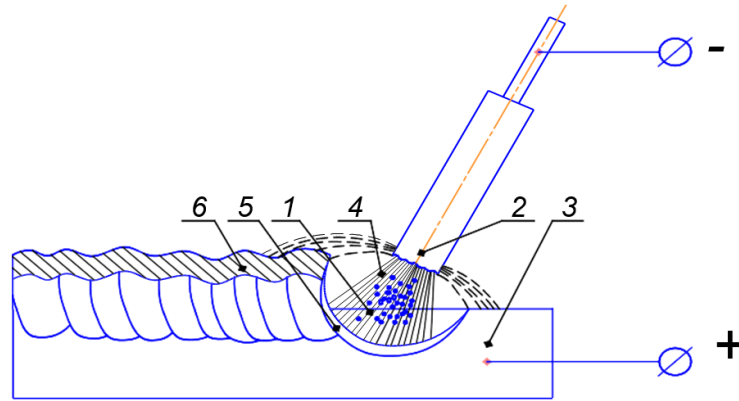


Рис. 3.1 – Схема процесу РДЗ

Недоліки ручного дугового зварювання:

- низькі ККД та продуктивність порівняно з іншими технологіями зварювання;
- якість з'єднань багато в чому залежить від кваліфікації зварювальника; шкідливі умови процесу зварювання.

**АФ.** Оптимальною особливістю даного способу зварювання є те, що під шаром флюсу горить зварювальна дуга не на відкритому повітрі, як подано на рис. 3.2.

Під дією теплоти дуги 1 розплавляються основний метал 2, дріт електрод 3 і частина флюсу 5, яка знаходиться в зоні зварювання. Електродний дріт поступає в зону зварювання зі швидкістю його плавлення і подається у зварювальну ванну 4 у вигляді крапель 6. Розплавлений флюс утворює щільну еластичну оболонку – газовий міхур 7, створений шаром рідкого флюсу 8. Усередині газового міхура створюється надлишковий тиск, який утримує рідкий флюс і відтісняє частину розплавленого металу в протилежному відношенні напрямку зварювання. Після кристалізації зварювальної ванни утворюється зварний шов 9, покритий шлаковою кіркою 10. [17]

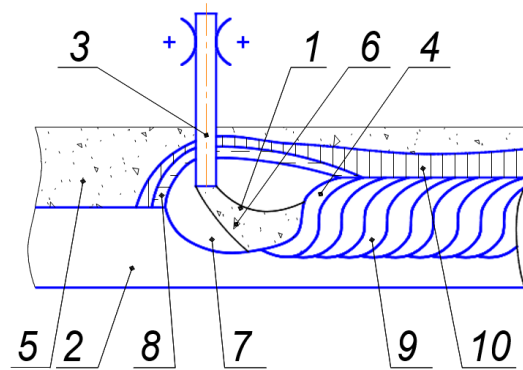


Рис. 3.2 – Схема процесу АФ

При зварюванні під шаром флюю висока продуктивність досягається за рахунок використання великих струмів та густини струму в електроді. Завдяки щільному шару флюю, навколишньому зону зварювання, високі значення зварювального струму і щільності струму, втрати електродного металу на розбризкування і чад не складають, а так само не погіршують умови формування шва, крім того запобігає видуванню рідкого металу зі зварювальної ванни. Це дозволяє проводити зварювання металу без оброблення кромки на високих швидкостях. Основне призначення флюю – захист зварювальної ванни від шкідливого впливу кисню та азоту атмосфери.

Зварювання під шаром флюю можна виконувати як на змінному, так і на постійному струмі. При зварюванні постійному струмі на процес зазвичай ведуть зворотній полярності. Істотним недоліком зварювання під шаром флюю є можливість її виконання лише нижньому положенні, що пов'язане із зсипанням флюю та стіканням рідкого металу ванни.

Автоматичне зварювання під шаром флюю здобуло широке визнання завдяки своїм перевагам та визначеним недолікам. Основні характеристики методу подані нижче:

- автоматичне зварювання під шаром флюю відзначається високою продуктивністю, що сприяє ефективному використанню часу;
- втрати електродного металу в процесі автоматичного зварювання зазвичай не перевищують 2%, що вказує на економію матеріалу;
- процес автоматичного зварювання під шаром флюю дозволяє уникнути

утворення бризок, що полегшує контроль над процесом та зменшує ризик дефектів;

- метод забезпечує ефективний захист зони зварювання завдяки використанню флюсу;
- автоматичне зварювання під шаром флюсу демонструє мінімальну чутливість до утворення оксидів, забезпечуючи якісний зварений шов;
- висока стабільність процесу горіння дуги призводить до формування дрібно-широкаватої поверхні металу шва;
- оскільки дуга горить під шаром флюсу, не потрібно спеціальних захисних пристроїв від світлового випромінювання;
- процес зменшує витрати на підготовку кадрів перед зварюванням;
- автоматичне зварювання відзначається відсутністю впливу суб'єктивного фактора, що робить його стабільним і передбачуваним.

Недоліки способу:

- – виробництво, зберігання та підготовка зварювальних флюсів можуть вимагати значних трудовитрат;
- ускладнення коригування положення дуги щодо кромки виробу може впливати на точність зварювання;
- процес може впливати на оператора, особливо в умовах тривалої роботи;
- неможливість виконання зварювання у всіх просторових положеннях без спеціального обладнання.

Області застосування:

- зварювання в цехових та монтажних умовах
- зварювання металів від 1,5 до 150 мм і більше;
- зварювання всіх металів та сплавів, різномірних металів.
- шляхи підвищення продуктивності:
  - зварювання (наплавлення) незалежною дугою, що горить між двома електродами (до виробу струм не підводять); при великій відстані від дуги до поверхні виробу основний метал взагалі не проплавляється.
  - зварювання трифазною дугою, при якій глибина проплавлення

залежить від співвідношення струмів у дугах, що горять між електродами та виробом.

- зварювання різнорідними дугами. Живлення дуги між електродами та виробом здійснюється при цьому постійним струмом, а дуги між електродами - змінним струмом.

- однофазна двохелектродне зварювання, засноване на живленні електродів та виробу від кінців та середини вторинної обмотки зварювального трансформатора.

- наплавлення з подачею присадного дроту в дугу (до дроту струм не підводять).

- зварювання (наплавлення) по підкладці з металу необхідного хімічного складу та виконує функції теплопоглинання зварювальної дуги та підвищення коефіцієнта наплавлення.

- зварювання комбінованою дугою (залежною та незалежною, що горить між основним та додатковим електродами).

- зварювання розщепленим електродом.

- зварювання (наплавлення) стрічковим електродом.

- зварювання багатодугове: у загальну ванну; у розділені ванни.

Аргоно-дугове зварювання стало найпопулярнішим методом при зварюванні трубопроводів. Цей метод дозволяє виконувати монтаж труб без необхідності використання підкладних кілець чи спеціальних виступів. Завдяки аргоно-дуговому зварюванню вдалося досягти проплавлення зварних з'єднань на повну їх товщину, що значно покращило якість швів, зокрема забезпечило вищу стійкість до корозії, спричиненої лужними речовинами. [18]

Враховуючи особливі вимоги до обладнання АЕС та методів їх виготовлення і способів з'єднання, найбільш широкого застосування отримав спосіб ручного АД зварювання (рис. 3.3). Його застосовують при монтажі та ремонті трубопроводів I та II контуру охолодження реакторів діаметром до 150 мм. При цьому товщина стінки становить 2..10 мм. Цей метод реалізують на

постійному струмі короткою дугою із застосуванням неплавкого лантаново-вольфрамового електрода та аргону вищого сорту.

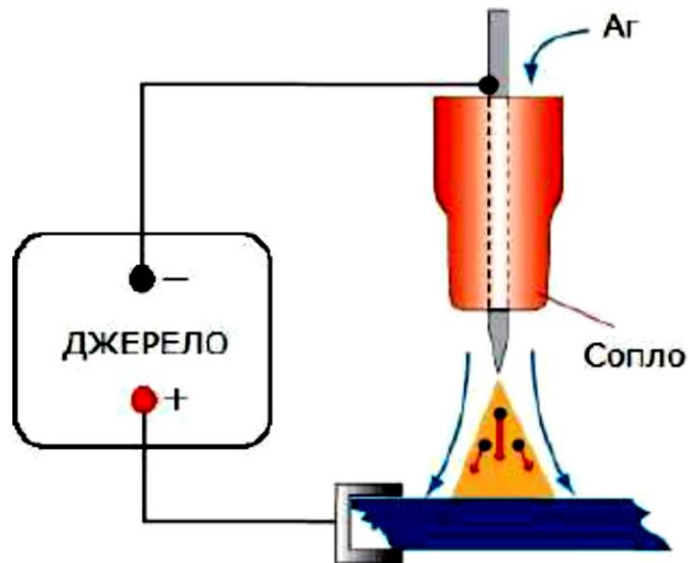


Рис. 3.3 Схема ручного АД

При формуванні стикового з'єднання зазвичай виконують два прихоплення, кожне довжиною від 10 до 15 мм, розташовані симетрично навколо країв зварюваних деталей. У випадку стикових з'єднань труб із товщиною стінок у межах 2...10 мм, зварний шов формується, як правило, у 2...4 шари, з висотою кожного шару від 2,0 до 2,5 мм. Довжина кожної звареної ділянки не має перевищувати 200 мм; у випадку більшої довжини шва він повинен виконуватися за допомогою зворотно-ступінчастої техніки [19].

При монтажі трубопроводів часто використовується напівавтоматичний метод зварювання для створення нерозбірних кільцевих стикових з'єднань труб зі стінками товщиною від 6 до 32 мм, за допомогою комбінованої технології зварювання. Ця техніка передбачає зварювання корінного шару шва за допомогою дроту суцільного перерізу у середовищі вуглекислого газу, тоді як заповнення та облицювання швів здійснюється з використанням самозахисного порошкового дроту. При цьому методі стики збирають без прихваток, використовуючи центратори, але якщо прихватки все ж застосовуються, їх необхідно видалити механічно в процесі зварювання. Зварювання проводять на постійному струмі зворотної полярності, рухаючись у напрямку «на спуск».

Запалювання дуги повинно відбуватися виключно на крайках зварюваних деталей. Для уникнення утворення пористості рекомендується здійснювати обривання дуги на одній з крайок зварюваних елементів. Ремонт видимих дефектів у шві виконується за допомогою ручного дугового зварювання з використанням електродів з основним типом покриття [18]. При створенні заповнюючих і облицювальних шарів зварного шва в нерозбірних кільцевих стикових з'єднаннях труб використовується напівавтоматичне зварювання з самозахисним порошковим дротом.

У процесі зварювання трубних стиків застосовують методику напівавтоматичного чи автоматичного аргано-дугового зварювання вольфрамовим електродом з автоматичною подачею присаджувального дроту, як показано на рис. 3.4. Кореневий шар шва зварюють без присаджувального дроту, тоді як для зварювання інших шарів шва використовують присадковий дріт.



Рис. 3.4 Процес автоматичного аргано-дугового зварювання

Подавання присаджувального дроту у зону дуги виконується під кутом щонайменше 30 градусів відносно електрода прямо в область зварювальної дуги. Це дозволяє пришвидшити подачу зварювального дроту у 1,5-2 рази порівняно з ручним дуговим зварюванням, забезпечуючи високу якість наплавлення металу. У процесі зварювання з вольфрамовим електродом як присадний

матеріал використовуються зварювальний дріт або прутки, хімічний склад яких відповідає основному металу.

Для кращого захисту металу від взаємодії з повітрям зварювання проводять на мінімальних режимах, а процес має здійснюватися без перерв. У випадку неминучої зупинки, рекомендується перекривати попередньо виконаний шов на 10-20 мм. Завершення подачі захисного газу має відбуватися через 5-15 секунд після завершення зварювання, щоб запобігти окисленню зварюваних поверхонь. Витрати захисного газу визначаються в залежності від розміщення шва, наявності повітряних потоків, складу захисного газу та інших чинників, і зазвичай становлять 6-10 дм<sup>3</sup>/хв. [20].

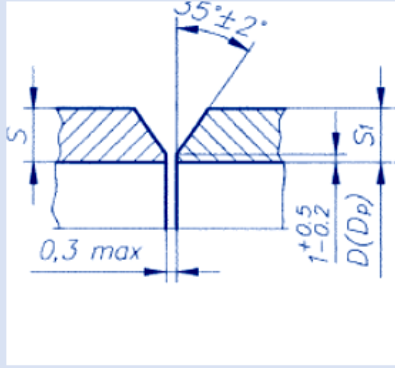
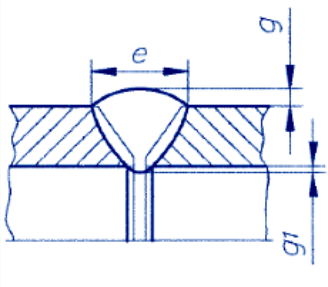
Застосування технології зварювання з застосуванням вольфрамового електрода дозволяє формувати шви з високоякісним зворотним валиком за будь-якого просторового положення. Це стає ключовим при зварюванні трубопроводів, особливо коли доступ до внутрішньої поверхні обмежений.

Процедура зварювання виконується наступним чином: подача аргону розпочинається за 15-20 секунд до запалювання дуги та припиняється через 10-15 секунд після її згасання, при цьому струмінь газу спрямовується на кратер. Під час зварювання зварювальний пальник слід переміщати з права наліво, а присаджувальний дріт подавати у напрямку, зустрічному руху пальника. Амплітуда коливань електрода при зварюванні кореневого шару становить 2-4 мм, а за зварювання наступних шарів - 6-8 мм. Кінець присаджувального дроту повинен постійно знаходитися в зоні захищеної аргоном.

Беручи до уваги аналіз та специфічні характеристики перлітних сталей та способів відповідно до СОУ НАЕК 159:2020, а також вимоги до монтажу трубопроводів, застосовуємо спосіб автоматичного АД.

Конструктивні розміри та типи швів для зварювання трубопроводів II контуру АЕС автоматичним аргоно-дуговим зварювання приведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Тип і конструктивні розміри зварного шва [3]

Умовне позначення зварного з'єднання	Конструкційні елементи		S, мм	e, мм		g, мм		g1, мм	
	розроблення кромки до зварювання	Зварного шва		номінальне	граничне відхилення	номінальне	граничне відхилення	номінальне	граничне відхилення
1-24-2			12	24	±5	2,5	+2,0 -1,5	1,0	±1,0



Враховуючи конструкційні властивості зварного з'єднання, ми визначасмо параметри режиму зварювання для автоматичного аргоно-дугового методу. Виходячи з того, що товщина стикових з'єднань труб становить 12 мм, зварювання буде виконуватися у кілька шарів для забезпечення ефективного проварювання кореня шва та якісного накладання наступних шарів.

При аргоно-дуговому зварюванні з використанням неплавкого вольфрамового електрода ключовим є вибір діаметра електрода, а діаметр електрода залежить в свою чергу від товщини зварюваних крайок. Оскільки зварювання буде виконуватися у кілька проходів, для автоматичного аргоно-дугового зварювання обираємо вольфрамовий електрод діаметром 3 мм та присаджувальний дріт діаметром 2 мм.

Присаджувальний дріт для автоматичного зварювання застосовується таких же розмірів, як і для ручного аргоно-дугового. Витрата газу підбирається і коригується аналогічно. З огляду на незмінність відстані між соплом і поверхнею виробу при автоматичному зварюванні, витрати газу зазвичай зменшують на 20–30% порівняно з напівавтоматичним зварюванням такого ж типу з'єднання. Автоматичне аргоно-дугове зварювання неплавким електродом із застосуванням присаджувального дроту при виконанні неповоротних стикових зварних з'єднань типів 1-24-2 на трубах діаметром 273 мм з товщиною стінки 12 мм наведені в табл. 3.2 згідно СОУ НАЕК 159:2020 .

Таблиця 3.2. Режими автоматичного аргоно-дугового зварювання [22]

Марка сталі	Зовнішній діаметр х товщина стінки труб, мм	Технологічні режими зварювання					
		Номер шару	Ізв, А	V, м/год		Амплітуда коливань електрода, мм	Частота коливань, хв-1
				зварювання	Подачі дроту		
15X1M1Ф	273x12	1	140.150	2.2,5	—	—	—
		2	190.210	3.3,5	28.30	3.4	35.40
		3...4	300.330	3,5.4	45.60	3.6	40.50
		5	180.21	3.3,5	15.40	B.2	35.40

Відповідно до СОУ НАЕК 159:2020 при аргоно-дуговому зварюванні в якості електродів, що не плавляться, застосовують неплавкі електроди з вольфраму марок ЭВЛ, ЭВИ-1, ЭВИ-2, ЭВИ-3, ЭВТ-15, з латаного вольфраму марки ПЛ або ітрірованого вольфраму марки СВІ-. Допускається використання зарубіжних аналогів сертифікованих марок WT-20, WS 2 і E3.

При роботі на постійному струмі використовують лантанові вольфрамові електроди марки ВЛ10У, які забезпечують ефективне запалювання дуги та високу щільність струму за умови мінімальної витрати електрода. Популярні на сьогоднішній день вольфрамові електроди марки WC-20 із шліфованою поверхнею, до складу яких входить двоокис церію  $\text{CeO}_2$  (1,88%), відповідають міжнародному стандарту ISO 6848-1984 (рис. 3.5) [3].

Отже, для зварювання стиків трубопроводу застосовуємо вольфрамові електроди типу WC-20. Щоб уникнути блокування дуги під час зварювання та забезпечити ефективніший нагрів, кінці електродів надають загострену форму. Довжина заточування має становити приблизно  $5d_{\text{елек}}$ .

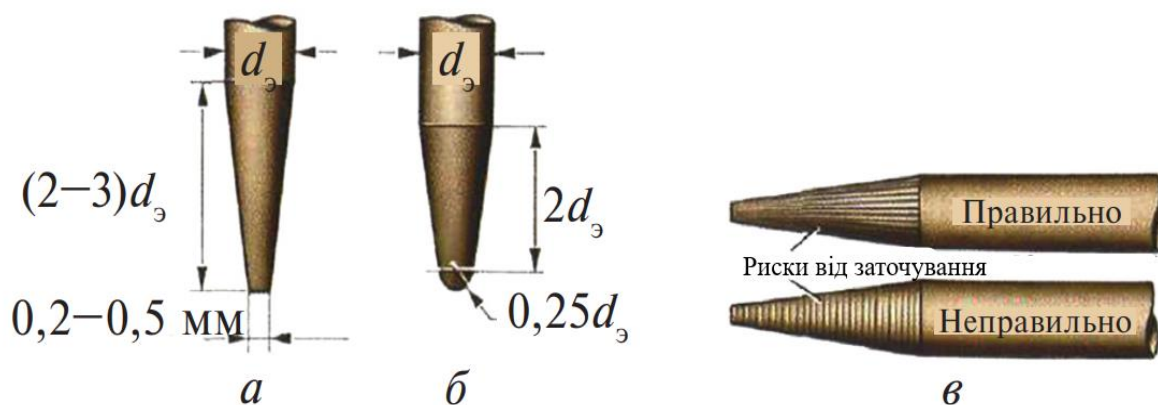


Рис. 3.5. Види заточування та розміри вольфрамового електрода

При виборі марки присаджувального дроту основні фактори, що впливають на рішення, включають тип основного металу, метод зварювання, а також умови експлуатації конструкції. Для зварювання високолегованих сталей існує кілька

поширених марок присаджувального та зварного дроту, які детально описані у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 Хімісклад марок дроту [22]

Марка дроту	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Mo	V	N
Св-08ХГСМА	0.06 - 0.1	0.45 - 0.7	1.15 - 1.45	до 0.3	до 0.025	до 0.025	0.85 - 1.15	0.4 - 0.6	-	до 0.015
Св-08ХГСМФА	0.06 - 0.1	0.45 - 0.7	1.2 - 1.5	до 0.3	до 0.025	до 0.025	0.95 - 1.25	0.5 - 0.7	0.2 - 0.35	до 0.015
Св-08ХМФА	0.06 - 0.1	0.12 - 0.3	0.35 - 0.6	до 0.3	до 0.025	до 0.025	0.9 - 1.2	0.5 - 0.7	0.15 - 0.3	до 0.012

Під час аргоно-дугового зварювання як захисне середовище використовуються інертні гази, зокрема аргон та гелій. Гелій застосовується менш часто через високу вартість. Завдяки своїм властивостям аргон є найпоширенішим газом для захисту зварювальної ванни. Він ефективніший, ніж гелій, через вищу щільність та забезпечення більш стабільної дуги. Аргон, що використовується у зварюванні, буває різної чистоти і поділяється на дві категорії за рівнем чистоти: вищий сорт та перший сорт. (табл. 3.4).

Таблиця 3.4 Хімічний склад аргону [22]

Показники	Сорт (ГОСТ 10157–79)	
	Виши	Перший
<b>Вміст аргону в %, не менше</b>	99,992	99,987
<b>Вміст кисню в %, не більше</b>	0,0007	0,002
<b>Вміст азоту в %, не більше</b>	0,006	0,01

Беручи до уваги тип основного металу, що зварюється, обрано присадний дріт Св-08ХМФА, який використовується для зварювання сталей, стійких до високих температур. Зварювальну ванни захищають аргон першого сорту.

Для зварювання кореневої частини шва повинні застосовуватися автомати, що забезпечують наступні операції:

- попереднє продування газових магістралей захисним газом;
- збудження дуги безконтактним способом або шляхом контакту електрода з виробом при зварювальному струмі не більше 20 А;
- регульований за часом прогрів ділянки початку зварювання;
- рівномірне або крокове переміщення зварювального пальника з дугою навколо стику, потрібно також подача дроту присадки;
- заварювання кратера шва шляхом плавного зниження зварювального струму до величини, що не перевищує 20 А;
- обдув кратера захисним газом після гасіння дуги.

Трубозварювальний автомат повинен бути забезпечений джерелом живлення зварювальним струмом, апаратурою керування з автоматичним циклом або дистанційним керуванням за допомогою виносного пульта.

Зварювальний пост автоматичного зварювання має бути оснащений балоном з аргоном та редуктором-витратоміром АР-10 або АР-40 (рис. 3.6).

Замість редуктора-витратоміра допускається використовувати комплект, що складається з кисневого редуктора БКО-50-4 та ротаметру типу РМ з необхідним діапазоном вимірювання витрати газу.

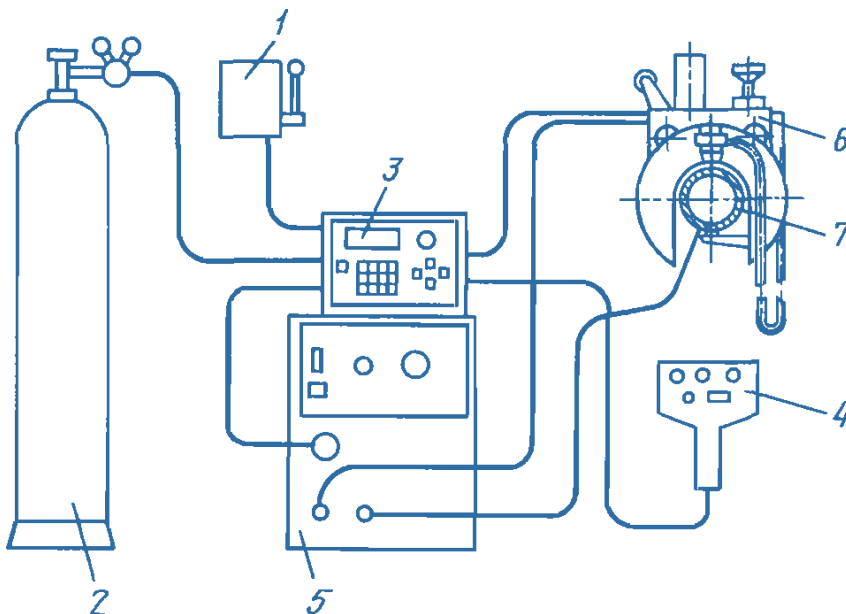


Рис. 3.6 Пост автоматичного аргоно-дугового зварювання [20]

Автоматичне АД зварювання знаходить широке застосування в авіа- та суднобудуванні, енергомашинобудуванні, хімічній та харчовій промисловості, ракетобудуванні, атомній енергетиці та промисловості та деяких інших галузях.

Автомати розробляють і випускають без прив'язки до конкретних виробів або умов застосування – автомати загального призначення, так і спеціалізовані – для випадків, коли неможливо виконувати зварювання автоматами загального призначення. Характерними прикладами автоматів загального призначення є більшість зварювальних тракторів, верстатів для зварювання прямолінійних та кільцевих швів, консольні установки, безліч автоматів з підвісними та переносними головками. Типовими спеціалізованими автоматами є багато автоматів, що випускаються для зварювання при монтажі та ремонті конкретних сполук атомних реакторів. Тільки для монтажу трубопроводів реакторів типу РБМК є 13 спеціалізованих автоматів, кожен із яких призначений для зварювання одного-двох типів конкретних з'єднань. Для зварювання при ремонті реакторів розробляють і випускають автомати, що дистанційно керуються, іноді для ремонту одного конкретного зварного з'єднання.

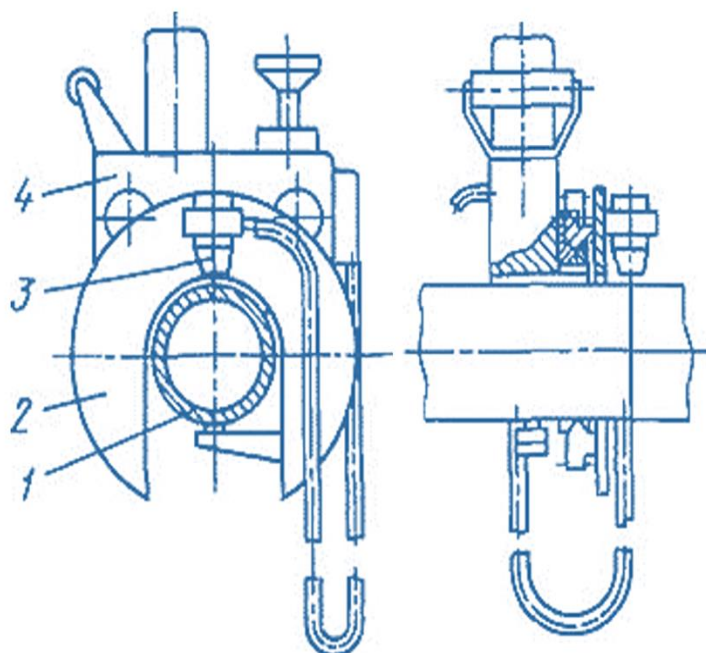
Сьогодні на світовому та вітчизняному ринках зварювального обладнання пропонується широкий вибір автоматів для орбітального зварювання практично на весь діапазон діаметрів трубних з'єднань, які відрізняються конструктивними схемами та реалізованими варіантами техпроцесу зварювання.

Орбітальні трубозварювальні автомати – одні з наукомістких і складних багатофункціональних зразків зварювального обладнання. У цьому за єдиної технологічної структури істотно відрізняються ступенем складності.

Конструкція головок для зварювання без присадного дроту може бути найпростішою: мати тільки пристрій фіксації на трубі, С-подібну або роз'ємну планшайбу, що обертається навколо труби, з жорстко закріпленим на ній пальником і шланговим підведенням струму і газу (рис. 3.7).

С-подібний виріз у корпусі та планшайбі призначений для установки головки на зварювані труби збоку, для чого виріз планшайби поєднується з вирізом у корпусі. С-подібна планшайба має зубчастий вінець і обертається за допомогою

двох провідних шестерень, що синхронно обертаються, розміщених в корпусі приводу, що містить двигун, редуктор і роздвоювач для синхронізації обертання шестерень. Головки С-подібного типу іноді називають скобами або кліщами.



- 1 – труба;
- 2 – планшайба;
- 3 - пальник;
- 4 – корпус;

Рис. 3.7 – С-подібна відкрита головка

Атомна промисловість характеризується значною кількістю трубопровідних з'єднань, які зазвичай зварюються безпосередньо під час монтажних робіт. У зв'язку з цим, зварювальне обладнання, яке застосовується в цій галузі, повинне відповідати високим стандартам довговічності, надійності та продуктивності. Саме такими характеристиками володіють орбітальні зварювальні автомати, що широко застосовуються у різних сферах промисловості.

Враховуючи діаметре труб, які необхідно зварювати та їх товщину стінки вибираємо автомат для орбітального зварювання з С-подібною зварювальною головою типу КНГК 210 – 300 (рис. 3.8). Його технічні характеристики представлено в табл. 3.5. [23]



Рис. 3.8 – Орбітальна установка KHGK 210–300 [23]

Таблиця 3.5 Характеристика орбітальної установки [23]

Модель	KHGK 210 - 300
Швидкість зварювання, об/хв	0,1 - 0,4
Зовнішній діаметр труб, мм	210 - 300
Діаметр вольфрамового електрода, мм	2,4
Амплітуда коливань, мм	±8
Швидкість коливань, мм/с	0,1 - 6,0
Час перебування, с	0,1 - 2,0
Механізм подачі дроту	вбудований
Діаметр дроту, мм	0,8 / 1,0
Швидкість подачі дроту, мм/хв.	0 - 2000
Зварювальний струм, А	4 - 400

Дана установка укомплектується інверторним джерелом живлення «Panasonic» постійного струму, забезпечує стабільне горіння дуги та відповідно високу ефективність процесу зварювання (рис. 3.9). Його технічні дані приведено в табл. 3.6.



Рис. 3.9 - Інверторне джерело живлення «Panasonic» [23]

Таблиця 3.6 Технічні дані джерела живлення «Panasonic» [23]

Параметр	Значення
Номінальна вхідна напруга, В	380
Діапазон вхідної напруги, %	± 10
Номінальна вхідна потужність, кВА	14
Частота джерела живлення, Гц	50 / 60
Номінальний коефіцієнт тривалості навантаження при 400 А, %	60
Номінальний коефіцієнт тривалості навантаження при 310 А, %	100
Номінальна зварювальна напруга, В	10,2 - 26
Номінальна напруга холостого ходу,	73
Діапазон зварювального струму, А	4 - 400
Час наростання струму, с	0,1 - 20,0
Час попереднього підігріву, с	0,1 - 20,0
Час згасання дуги, з	0,1 - 20,0
Запас оперативних програм	100
Ділі одиниці кожного зварного шва, од.	1 - 12
Водяний тиск охолодження, кгс /мм <sup>2</sup>	1,2



### 3.2 Опис технологічного процесу

Процес монтажу трубопроводів II контуру АЕС складається із ряду послідовності виконання певних операцій:

**Контрольна.** Проводять контроль відповідності поставлених безшовних труб діючим стандартам, а також перевіряють товщину стінки на можливі допустимі відхилення.

**Очищення.** На даній операції здійснюють очищення торців труб. Вона реалізується за допомогою кутошліфувальної легкої машинки Makita GA9020 (рис. 3.10). Очищення проводять із застосуванням абразивних та дротяних дисків, ганчір'я, уайт-спіриту та щітки по металу. Дану операцію здійснюють із двох сторін труби (ззовні та всередині) на відстані 20-40 мм.



Рис. 3.10 – Легка кутошліфувальна машинка Makita GA9020

**Різання.** Для отримання необхідної мірної довжини труби, яка необхідна при монтажі трубопроводу, здійснюють операцію різання на місці монтажу із застосуванням роз'ємного труборізу TP(ISD)-300 (рис. 3.11). Технічні дані труборіза приведено в табл. 3.7. Застосування такого типу труборізів виключає операцію оброблення кромки, яку необхідно проводити після термічних способів.

Таблиця 3.7 – Технічні дані труборіза TP(ISD)-300 [24]

Для труб, мм	Товщина стінки, мм	Швидкість обертання, об/ хв	Напруження харчування, В	Потужність, Вт	Вага, кг
150-300	2-25	13	220	1000	60

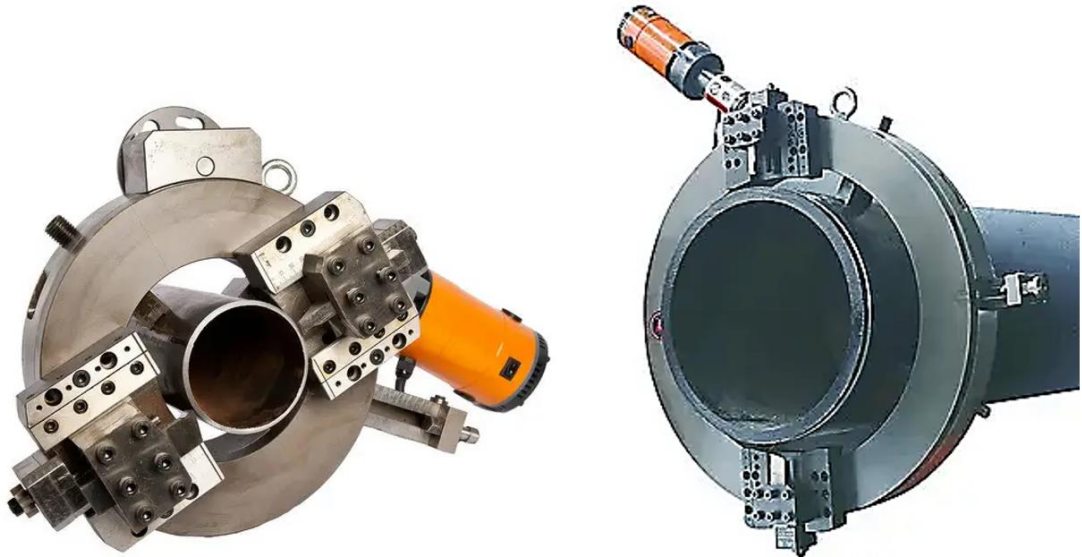


Рис. 3.11 – Загальний вигляд роз'ємного труборізу TP(ISC)-300 [24]

Розроблення кромки. Ця операція реалізується за допомогою портативної ручної машини ВМ-21 (рис. 3.12). Дана машина призначена для розроблення кромки листового металу та труб діаметром 150-300 мм із шириною фаски до 21 мм із кутом  $0^{\circ}$ .. $60^{\circ}$ . Розроблення ромок для типу з'єднання 1-24-2 здійснюють у відповідності до вимог СОУ НАЕК 159:2020. Кут розкриття згідно даного стандарту повинен становити  $35^{\circ}$ .



Рис. 3.12 - Портативна ручна машина ВМ-21 [25]

Складально-зварювальні. Складання стиків труб здійснюють у відповідності до СТО НОСТРОЙ 233. У відповідності до вимог даного стандарту складання стиків здійснюють із застосуванням спеціальних пристосувань – центраторів. В нашому випадку із врахуванням діаметру трубопроводу застосовуємо переносний зовнішній центратор (рис. 3.13). Складання проводимо без застосування прихваток, оскільки зварювання проводимо в центраторі.

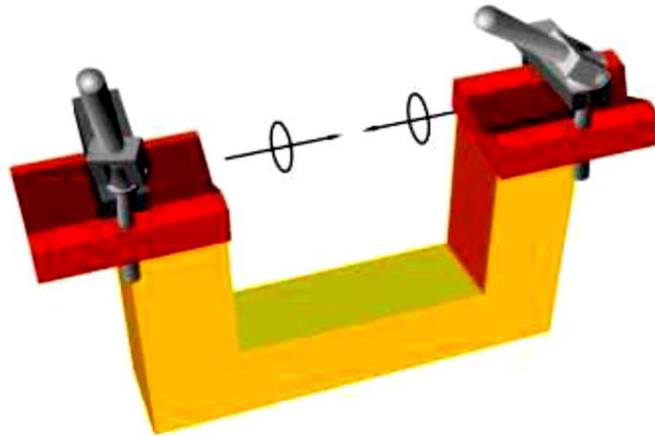


Рис3.13 – Переносний зовнішній центратор

Після встановлення та фіксування стиків труб здійснюють зварювання із застосуванням орбітальної установки КНГК 210–300 (рис. 3.14).



Рис. 3.14 - Процес автоматичного орбітального зварювання

Враховуючи специфіку зварювання даної сталі та вимог до зварних з'єднань, перед початком процесу зварювання необхідно провести попереднє підігрівання кромки. Для цього застосовуємо установку індукційного нагріву труб УНІТ -30-4,0-0 (рис. 3.15), технічні дані приведено в табл. 3.8. Індукційні нагрівальні установки використовуються для: попереднього безконтактного прогрівання стиків труб до 300-3500 ° С, що покращує якість зварювання; при експлуатації трубопроводів – відпустка зварних з'єднань. Нагрівання в індукційних установках відбувається за рахунок створення вихрових електромагнітних потоків, що збуджують молекули в товщі виробу з металу і призводять до нагрівання місця впливу індуктора. Індуктор за час роботи не нагрівається. Прогрів стиків відбувається зсередини металу, що робить установки максимально безпечними у процесі експлуатації.



Рис. 3.15 - Установка індукційного нагрівання труб УНІТ -30-4,0-0

Таблиця 3.8 – Технічні дані індукційної нагрівальної установки

Потужність (3 фази 380В)	35 кВт
Температура нагрівання	до 800°С
Діаметри труб, що нагріваються	50-350 мм
габаритні розміри	910x552x592 мм
Вага	130 кг

Після нагрівання кромки з'єднувальних труб проводять зварювання. Зварювання кожного шару шва здійснюється за один повний оборот з обов'язковим перекриттям попереднього шва не менш ніж на 5 мм. Подавання присадкового дроту під час зварювання може проводитися як з лівого, так і з правого боку. Після завершення заповнення кромки стику здійснюють зварювання облицювального шва.

Контрольні операції. Дані операції включають оцінку матеріалів перед початком зварювання, протягом етапу складання і зварювання, а також після завершення зварювання для остаточної перевірки якості з'єднання.

Контроль процесу складання та зварювання стиків проводять з метою перевірки відповідності розкриття кромки, дотримання потрібного зазору і ступеня притуплення. Його реалізують із застосуванням спеціальних шаблонів типу ШС-2 (рис. 3.16).



Рис. 3.16 - Шаблиони марки ШС-2 [26]

По закінченню всіх вимірювальних операцій підготовки кромки проводять візуальний контроль якості складання стику трубопроводу, та в процесі його зварювання. Після завершення зварювальних операцій проводять перевірку шва на наявність зовнішніх дефектів та здійснюють вимірювання розмірів шва відповідно до вимог СТО НОСТРОЙ 233. Вимірювання реалізують за допомогою шаблону WG-2 (рис. 3.17).

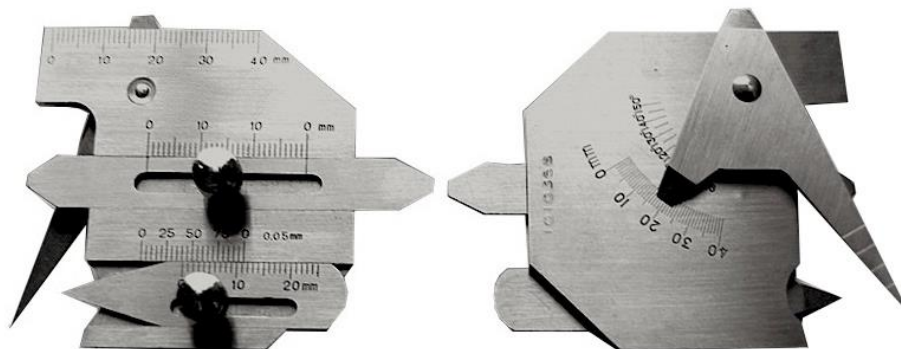


Рис. 3.17 - Шаблон WG-2 [26]

У відповідності до вище згаданого стандарту, зварні з'єднання на Атомних електростанціях підлягають радіографічній дефектоскопії. З метою виявлення внутрішніх дефектів в зварних з'єднаннях трубопроводів на атомних електростанціях (АЕС) застосовується метод радіографічної дефектоскопії. Даний метод застосовують, виходячи з можливостей більш повного та точного виявлення неприпустимих дефектів з урахуванням особливостей фізичних властивостей металу, а також особливостей методики контролю для даного виду зварних з'єднань. Двополюсні рентгенівські апарати з частотою перетворення 40кГц відрізняються дуже високою стабільністю виходу, точною установкою енергії та надзвичайно швидким виходом на заданий режим. Для його реалізації застосовуємо універсальні двополюсні переносні рентгенівські апарати YXLON SMART EVO-300 (рис. 3.18).



Рис. 3.18 – Загальний вигляд переносного рентгенівського апарата YXLON SMART EVO 300 [27]

## 4 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

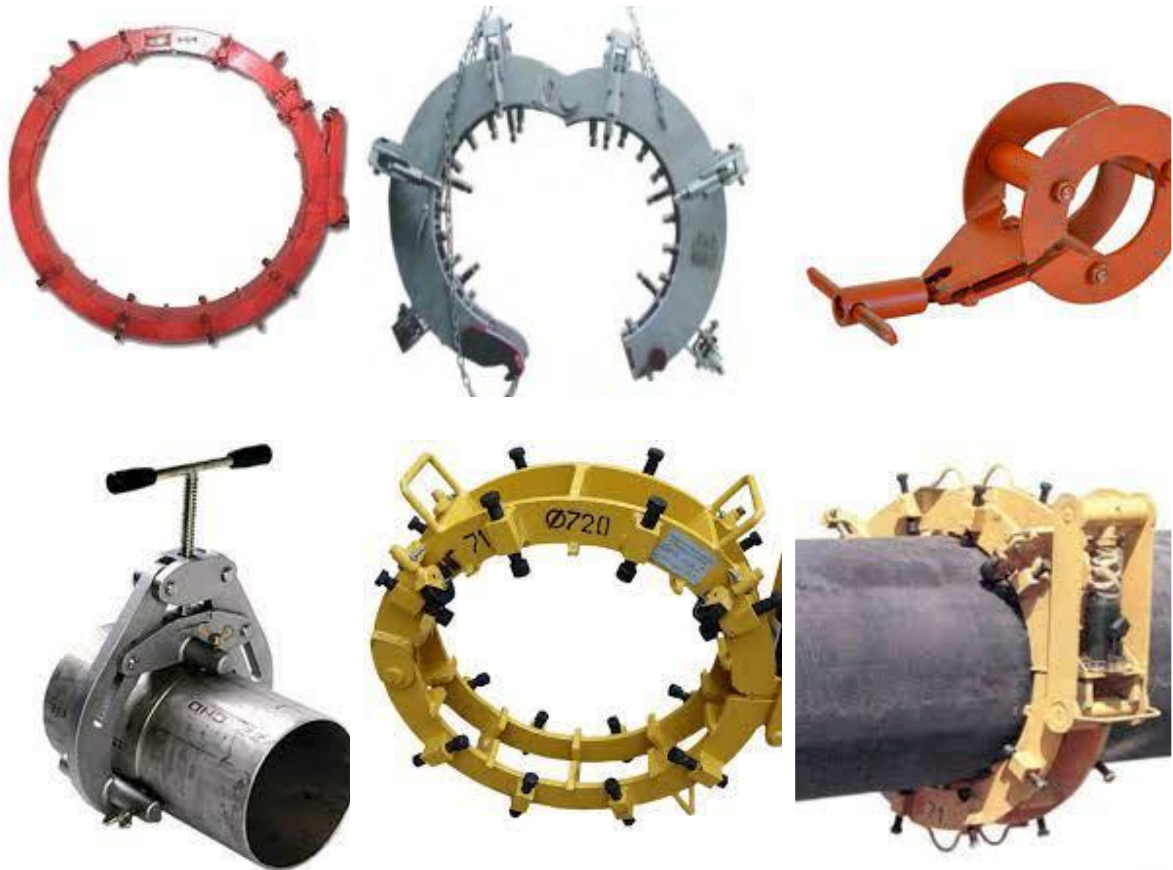
### 4.1 Вибір складально-зварювальних пристосувань

Складально-зварювальні пристосування застосовуються при виробництві зварних конструкцій для забезпечення точності та взаємного розташування з'єднаних кромок одна відносно іншої та з метою підвищення ефективності зварювальних робіт і якості зварних з'єднань. Такі пристосування застосовують також для запобігання деформації виробів в процесі проведення складальних, транспортувальних та зварювальних робіт. В основному такі пристосування поділяються на універсальні та спеціалізовані. Перший тип застосовується при виробництві одиничних виробів, а другий застосовують при серійному та масовому виробництві. Спеціалізовані пристосування виготовляються в більшості випадків під конкретний тип конструкцій, враховуючи технологічні особливості їх виготовлення. Щодо універсальних пристосувань то вони виготовляються із врахуванням однотипності конструкцій але різних типорозмірів.

Враховуючи те що в роботі розглядається питання виготовлення та монтажу трубопроводу другого контуру АЕС, то вибір зужується до вибору центраторів. Цей вид технологічних пристроїв використовується під час виробництва і монтажу труб для забезпечення їх співвісності та уникнення овальності стикованих кінців труб та деталей при збиранні вузлів і прямолінійних секцій трубопроводів. Це також застосовується при збиранні вузлів в блоки і секції в пліті.

Залежно від розташування відносно поверхні труби, центратори можуть бути зовнішніми (обхоплюють трубу) і внутрішніми (забезпечують опору всередині труби). Серед найпоширеніших є зовнішні центратори, які, за конструкцією, поділяються на балкові і безмоментні (багатоланкові, ланцюгові) (рис. 4.1). При збиранні труб до зварювання центратори відкриваються і встановлюються на обох кінцях з'єднаних труб. Зовнішні центратори доступні для різних діаметрів труб в діапазоні від 108 до 530 мм [28].

а)



б)



Рис. 4.1 - Центратори для складання та зварювання труб: а) балкові; б) безмоментні

Для монтажу трубопроводів застосовують так звані монтажні струбцини, які складаються із траверси, гвинта, гайки, обтискачів і стопорів.

Враховуючи запропонований спосіб автоматичного аргано-дугового зварювання із застосуванням орбітальної установки, то для складання стику



будемо застосовувати центратори. Конструкція центратора приведена на рис. 4.2. Технічні дані центратора приведено в таблиці 4.1.

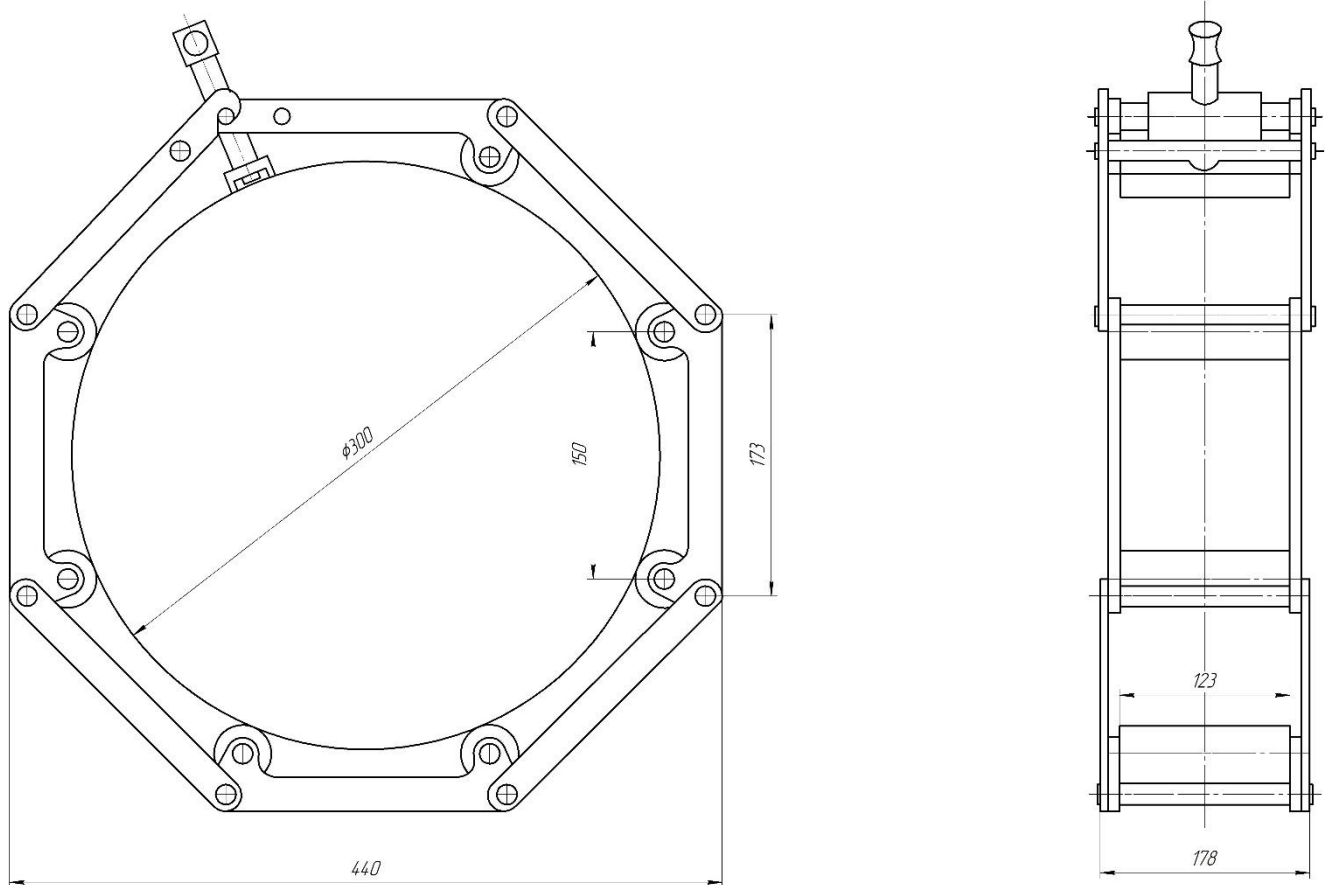


Рис. 4.2 – Центратор зовнішній

Таблиця 4.1 – Технічні дані центратора

Діапазон затиску	75 - 330 мм
Вага	41,00 кг.

За допомогою зовнішнього центратора здійснюємо складання стику шва на прихватках. Після цього його знімаємо і на складений трубопровід встановлюємо струбцину (рис. 4.3).

Дана струбцина складається із основи виготовленої у формі П на якій розміщуються два однакові затискні механізми.

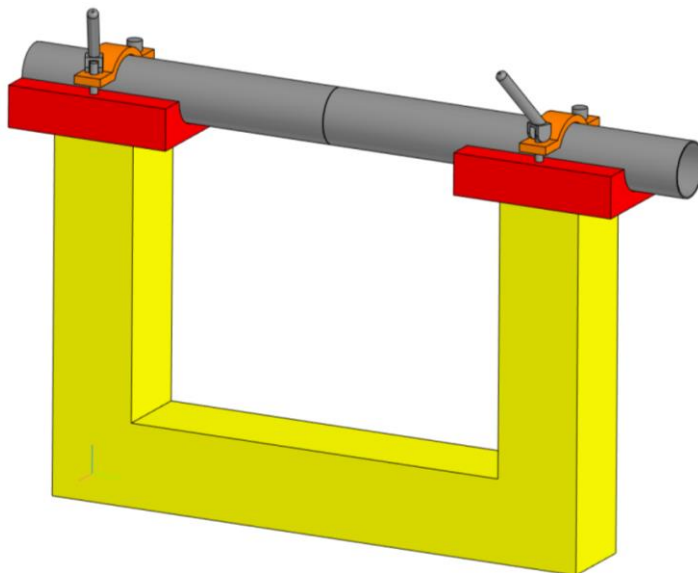


Рис. 4.3 Орбітальне зварювання труб в центраторі

## 4.2 Розрахунок зовнішнього центратора

Цей центратор є знімною конструкцією, яка, коли її розміщують у робочому стані, затягується за допомогою ланцюга і рівномірно розташованих пресувальних елементів. Ці елементи забезпечують оптимальне стиснення в специфічних зонах. Склад пресувального елемента включає гвинт, опору та ручку. Щоб уникнути вм'ятин на деталі, на гвинт надягають опору, яка кріпиться на кінці гвинта за допомогою шарніра. Гвинтові пресувальні елементи стали надзвичайно популярними у складальних та зварювальних пристроях через їх

універсальність, надійність у використанні, простоту конструкції та можливість значно знизити витрати зусиль.

Зазвичай гвинти пресувальних елементів піддаються деформації стиснення та скручування.

### Розрахунок гвинта

Визначення параметрів гвинта розпочинається із встановлення його мінімального внутрішнього діаметра. Цей мінімальний внутрішній діаметр  $d_{\text{вн}}$ , вимірюваний у міліметрах, залежить від розрахункової сили та допустимого навантаження на кручення [29].

Визначаємо найменший діаметр гвинта:

$$d_{\text{вн}} = \sqrt{\frac{1,27 P_0}{\tau_k}}, \quad (4.1)$$

де,  $P_0$  – розрахункове зусилля, яке дорівнює  $P_0 = Z_0 P$ ;

$P$  – осьове зусилля у гвинті;

$Z_0$  – коефіцієнт, який враховує наявність п'яти:

$Z_0 = 2$  при відсутності п'яти і  $Z_0 = 1,4$  при її наявності;

$P$  – осьове зусилля на гвинті;

$\tau_k$  – допустиме напруження на кручення.

$$d_{\text{вн}} = \sqrt{\frac{1,27 \cdot 1,4 \cdot 50000}{70}} = 36 \text{ мм.}$$

При вільній довжині гвинта  $l_1 > 10d_{\text{вн}}$ , проводять повторну перевірку:

$$\sigma_x = \frac{1,27 P_0}{d_{\text{вн}}^2 \varphi_0} \leq \sigma_{\text{доп}}, \quad (4.2)$$

де,  $\varphi_0$  – коефіцієнт зменшення основного допускового напруження на згин, Його підбирають залежно від співвідношення  $l/r_0$ ;

$l$  – розрахункова довжина при поздовжньому згині,  $l = 0,5l_1$ ;

$r_0$  – радіус інерції.

$$r_0 = \sqrt{\frac{I_{\min}}{F}}, \quad (4.3)$$

де,  $I_{\min}$  – мінімальний момент інерції приблизно рівний  $0,05 d_{\text{вн}}^4$  ;

$F$  – площа січення гвинта по внутрішньому діаметру.

У цій ситуації, коли  $l_1 < 10d_{\text{вн}}$ , не потрібно перевіряти гвинт на поздовжній згин. Однак важливо перевірити гвинт на максимальне навантаження через стиснення та кручення.

Визначаємо напруження стиску  $\sigma_z$ ,  $\text{кг/см}^2$

:

$$\sigma_z = \frac{1,27P}{d_{\text{вн}}^2}, \quad (4.4)$$

$$\sigma_z = 1,27 \cdot 5000 / 3,6^2 = 490 \text{ (кг/см}^2\text{)}.$$

Визначаємо  $\tau_{\text{кр}}$ ,  $\text{кг/см}^2$ :

$$\tau_{\text{к}} = \frac{M_{\text{кр}}}{\pi \cdot d^3 / 16}, \quad (4.5)$$

де,  $M_{\text{кр}}$  – максимальний крутний момент на гвинті.

$$M_{\text{кр}} = M_1 + M_2, \quad (4.6)$$

де,  $M_1$  – момент від сил тертя на різьбі;

$M_2$  – момент від сил тертя на опірній поверхні гвинта.

Момент від сил  $M_1$ ,  $\text{Н} \cdot \text{м}$ , тертя на різьбі дорівнює:

$$M_1 = P \operatorname{tg}(\varphi + \rho) r_{\text{сп}}, \quad (4.7)$$

де,  $\varphi$  – кут підйому гвинтової лінії на середньому діаметрі;

$\rho$  – кут тертя для пари гвинт – гайка;

$r_{\text{ср}}$  – середній радіус різьби.

Момент, викликаний силами тертя на опорній поверхні гвинта ( $M_2$ ), залежить від дизайну опорного елемента гвинта. У даному випадку, розрахунок цього моменту тертя на опорній поверхні гвинта:

$$M_2 = \frac{1}{2} PR_0 f \operatorname{ctg} \alpha \quad (4.8)$$

де,  $R_0$  – радіус шарової опори гвинта, 18 мм;

$f$  – коефіцієнт тертя, рівний 0,2.

$$M_1 = 50000 \cdot \operatorname{tg}(2+30) \cdot 0,015 = 468 \text{ (Н}\cdot\text{м)}$$

$$M_2 = 0,5 \cdot 50000 \cdot 0,01 \cdot 0,2 \cdot \operatorname{ctg} 120^\circ = 254 \text{ (Н}\cdot\text{м)}$$

$$M_{\text{кр}} = 468 + 254 = 722 \text{ (Н}\cdot\text{м)}$$

Повне навантаження на гвинт:

$$\sigma_0 = \sqrt{\sigma_z^2 + 4\tau_k^2}, \text{ якщо } \sigma_z > \tau_k; \quad (4.9)$$

$$\sigma_0^1 = \sqrt{\sigma_z^2 + 3\tau_k^2}, \text{ якщо } \sigma_z < \tau_k. \quad (4.10)$$

Повне напруження  $\sigma$  повинно бути меншим  $\sigma_0 = 600 \text{ кг/см}^2$ .

В усіх зварювальних пристосібленнях гвинтові притискачі повинні бути самогальмуючими, тобто  $\alpha < \rho$ , де  $\alpha$  – кут піднімання гвинтової лінії на середньому діаметрі;  $\rho$  – кут тертя.

## 5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

### 5.1 Протипожежні заходи, передбачені в технологічному процесі

Відповідальність за дотримання необхідного протипожежного режиму і своєчасне виконання протипожежних заходів в дільниці покладається на керівника підприємства і на начальника дільниці. Вони зобов'язані:

а) забезпечити повне і своєчасне виконання правил протипожежної безпеки і протипожежних вимог будівельних норм при проектуванні, будівництві і експлуатації об'єктів;

б) організувати на підприємстві пожежну охорону, добровільну пожежну дружину і пожежно-технічну комісію і керувати ними.

На підприємстві відповідними наказами або розпорядженнями встановлюється порядок проведення протипожежного інструктажу і занять по пожежно-технічному мінімуму з зварниками та іншими працівниками.

Протипожежний інструктаж проводять в два етапи. На першому етапі інструктаж проводить начальник місцевої пожежної охорони, або інженер по охороні праці.

Під час проведення повторного інструктажу зварників та інших працівників ознайомлюють з загальними правилами пожежної безпеки для виконання робіт з автоматичного зварювання труб великого діаметра, з пожежною небезпекою технологічного устаткування.

В дільниці цеху, де виконуються зварювальні роботи, для швидкої ліквідації пожеж, які можуть виникнути, є первинні засоби пожежогасіння: вогнегасник, бочки з водою, відра, ящики з піском лопати, сокири та інше.

Підвищення вогнетривалості дільниці і всього підприємства можливо облицюванням або оштукатурюванням металевих конструкцій. Перевагою користуються облицювальні матеріали, які володіють мінімальною масою і мінімальним коефіцієнтом температуропровідності. Так при облицюванні сталеві колони гіпсовими плитами товщиною 60мм границя вогнетривалості

підвищується від 0,25 до 3,3 годин. В дільниці також існують протипожежні перешкоди, до них відносять стіни, перегородки, перекриття, двері, люки, вікна. Протипожежні стіни повинні бути виконанні із негорючих матеріалів, мати границю вогнетривалості не менше 2,5 годин і опиратись на фундаменти. Двері, вікна, люки в протипожежних стінах повинні мати границю вогнетривалості не менше 1,2 годин, а перекриття – 1 годину. В дільниці також повинен висіти на стіні план евакуації людей на випадок виникнення пожежі. При виникненні пожежі працівники повинні покинути дільницю і будівлю на протязі мінімального часу, який визначається короткою відстанню від місця їх знаходження до виходу на зовні.

Використання на підприємстві, зокрема і в дільниці, автоматичних засобів визначення пожежі являється одним із основних умов забезпечення пожежної безпеки, так як дозволяє повідомити черговий персонал про пожежу і місце її виникнення [30].

Під час обіду, або відпочинку, куріння працівники повинні проводити в спеціально відведених для цього місцях, туалетах, на вулиці.

## **5.2 Оцінка технологічного процесу з умов техніки безпеки**

Розглянутий вище спосіб зварювання потребує дотримання визначного комплексу правил охорони праці, які знайшли відображенні в технологічному процесі і суворо дотримуються при виконанні зварювальних робіт. При виконанні робіт на зварювальному автоматі з метою охорони праці всі технологічні процеси виконуються згідно вимог інструкції з безпечної експлуатації устаткування:

1) вимоги техніки безпеки до експлуатації устаткування:

а) устаткування повинно бути заземлено. Заземлено повинно бути джерело живлення і шафа керування;

б) при роботі і ремонті устаткування існують джерела небезпеки:

- електричний струм;

- механічна дія;
- в) забороняється допускати до ремонту сторонніх працівників;
- г) при ремонті устаткування використовують тільки справний інструмент;

2) перед початком роботи устаткування зварник– оператор проводить технічний огляд устаткування:

- а) перевірити комплектацію зварювального апарату;
- б) виконати, при необхідності, змащування ходової частини;

3) під час роботи устаткування, необхідно дотримуватись таких вимог з техніки безпеки і слідкувати за:

- а) витіканням води і температурою води в системах охолодження;
- б) струмопередаючими деталями вторинного контуру;
- в) кількістю мастила на деталях, які труться;
- г) станом різьбових з'єднань;
- д) станом насосної установки згідно її експлуатаційним документам;
- е) не доторкатись і не перевіряти руками місця ходової частини при роботі устаткування;

- ж) не проводити підтягування різьбових з'єднань під час роботи устаткування;

При роботі на зварювальному автоматі, забороняється:

- а) доторкатись до струмоведучих частин і електроустаткування ;
- б) працювати при несправностях в одному із механізмів;
- в) знаходитись стороннім предметам в зоні рухомих частин машини.

По закінченні роботи, необхідно вимкнути на зварювальний автомат від мережі і джерела живлення.

Заходи боротьби з несправностями машини і їх попередженнями:

- а) періодично змащувати поверхні, які труться, не рідше одного разу на місяць;

- б) місце де зварювальні роботи повинно бути просторовим і освітленим;



в) ремонт електроустаткування дозволяється проводити бригаді чисельністю не менше двох чоловік, із яких один має кваліфікаційну групу з техніки безпеки не нижче четвертої, при цьому використовувати тільки відповідний інструмент;

г) місце де буде виконуватися зварювання повинно бути чистим і охайним, загороджене огорожею;

д) періодично проводити профілактичний огляд електроустаткування не рідше одного разу в місяць;

е) для захисту очей від виплесків розплавленого металу зварювальної ванни і іскор, зварник–оператор який обслуговує машину повинен мати захисний щиток;

ж) для захисту тіла від попадання виплесків розплавленого металу зварювальної ванни і іскор, зварник –оператор повинен мати спецодяг із брезентової тканини;

з) для захисту рук і ніг – брезентові, або гумові рукавиці і черевики на гумовій підшві, на підлозі перед зварювальним автоматом повинен лежати гумовий килимок;

і) для забезпечення нормального повітряного середовища має працювати місцева вентиляція;

к) освітлення робочої зони на робочому місці досягається за допомогою природного і штучного освітлення.

Правилами техніки безпеки категорично забороняється доторкатись до струмоведучих частин устаткування, не дозволяється відкривати двері шаф і джерела живлення під час роботи устаткування. Найбільша небезпека виникає при випадковому контакті з елементами первинного контуру джерела живлення, який знаходиться під напругою 380В, чи у випадку прибирання, чи замикання обмотки на вторинний виток зварювального випрямляча. Для попередження від ураження струмом, вторинний виток і корпус джерела живлення надійно заземлюють.

Всі органи керування – кнопки, регулятори, рубильники живляться напругою 36 В.

Причини пожеж, які можуть виникнути при зварюванні труб можуть бути різноманітними:

- а) недотримання вимог і експлуатації промислового устаткування;
- б) куріння працівників в забороненій зоні.

При автоматичному зварюванні джерелом пожеж можуть бути виплески розплавленого металу зварювальної ванни і іскри. В місці, де проходить зварювання не повинно бути легкозаймистих предметів і матеріалів.

В дільниці де виготовляється виріб, для швидкої ліквідації пожеж, які можуть виникнути, є засоби гасіння: пожежний щит, вогнегасник, лопата, відро, сокира і ящик з піском [30].

### **5.3 Організація цивільної оборони**

Цивільна оборона України 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 організується за територіальним виборним принципом на всій її території і виявляє собою сукупність структур державного управління, підприємств, організацій і спеціально створених органів керівництва та сил цивільної оборони. Заходи цивільної оборони проводяться по всій території держави, як правило заздалегідь з врахуванням особливостей кожного регіону.

Згідно із Законом кожен громадянин має право на захист свого життя і здоров'я від наслідків аварій, катастроф, пожеж, стихійного лиха та має право на надання гарантій забезпечення реалізації цього права.

Основним завданням цивільної оборони є:

а) запобігання виникненню надзвичайних ситуацій техногенного характеру, проведення заходів щодо зменшення збитків і втрат під час аварій, катастроф, великих пожеж та стихійного лиха;

б) оповіщення населення про загрозу і виникнення надзвичайних ситуацій у мирний та воєнний час, постійне інформування про наявну ситуацію та його захисту від наслідків;

в) організація життєзабезпечення населення під час аварій, катастроф, стихійного лиха та у воєнний час;

г) організація та проведення рятувальних та інших невідкладних робіт у районах лиха і осередках ураження;

д) створення систем аналізу і прогнозування управління. Оповіщення і зв'язку, спостереження і контролю за ради активними, хімічними, бактеріологічними зараженнями;

е) підготовка і перепідготовка керівного складу цивільної оборони, її органів управління та сил, навчання населення вмінню використовувати засоби індивідуального захисту і діяти в надзвичайних ситуаціях.

На всіх об'єктах народного господарства, цивільна оборона організовується з метою попередньої підготовки їх до захисту робітників, службовців в надзвичайних ситуаціях в мирний і воєнний час, створення умов, що підвищують стійкість роботи підприємства своєчасне створення умов для проведення рятувальних та інших невідкладних робіт.

Робота об'єкта в цілому складається з роботи окремих галузей виробництва. Тому необхідно розглянути стійкість у надзвичайних умовах окремих галузей виробництва.

Оцінюючи стійкість електропостачання, необхідно знати за яких надзвичайних ситуаціях мирного і воєнного часу об'єкт може залишатися без постачання електроенергії. Визначити мінімальні потреби в електроенергії для забезпечення основних невідкладних робіт, подача води в житлові будинки, квартири, для цехів і освітлення робочих місць.

Оцінюючи стійкість матеріально-технічного і енергетичного постачання, необхідно визначити запаси палива, можливість використання

місцевої сировини і енергії, автономні джерела електрозабезпечення, запаси сировини, стан поставки готової продукції споживачам, умови зберігання готової продукції, спроможність транспорту і засобів механізації [14, с.409].

На основі вивчення факторів, які впливають на стійкість роботи об'єктів, і оцінки стійкості елементів і галузей виробництва проти вражаючих факторів ядерної, хімічної і біологічної зброї, стихійних лих і виробничих аварій, необхідно своєчасно організовувати і впровадити організаційні, інженерно технічні рішення.

Інженерно–технічні заходи мають забезпечити підвищену стійкість виробничих споруд, технологічних ліній, устаткування, комунікацій об'єкта до вливу вражаючих факторів під час надзвичайних ситуацій. При проведенні цих заходів необхідно враховувати конкретні умови об'єкта народного господарства. Проте є загальні інженерно – технічні заходи, які мають проводитись на всіх об'єктах [31].

## ВИСНОВКИ

В роботі розроблено технологічний процес зварювання елементів технологічного трубопроводу II контуру АЕС та проведено дослідження щодо кінетики деформування матеріалів за дії статичного та комбінованого навантаження, а також впливу водню на поведінку матеріалів при деформуванні.

На основі проведеного літературного аналізу виявлено, що збільшення температури деформування від 423К до 623К зменшує напруження за однакової деформації як при розтязі так і при комбінованому розтязі. Також встановлено, що попереднє пластичне деформування при високих температурах (623 К) комбінованим навантаженням зменшує границю плинності наводненої і ненаводненої теплостійкої сталі 15ХМ1Ф. Водень в свою чергу приблизно на 10 % зменшує границю плинності даної сталі порівняно з ненаводненим матеріалом за статичного та комбінованого розтягу.

Аналіз деформаційних діаграм виявив, що наявність водню суттєво знижує рівень напружень за розтягу і комбіновано розтягу у порівнянні з ненаводненим металом. Також слід зазначити, що показник деформаційного зміцнення сталі 15ХМ1Ф зростає під впливом водню. Зростання розмаху напружень за комбінованого навантаження приводить до зростання коефіцієнту деформаційного зміцнення матеріалу.

За результатами досліджень розроблено технологічний процес зварювання магістрального трубопроводу. В запропонованому варіанті для зварювання стиків застосовується спосіб автоматичного орбітального аргон-дугового зварювання із присадковим дротом. Для реалізації запропонованих рішень підібрано і обґрунтовано обладнання для усіх етапів і операцій технологічного процесу. Враховуючи специфіку зварювання сталей перлітного класу запропоновано обладнання для попереднього підігріву торців труб у місці зварювання.

Для підвищення якості складально-зварювальних операцій розроблено спеціальний центратор труб, який застосовується в процесі орбітального зварювання.

Запропоновані інженерні рішення дозволяють підвищити якість та ефективність монтажних робіт при ремонті і будівництві технологічного трубопроводу II контуру АЕС.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Реактори і парогенератори енергоблоків АЕС: схеми, процеси, матеріали, конструкції, моделі / О. В. Єфімов, М. М. Пилипенко, Т. В. Потаніна та ін. ; за ред. О.В. Єфімова. – Харків : ТОВ «В справі», 2017. – 420 с.
2. Водно-хімічний режим і математичне моделювання другого контуру АЕС із реактором типу ВВЕР-1000 / Р.Б. Медведєв, С.Л. Мердух // Наукові вісті НТУУ "КПІ" 2013/3. С. 132-139.
3. СОУ НАЕК 159:2020 Забезпечення технічної безпеки. Зварювання та наплавлення устаткування і трубопроводів атомних електричних станцій з реакторами ВВЕР. Технічні вимоги. – 133 с.
4. ПНАЭ Г-7-009-89. Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок сварка и наплавка. основные положения – 183 с.
5. [http://www.splav-kharkov.com/mat\\_start.php?name\\_id=993](http://www.splav-kharkov.com/mat_start.php?name_id=993)
6. Леговані сталі та сплави з особливими властивостями. Підручник / Куцова В.З., Ковзель М.А., Носко О.А. – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2008. – 348 с.
7. Методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни «Технологія та устаткування зварювання плавленням» / М.І. Підгурський, Б.П. Татарин, І.Б. Окіпний, В.С. Сенчишин. – Тернопіль: ТНТУ імені Івана Пулюя, 2017. – 95 с.
8. НП 306.2.227-2020 Загальні вимоги безпеки до улаштування та експлуатації обладнання й трубопроводів атомних станцій.
9. СОУ НАЕК 160:2020 Обеспечение технической безопасности. Контроль качества основного металла, сварных соединений и наплавки оборудования и трубопроводов атомных электрических станций с реакторами ВВЭР. Технические требования. – 118 с.
10. P. Yasniy, I. Okipnyi, O. Dyvdyk, A. Rudawska, V. Senchyshyn. Residual lifetime of the plates with preexisting crack near cold expanded hole. Procedia Structural Integrity, 2022. 36, P. 197-202.

11. V. Zapukhlyak, Yu. Melnychenko, I. Okipnyi, L. Poberezhny, Ya. Grudz, N. Drin, M. Chernetsky. Reliability assurance of gas-hydrogen mixture transportation by gas pipeline system *Procedia Structural Integrity*. – 2022. 36, P. 378-385.
12. I. Okipnyi, P. Maruschak, O. Prentkovskis. Structural-hierarchical mechanism for cracking reactor steel after preliminary thermomechanical loading // *Solid State Phenomena*. - Vols. 220-221. – 2015. – P. 720-724.
13. Yasniy P.V., Okipnyi I.B. , Maruschak P.O., Panin S.V., Konovalenko I.V. Crack tip strain localisation on mechanics of fracture of heat resistant steel after hydrogenation // *Theoretical and Applied Fracture Mechanic*. – 2013. Vol. 63-64. - P. 63-68.
14. Бреславський Д.В. Розробка методу розрахунку повзучості та довготривалої міцності циклічно навантажених елементів машинобудівних конструкцій: Автореф. дис. ... доктора техн. наук: 05.02.09 / Харківський державний політехнічний університет. -Харків, 1999. -34с.
15. Ясній П.В., Галушак М.П. Методика і деякі результати дослідження впливу циклічного навантажування на діаграми деформування сплаву АМг6 // *Вісник Тернопільського державного технічного університету*. -1998. -Том 3, число 4. -С. 62-66.
16. Ясній П.В. Вплив експлуатаційних факторів на деформування і руйнування корпусних реакторних сталей: монографія / Ясній П.В., Окіпний І.Б., Гуцайлюк В.Б. – Вид-во ТНТУ ім. Івана Пулюя: Тернопіль, 2014. – 185 с.
17. Биковський О.Г. Зварювання, різання й контроль якості під час виробництва металоконструкцій: підручник. – К.: Основа, 2021. – 400 с.
18. Походня,И.К. Дуговая сварка неповоротных стыков магистральных трубопроводов / И.К.Походня, И.К.Шейнкин, В.Н.Шлепаков. – М.: Недра, 1987–190с.
19. ПНАЭ Г-7-009-89. Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок сварка и наплавка. основные положения – 183 с.
20. Н.М. Махлін Апаратно-програмні комплекси для автоматичного зварювання неповоротних стиків трубопроводів атомних електростанцій /



Н.М. Махлін, О.Є. Коротинський, А.О. Свириденко.// Наука та інновації. 2013. Т. 9. № 6. С. 31—45

21. Спеціальні способи зварювання : підручник / І. В. Кривцун, В. В. Квасницький, С. Ю. Максимов, Г. В. Єрмолаєв, за загальною редакцією академіка НАН України, доктора технічних наук, професора Б. Є. Патона. – Миколаїв : НУК, 2017.– 346 с.

22. Биковский, О.Г. Довідник зварника: довідник / О.Г. Биковський, І.В. Піньковський. - К.: Техніка, 2002. – 336 с.

23. [https://www.alibaba.com/product-detail/2016-KHGK-series-DC-TIG-welding\\_300007265377.html](https://www.alibaba.com/product-detail/2016-KHGK-series-DC-TIG-welding_300007265377.html)

24. <https://kvrc.in.ua/ua/p1598182473-truborez-razemnyj-300.html>

25. [https://alb.com.ua/ua/p1931030380-ruchnoj-kromkorez.html?source=merchant\\_center&gclid=EAIaIQobChMIw4qYroGUgwMVMZFoCR2cZAbHEAQYASABEGJQ7PD\\_BwE](https://alb.com.ua/ua/p1931030380-ruchnoj-kromkorez.html?source=merchant_center&gclid=EAIaIQobChMIw4qYroGUgwMVMZFoCR2cZAbHEAQYASABEGJQ7PD_BwE)

26. <http://standart-m.com.ua/izmeritelnyj-instrument/shablony-svarcshika/>

27. <https://inter-xray.com/perenosni-rentgen-aparati-seri%D1%97-smart-evo/>

28. Кривов, Г.О. Виробництво зварних конструкцій: підручник для студентів вищих навчальних закладів / Кривов, Г.О., Зворикін, К.О. – К.:КВІЦ, 2012.-896 с.

29. Карпенко А.С. Технологічна оснастка у зварювальному виробництві / 2-ге видання, переробл. та доповн.: Навч. посібник.- К.: Арістей, 2006. - 272 с.

30. Левченко О. Г. Охорона праці у зварювальному виробництві Навчальний посібник. / О.Г. Левченко – К.: Основа, 2010. – 240 с.

31. Стеблюк М.І. Цивільна оборона. Підручник. – К.: Знання, 2006 – 487с.

# ДОДАТКИ