

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: **Удосконалення технології виготовлення кожухотрубний
теплообмінник з дослідженням втомної міцності зварних
з'єднань**

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

(шифр і назва спеціальності)

(підпис)

Тріщ А.Г.

(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

Окіпний І.Б.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

Ткаченко І.Г.

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

(підпис)

Окіпний І.Б.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Тернопіль
2024

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра на тему: "Удосконалення технології виготовлення кожухотрубний теплообмінник з дослідженням втомної міцності зварних з'єднань" складається із розрахунково-пояснювальної записки об'ємом 86 аркуші 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.

В роботі розроблено удосконалену технологію виготовлення кожухотрубного теплообмінника та досліджено втомну міцність його зварних швів.

Запропоновані рішення, спрямовані на зниження трудомісткості та підвищення продуктивності зварювального процесу, що реалізується шляхом переходу від ручного механізованого зварювання в середовищі захисних газів до автоматизованого зварювання.

Виявлено, що моделювання крупне зерно зони термічного впливу при зварюванні з допомогою термоциклічного симулятора і застосування печі для росту зерна та гартування адекватно відтворює та дає змогу оцінити втомну міцність зварного з'єднання. Малі дефекти в крупному зерні зони термічного впливу на зовнішній границі зварного шва, що співрозмірні зернам матеріалу є ініціаторами втомних тріщин у випадку циклічного навантаження. Найвища втомна міцність отримана на гладких зразках без дефекту. Відбиток Вікерса з діагоналлю приблизно 200 нм у крупному зерні зони термічного впливу матеріалу знижує втомну міцність. Залишкові стискаючі напруження наведені індукуванням відбитку Вікерса впливають на ініціювання втомних тріщин. Втомна тріщина від дефекту починається пізніше в порівнянні з дефектом без залишкових напружень. Відбиток знижує втомну міцність до 14 %, а в подальшому до 21 %.

Ключові слова: ЗВАРЮВАННЯ, ЗАХИСНИЙ ГАЗ, НАПІВАВТОМАТ, КОЖУХОТРУБНИЙ ТЕПЛООБМІННИК, ВІДБИТОК ВІКЕРСА.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	8
1.1 Конструкція виробу та умови роботи	8
1.2 Технічні умови на виготовлення зварної конструкції.....	15
1.3 Аналіз існуючого технологічного процесу	22
2 ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА	25
2.1. Аналіз сучасного стану впливу мікродефектів на втомну міцність конструкційних матеріалів.....	25
2.2 Методика дослідження впливу мікродефектів на втомну міцність конструкційних матеріалів.....	31
2.3 Обґрунтування параметрів термоциклу для моделювання зони термічного впливу	36
2.4 Мікроструктура зони термічного впливу	37
2.5 Вплив залишкових напружень на втомну міцність	43
3 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА.....	46
3.1 Обґрунтування способу зварювання	46
3.2 Опис технологічного процесу.....	63
4 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА	67
4.1 Розрахунок зусиль підгинання кромки	67
4.2 Розрахунок пневмоциліндрів довальцювання обичайки	68
4.3 Опис конструкції пристосувань.....	71
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	74
5.1 Загальні вимоги до посудин, що працюють під тиском	74
5.2 Вимоги нормативних документів до систем виробничого освітлення, їх основні величини	76
5.3 Підвищення стійкості об'єкта до ударної хвилі	80
ВИСНОВКИ.....	83
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	84
ДОДАТКИ.....	86

ВСТУП

Механізація та автоматизація зварювального виробництва є ключовими чинниками підвищення продуктивності праці, покращення якості зварних конструкцій та оптимізації умов праці.

Сучасний підхід орієнтований на прискорення оновлення та модернізації застарілих машин і агрегатів, а також на збільшення обсягів виробництва спеціалізованого зварювального та допоміжного обладнання загального призначення. Особливу увагу приділяють обладнанню з інтегрованими системами програмного управління, розробці новітніх технологічних процесів та інноваційних засобів малої механізації. Це забезпечує комплексну механізацію виробничого циклу, підвищення продуктивності та поліпшення умов праці шляхом гармонійного поєднання основного зварювального обладнання з допоміжними пристроями.

Широкомасштабна механізація допоміжних операцій із заміною ручної праці на машинну реалізується завдяки застосуванню двох сучасних конструкторських принципів:

- створення переналагоджуваного обладнання з автономними механізованими приводами;
- розробка універсальних силових приводів.

Ефективна механізація складально-зварювальних процесів має значний вплив на промисловість, забезпечуючи основу для прискорення технічного прогресу, зростання продуктивності праці та вдосконалення техніко-економічних характеристик виробничих процесів у машинобудуванні.

Теплообмінне обладнання займає значну частку в складі технологічного оснащення хімічної та суміжних галузей промисловості. Його питома вага на підприємствах хімічної промисловості становить 15–18%, а в нафтохімічній та нафтопереробній галузях досягає 50%. Це пояснюється тим, що більшість основних технологічних процесів (випаровування,

ректифікація, сушка тощо) вимагають підведення або відведення теплової енергії.

В Україні близько 80% загального обсягу виробництва теплообмінного обладнання для хімічної та суміжних галузей припадає на кожухотрубні теплообмінники. Ці апарати характеризуються простотою виготовлення, надійністю в експлуатації та універсальністю. Вони здатні забезпечувати теплообмін між газами, парами та рідинами в будь-якому поєднанні теплоносіїв у широкому діапазоні тисків і температур.

Розвиток наукових основ та інженерної техніки теплообміну пов'язаний із досягненнями багатьох вітчизняних і закордонних науковців та інженерів.

Сучасний рівень розвитку теорії та практики хімічної технології та промислової теплотехніки характеризується вдосконаленням обладнання і технологій (інтенсифікація процесів, створення оригінальних конструкцій і схем, підвищення потужності одиничних апаратів) і водночас активним впровадженням новітніх методологій вирішення наукових і практичних завдань. Ці тенденції є визначальними для сучасного стану техніки теплообміну [1].

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Конструкція виробу та умови роботи

Теплообмінні апарати широко застосовуються як автономні агрегати або як ключові елементи комплексних технологічних систем в енергетиці, хімічній, нафтовій, харчовій та інших галузях промисловості.

Кожухотрубчасті теплообмінники (рис.1.1) є найпоширенішими типами обладнання в промисловості. Їх конструкція включає трубні пучки, закріплені в трубних решітках, кожух, кришки, патрубки, опори, а також додаткові вузли залежно від їх функціонального призначення. Корпус кожухотрубчастого теплообмінника виготовляється у вигляді циліндра, складеного зі сталевих листів, зварених між собою. До кінців корпусу приварюються фланці для монтажу кришок. Трубчаста частина теплообмінника виготовляється з прямих труб діаметром 20 мм. Трубні решітки слугують для надійного кріплення труб пучка за допомогою таких методів, як розвальцювання, зварювання, пайка чи сальникове ущільнення. Вони можуть бути приварені до корпусу, затиснуті болтами між фланцями корпусу та кришки або закріплені лише болтами із фланцями вільної камери. Кришки мають різні форми: плоскі, конічні, сферичні або еліптичні, з останніми найпоширенішими [1-2].



Рис. 1.1 – Кожухотрубний теплообмінник

Теплообмінні апарати використовуються для здійснення теплообмінних процесів з метою нагрівання чи охолодження робочого середовища для його обробки або утилізації теплової енергії.

Кожухотрубчасті теплообмінники доцільно застосовувати у випадках, коли потрібна значна площа теплообміну, наприклад, для випаровування та конденсації теплоносіїв у технологічних процесах, а також для нагрівання і охолодження рідин або газів. Зазвичай гарячий теплоносій (пара) подається в міжтрубний простір, тоді як рідина, що нагрівається, проходить по трубах. У випадку забруднених потоків, таких як запилені гази або суспензії, їх спрямовують у трубки, оскільки їх легше очищати.

Трубний і міжтрубний простори, якими рухаються теплоносії, розділяються поверхнею теплообміну. Кожний із цих просторів може бути розділений перегородками на декілька ходів, що сприяє збільшенню швидкості теплоносіїв і підвищенню інтенсивності теплообміну. У кришках апарата встановлюються перегородки, які поділяють труби на секції для послідовного проходження рідини. У всіх секціях кількість труб однакова. У багатоходових теплообмінниках швидкість руху теплоносія і коефіцієнт тепловіддачі зростають пропорційно кількості ходів порівняно з одноходовими (рис. 1.2).

Конструкція теплообмінника виконана у формі циліндра, що забезпечує легку механізацію процесу виготовлення. Порівняно компактні розміри теплообмінника дозволяють зменшити витрати металу, спрощують вибір обладнання для зварювання та обробки його компонентів. Більшість вузлів є стандартизованими, що забезпечує уніфікацію технології виробництва. Використання однотипного обладнання для виготовлення більшості деталей дозволяє значно знизити трудомісткість, енергоспоживання та загальну собівартість виробництва, водночас підвищуючи технологічність обладнання завдяки можливостям автоматизації та механізації.

Кожухотрубні теплообмінники завдяки своїй простоті конструкції та високій надійності залишаються найпоширенішими апаратами серед рекуперативних теплообмінників, які активно використовуються в промисловості. Вони застосовуються для передачі теплової енергії від "гарячого" теплоносія до "холодного" з метою нагрівання або охолодження різних речовин до заданих параметрів. "Гарячим" теплоносієм називають робоче середовище, яке віддає теплоту, а "холодним" – те, яке її поглинає. У відповідності до умов завдання, як гарячий теплоносієм було обрано насичену пару низького тиску, а як холодний – водний розчин солі, кислоти або технічну воду [2].

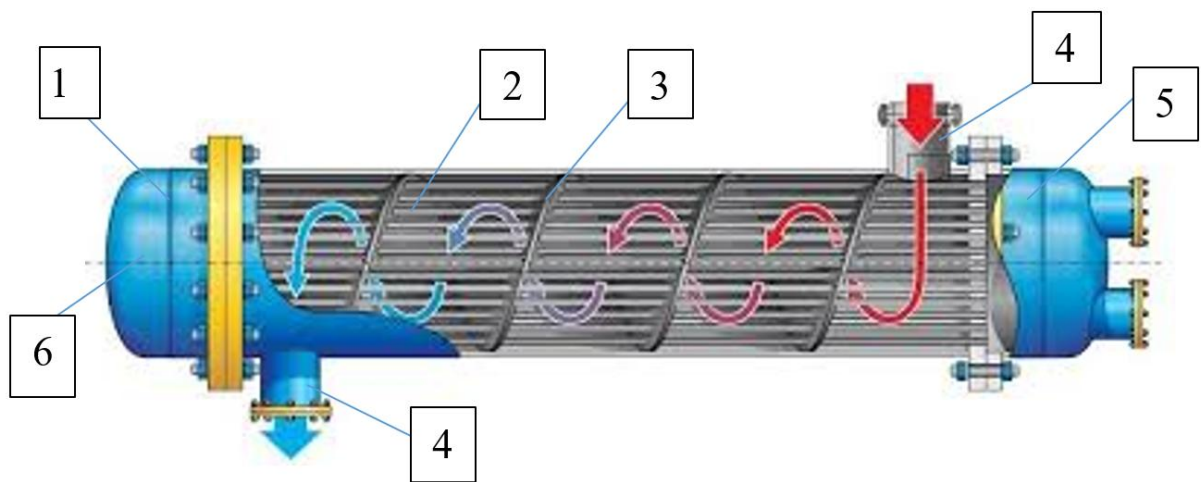


Рис. 1.2 – Конструкція кожухотрубного теплообмінника

Основними його елементами є трубний пучок, закріплений у трубних решітках, та кожух із кришками. Трубний і міжтрубний простори, через які рухаються гарячий і холодний теплоносії, відокремлені один від одного поверхнею теплообміну. Кожен із просторів може бути розділений перегородками на кілька ходів для підвищення ефективності теплообміну.

Конструкція теплообмінника включає:

- Кожух (1), що містить трубний пучок (2).
- Трубні решітки (3), які закріплюють пучок труб за допомогою розвальцювання або зварювання.

- Патрубки (4) для подачі й відведення теплоносіїв (пари, конденсату або водного розчину).
- Кришки (5,6), які обмежують апарат з торців.

Важливим елементом конструкції є температурні компенсатори, які, хоча й не показані на рисунку, використовуються для зменшення напружень у місцях з'єднання частин апарата з різними температурними режимами. Особливо це стосується з'єднання труб із трубними решітками. Якщо різниця температур між кожухом і трубами перевищує 50–60 °С, такі компенсатори є обов'язковими. У разі, якщо температурний перепад є меншим, використовуються апарати з жорсткою конструкцією та нерухомими трубними решітками.

Подальший аналіз стосується теплообмінників із нерухомими трубними решітками, які застосовуються в умовах, коли немає необхідності в механічному очищенні міжтрубного простору. У таких апаратах рідина, здатна утворювати осад при нагріванні, подається у трубний простір, тоді як у міжтрубний простір спрямовуються чисті рідини або пара. Це дозволяє мінімізувати забруднення та спростити обслуговування апарата.

Кожухні теплообмінники виготовляють із різних сталей залежно від умов експлуатації та специфіки технологічного процесу. В залежності від умов застосовують:

- вуглецеві сталі (при температурах до 400°С та неагресивних середовищах) Ст3, Ст20, сталь 09Г2С – для помірно-агресивних середовищ і низьких температур;
- леговані сталі (при підвищених температурах або в корозійно-активних середовищах):
 - 12Х18Н10Т, 08Х18Н10Т при корозії в агресивних середовищах (кислоти, солі, луги),
 - 10Х17Н13М2Т, 03Х17Н14М3 – при високих температур і агресивних середовищ, таких як хімічні та нафтохімічні процеси,

- 15X5М, 12Х1МФ – жароміцні сталі для високотемпературних теплообмінників (до 600–650°C).
- 21Х2НМФА – для високотемпературних і високонавантажених теплообмінників.
- 10Х9МФБ, 20ХМ – для пароперегрівачів та інших апаратів, що працюють при температурах до 550–600°C.

Враховуючи в нашому випадку особливості експлуатації кожухного теплообмінника, для його виготовлення застосовуємо сталь 21Х2НМФА.

Сталь даної марки застосовується для виготовлення елементів теплообмінного обладнання, зокрема теплообмінників, які працюють в умовах високого тиску та температур. Ця легована сталь характеризується високою міцністю, корозійною стійкістю і жароміцністю, що робить її придатною для експлуатації в хімічній, нафтохімічній промисловості та енергетиці. Дана сталь широко застосовується для виготовлення теплообмінників які експлуатуються в умовах високих температур і тисків (пароперегрівачі, котли-утилізатори), корпусів та трубних системи теплообмінного обладнання.

Основними експлуатаційними характеристиками сталі є:

- Підвищена стійкість до термічної втоми.
- Стійкість до агресивного середовища.
- Добрі механічні властивості при високих температурах (до 450–500°C).

Основні дані сталі 21Х2НМФА приведено в табл. 1.1 – 1.2.

Таблиця 1.1. Хімічний склад у % матеріалу 21Х2НМФА [3]

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Mo	V	Cu
0.16 - 0.23	0.17 - 0.37	0.3 - 0.7	0.8 - 1.2	до 0.025	до 0.025	1.9 - 2.4	0.35 - 0.45	0.18 - 0.28	до 0.25

Таблиця 1.2. Механічні властивості при T=20°C матеріалу 21Х2НМФА [3]

Сортамент	Напр.	σ_B	δ_5	KCU	Термооброблення
		МПа	%	кДж / м ²	
Лист товстий		490-740	18		Нормалізація
		1130	9	390	Гартування і відпуск
Лист тонкий		490-740	18		Нормалізація
		1130	9		Гартування і відпуск

З метою здатності сталі 21Х2НМФА до зварювання необхідно провести оцінку її схильності до утворення дефектів у зварних з'єднаннях і вибір відповідних технологічних умов зварювання. Оскільки ця сталь є легованою і використовується для роботи в складних умовах (високий тиск, температури, агресивне середовище), необхідно провести оцінку схильності до утворення холодних тріщин.

Для цього проводять визначення еквіваленту вуглецю. Еквівалент вуглецю ($C_{екв}$) є показником, що дозволяє оцінити зварюваність металу та його схильність до утворення тріщин у зварному шві. Він розраховується на основі хімічного складу металу [4-5].

Оновлені знання щодо природи зварювальних процесів дають підстави стверджувати, що всі однорідні метали та сплави здатні формувати зварні з'єднання належної якості за умови, якщо еквівалент вуглецю (C_e) не перевищує 0,45%.

- I. При $C_{екв} \leq 0,45$ зварюваність легованих сталей оцінюється як добра.
- II. При $C_{екв} \leq 0,49$ зварюваність є задовільною для низьковуглецевих сталей.
- III. У діапазоні $C_{екв} > 0,45$ до 0,5 зварюваність вважається прийнятною, але необхідним є попередній підігрів.
- IV. Для значень $C_{екв} > 0,5$ до 0,6 зварюваність стає обмеженою, що потребує додаткових заходів, таких як підігрів і відпал або нормалізація.
- V. У разі, якщо $C_{екв} > 0,6$ до 0,8, зварюваність значно погіршується, що ускладнює технологічний процес.

Цей підхід дозволяє оцінити придатність матеріалів до зварювання та визначити необхідні технологічні заходи.

$$C_{екв} = C + \frac{Mn}{10} + \frac{Cr + V + Mo}{10} + \frac{Ni}{15} . \quad (1.1)$$

$$C_{екв} = 0,19 + \frac{0,3}{10} + \frac{1,9 + 0,18 + 0,35}{10} + \frac{0,8}{15} = 0,48$$

З проведеного розрахунку можна вважати, що зварюваність сталі є задовільною, тому перед зварюванням будемо проводити попередній підігрів до температури:

$$T_{нид} = 350\sqrt{C_{об} - 0,25} \quad (1.2)$$

$$C_{об} = C_{екв}(1 + 0,005\delta) = 0,48 \cdot (1 + 0,005 \cdot 12) = 0,50$$

$$T_{нид} = 350\sqrt{0,50 - 0,25} = 180 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Також для оцінки схильності сталей до утворення гарячих тріщин в процесі зварювання визначають показник HCS:

$$HCS = \frac{C \left(S + P + \frac{Si}{25} + 0,01Ni \right) \cdot 10^3}{3Mn + Cr + Mo + V} \quad (1.3)$$

$$HCS = \frac{0,19 \left(0,025 + 0,025 + \frac{0,17}{25} + 0,01 \cdot 0,8 \right) \cdot 10^3}{3 \cdot 0,3 + 1,9 + 0,35 + 0,18} = 3,6$$

Виходячи з того, що HCS для сталей з $\sigma_B < 700$ МПа менше 4, то сталі не схильні до утворення гарячих тріщин.

1.2 Технічні умови на виготовлення зварної конструкції

Матеріали, які застосовуються для виготовлення апаратів, повинні відповідати вимогам державних стандартів, технічних умов та цього стандарту. Їхні хімічний склад і механічні властивості мають бути підтверджені сертифікатами, наданими постачальником.

Під час вибору матеріалів для виготовлення посудин, їх складових частин та деталей необхідно враховувати такі параметри: розрахунковий тиск, температурний режим (мінімальна негативна та максимальна розрахункова температура стінки), хімічний склад і властивості робочого середовища, технологічні характеристики та корозійну стійкість матеріалів [6].

Для посудин, що встановлюються на відкритому просторі або в неопалюваних приміщеннях, додатково враховуються:

- абсолютна мінімальна температура зовнішнього повітря в регіоні (згідно зі ДБН), якщо стінка посудини може охолоджуватися до негативних температур;
- середня температура найхолоднішої п'ятиденки із забезпеченістю 0,92 (згідно зі ДБН), якщо температура стінки залишається позитивною.

Елементи, які приварюються до корпусу апарата (опори, підкладки, опорні кільця тощо), повинні виготовлятися з матеріалів із доброю зварюваністю та коефіцієнтами лінійного розширення, близькими до показників матеріалу корпусу (різниця не повинна перевищувати 10%).

Допускається приварювання елементів із вуглецевої або низьколегованої сталі до корпусів із хромонікелевих аустенітних сталей за умови, що це передбачено проектом, із зазначенням параметрів їхньої товщини та протяжності.

Якщо сертифікати на матеріали або дані випробувань відсутні, необхідно проводити випробування матеріалів на виробництві відповідно до вимог стандартів або технічних умов.

Додаткові вимоги до матеріалів, не передбачені стандартами, повинні бути чітко зазначені в технічній документації. Замовляючи сталь, необхідно забезпечити вміст сірки й фосфору не більше 0,035%.

Внутрішні поверхні кожуха та штуцерів перед складанням мають бути очищені від окалини та забруднень. Зварні шви корпусу повинні бути зачищені врівень із внутрішньою поверхнею, допускається посилення оброблених швів до 0,05 мм для монометалічних посудин та до 1,5 мм для двошарових.

Конструкція штуцерів має забезпечувати зручний монтаж і демонтаж трубного пучка. Поверхні ущільнювачів трубних грат повинні бути без дефектів, а шорсткість відповідати вимогам ДСТУ. Поверхні отворів під труби мають відповідати СОУ МПП 71.120-217:2009.

Кінці теплообмінних труб перед закріпленням у трубних гратах повинні бути очищені від задирок, напливів і окалини. Трубний пучок повинен безперешкодно входити у корпус, а внутрішня поверхня труб після розвальцювання не повинна мати відшарувань металу.

Для з'єднання фланців із патрубками, обичайками та днищами за умов тиску понад 2,5 МПа (25 кгс/см²) і температури понад 300 °С конструктивні проміжки в з'єднаннях не допускаються.

Таблиця 1.3- Максимальна кількість труб, що заглушаються [6]

Діаметр апарата, мм	До 426	500(530) 600 (630)	800	1000
Кількість труб, шт	2	3	4	5

Зміщення крайок листів В (рис. 1.3), визначене по середній площині, у стикових з'єднаннях, що впливають на міцність посудини, повинно бути не

більше $B=0,1s$, але не перевищувати 3 мм, де s – мінімальна товщина зварюваних листів.



Рис.1.3- Схема зміщення кромки

До стикових з'єднань, що визначають міцність посудини, належать подовжні шви обичайок і патрубків, а також хордові та меридіональні шви опуклих днищ. Під час вимірювання зміщення крайок B листів завтовшки s і $s1$ у стикових з'єднаннях необхідно враховувати такі умови:

$$B1 \leq 0,5 (S1 - S) + B \quad (1.4)$$

$$B2 \leq 0,5 (S1 - S) - B \quad (1.5)$$

де, $B1$ і $B2$ – відстані між кромками листів.

Зміщення крайок у кільцевих швах монометалічних посудин, а також у кільцевих і подовжніх швах біметалічних посудин із боку корозійностійкого шару, не повинно перевищувати величин, зазначених у таблиці 1.4. Відхилення f крайок (рис. 1.4) у стикових зварних з'єднаннях не повинно перевищувати: $f=0,1s+3$ мм, $f=0,1s+3$ мм, але не більше значень, наведених у таблиці 1.5, залежно від внутрішнього діаметра D обичайок і днищ (s – товщина обичайки або днища).

Таблиця 1.4 – Допустимі величини зміщення кромки у кільцевих швах посудин, виконаних різними методами зварювання. [6]

Товщина зварювальних листів, S, мм	Максимальне допустиме зміщення кромки, мм	
	у кільцевих швах на монометалічних посудинах	у кільцевих і подовжніх швах на біметалічних посудинах з боку корозійностійкого шару
До 20	$10\% S+1$	50% від товщини плакуючого шару
20-50	$15\% S$, але не більше 5	50% від товщини плакуючого шару
50-100	$0,00,04S + 3,5$	$0,00,04S + 3,0$, але не більш за товщину плакуючого шару
Більше 100	$0,00,025S + 5,0$, але не більше 10	$0,00,025S+5,0$, але не більше 8 і не більше товщини плакуючого шару

Під час вимірювання відхилення крайок не враховується посилення зварного шва.

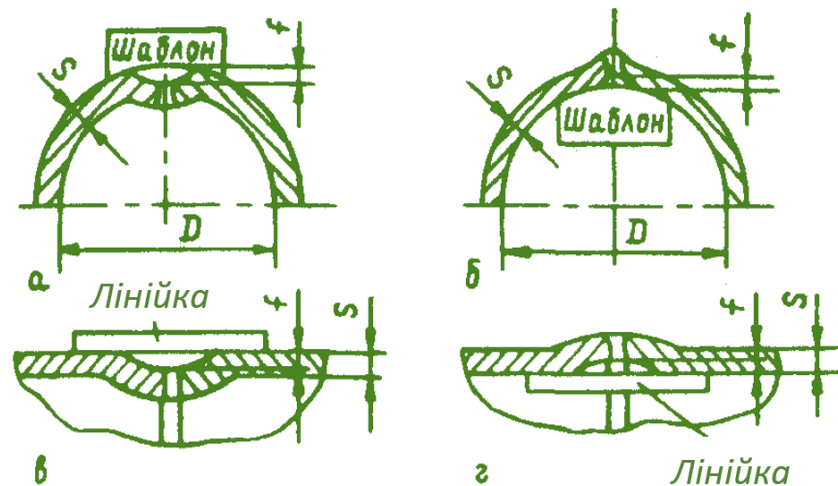


Рис. 1.4- Контроль відведення кромки

Таблиця 1.5 – Максимально допустимі відхилення крайок [6]

Максимальне відхилення f кромки в стикових зварних з'єднаннях, мм				
обичайок	днищ вигнутих		конічних днищ	
Незалежно від D	D < 5000 мм	D > 5000 мм	D < 2000 мм	D > 2000 мм
5	6	8	5	7

При зварюванні обичайок і труб, а також при приварюванні днищ до обичайок слід використовувати стикові шви з повним проплавленням.

Допускається застосування кутових і таврових швів при приварюванні таких елементів, як штуцери, люки, труби, трубні грати, плоскі днища та фланці. Напусткові зварні шви можуть використовуватись для кріплення зміцнювальних кілець і опорних елементів. Кутові і таврові шви з неповним проплавленням не допускаються в наступних випадках:

- ✓ у посудинах 1, 2, 3-ї груп при діаметрі отвору понад 120 мм, а в посудинах 4-ї та 5а груп – понад 275 мм;
- ✓ у посудинах 1–5а груп із низьколегованих марганцевистих або марганцевокремнієвих сталей при температурі стінки нижче -30°C без термообробки або нижче -40°C із термообробкою;
- ✓ у посудинах усіх груп, які працюють у середовищах, що спричиняють корозійне розтріскування, незалежно від діаметра патрубка.

Зварні шви посудин повинні бути розташовані так, щоб забезпечити можливість їх візуального огляду, контролю якості неруйнівними методами (ультразвуковим, радіографічним тощо) та усунення дефектів. У посудинах:

- ✓ 1–5а груп допускається не більше одного шва, доступного для огляду тільки з одного боку;
- ✓ 5б групи допускається до чотирьох таких швів; теплообмінників допускається до двох швів.

Шви мають виконуватися з проварюванням по всій товщині металу, наприклад, із застосуванням аргонодугового зварювання кореня шва, підкладного кільця чи замкового з'єднання.

Використання підкладних кілець у посудинах 1-ї групи потребує узгодження з розробником або спеціалізованою організацією. Подовжні шви горизонтально встановлених посудин слід розташовувати поза центральним кутом 140° нижньої частини корпусу, якщо ця частина недоступна для огляду (має бути зазначено в проекті).

Зварні шви не повинні перекриватися опорами, за винятком кільцевих швів, які можуть бути частково перекриті за умови контролю перекритої ділянки методом радіографії чи ультразвукового контролю. Відстань між

подовжнім швом корпусу і швом приварювання опори має становити: не менше $0,35 \pi D^3$ для посудин без термообробки; відповідно до норм для термооброблених посудин. Відстань між краєм шва приварювання деталей і найближчим швом корпусу повинна бути не менше товщини стінки корпусу, але не менше 20 мм. Для термооброблених посудин із вуглецевих і низьколегованих сталей ця відстань має бути не менше 20 мм незалежно від товщини стінки. Перетин стикових швів корпусу кутовими швами внутрішніх і зовнішніх елементів допускається лише за умови повного контролю перекритої ділянки. При приварюванні кілець жорсткості до обичайки загальна довжина зварного шва з кожного боку кільця повинна становити не менше половини довжини кола. Поздовжні шви суміжних обичайок і шви днищ у посудинах 1–4-ї груп мають бути зміщені на відстань, рівну потрійній товщині найбільш товстого елемента, але не менше 100 мм. У разі роботи посудини під тиском до 1,6 МПа та температурою до 400 °С допускається менше зміщення, якщо шви виконуються автоматичним або електрошлаковим зварюванням і проходять 100% контроль.

При зварюванні елементів різної товщини слід передбачити плавний перехід шляхом зменшення товщини більш товстого елемента, при цьому кут скосу не повинен перевищувати 20°. Якщо різниця в товщині не перевищує 30% товщини тоншого елемента, але не більше 5 мм, стоншення можна не виконувати.

Форма та розміри зварних швів мають відповідати стандартам або кресленням. Допустимі відхилення в розмірах валика (ширини, висоти) не повинні перевищувати 30% від нормативних значень.

Для корозійного захисту елементів посудин способом наплавлення товщина шару після обробки повинна відповідати проекту. Для посудин із корозійностійких сталей зняття посилення зварних швів допускається за наявності відповідних вказівок у проекті.

Зварні з'єднання сталей різних класів (перлітових і аустенітних) допускаються за умови, що товщина матеріалу в зоні зварювання не

перевищує 36 мм для вуглецевих сталей і 30 мм для марганцевокремнієвих сталей, а також якщо робоче середовище не спричиняє корозійного розтріскування. Технологія зварювання та контроль якості швів із різномірних сталей мають відповідати РТМ 26-298 і РТМ 26-378 [6].

Геометричні параметри поверхонь повинні вимірюватися за допомогою засобів, що забезпечують відхилення не більше 30% від встановленого допуску на виготовлення. Розміри посудин слід визначати шляхом підсумовування розмірів складальних одиниць, що входять в них, і деталей. Контроль якості поверхонь, що знижують якість і погіршують товарний вид, повинен проводитися шляхом візуального огляду.

Обов'язкова перевірка наявності розташування клейм на зварних швах і маркування на готовій посудині (складальних одиницях, що самостійно поставляються, і деталях) повинна здійснюватися візуальним оглядом. Контроль якості зварних з'єднань слід проводити наступними методами:

- а) візуальним оглядом і виміром;
- б) механічними випробуваннями;
- в) випробуванням на стійкість проти міжкристалічної корозії;
- г) металографічними дослідженнями;
- д) стилоскопіруванням;
- е) ультразвуковою дефектоскопією;
- є) радіографією;
- ж) кольоровою або магнітопорошковою дефектоскопією;
- з) іншими методами, передбаченими в проекті.

Остаточний контроль якості зварних з'єднань посудин, що піддаються термічній обробці, повинен проводитися після термічної обробки.

Для зварних з'єднань посудини з низьколегованих марганцевих, марганцевокремнієвих сталей або двошарових сталей з основним шаром з цих сталей, що піддаються в процесі виготовлення нормалізації або загартуванню з відпусткою, механічні випробування і металографічні

дослідження допускається проводити до остаточної термічної обробки (високої відпустки).

В процесі виготовлення складальних одиниць і деталей необхідно перевіряти:

- відповідність стану і якості зварюваних складальних одиниць і деталей і зварювальних матеріалів вимогам стандартів (технічних умов) і проекту;
- відповідність якості підготовки кромок і зборки під зварювання вимогам стандартів і проекту;
- дотримання технологічного процесу зварювання і термічної обробки, розроблених відповідно до вимог стандартів і проекту [5].

1.3 Аналіз існуючого технологічного процесу

Процес виготовлення корпусу теплообмінника здійснюють в наступній послідовності виконання технологічних операцій:

- 1) підготовки листових заготовок елементів теплообмінника;
- 2) зварювання листів між собою;
- 3) вальцювання листів в обичайку;
- 4) зварювання повздовжнього шва обичайки ;
- 5) збирання та зварювання обичайок та фланців в корпус;
- 6) вирізка отворів в корпусі;
- 7) приварювання штуцерів до корпусу;
- 8) встановлення та зварювання трубного пучка до решітки;
- 9) зварювання опори з листів;
- 10) приварювання опори до корпусу;
- 11) контроль якості корпусу теплообмінника.

У базовій версії технологічного процесу виготовлення корпусу водяного теплообмінника використовується лише механізоване зварювання. Це негативно впливає на якість зварних швів та збільшує тривалість

виготовлення конструкції. Для вирішення цих проблем пропонується замінити механізоване зварювання на автоматизоване, що дозволить скоротити час зварювання, покращити якість зварних швів і зменшити витрати на зварювальні матеріали. Інші етапи технологічного процесу складання та зварювання корпусу залишаються без змін.

В роботі запропоновано рішення, спрямоване на зниження трудомісткості та підвищення продуктивності зварювального процесу. Воно реалізується шляхом переходу від ручного механізованого зварювання в середовищі захисних газів до автоматизованого зварювання з використанням наступних підходів:

- I. Зварювання стикових подовжніх швів обичайок: застосування установки для автоматичного зварювання подовжніх швів обичайок.
- II. Зварювання обичайки з трубною дошкою: використання спеціальної автоматичної установки, а також роликів обертачів.
- III. Зварювання труб до трубної доски: застосування орбітальної зварювальної головки для забезпечення високої точності та рівномірності швів.

Зазначені вдосконалення сприяють:

- підвищенню продуктивності процесу,
- зниженню трудомісткості,
- покращенню якості зварних швів,
- зменшенню виробничих витрат.

Запропоновані зміни забезпечують оптимізацію технологічного процесу та відповідають сучасним вимогам до якості та ефективності зварювання.

2 ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА

2.1. Аналіз сучасного стану впливу мікродефектів на втомну міцність конструкційних матеріалів

Зварювальні технології представляють сучасний і ефективний інструмент для виробництва сталевих вузлів і компонентів, проте їх використання приводить до підвищення ризику деградації властивостей вихідного матеріалу, і наявності дефектів, що можуть впливати на надійність і безпеку зварних конструкцій, особливо у випадках динамічно навантажених і тих, де будь-яка термічна обробка після зварювання не може виконуватись з тих чи інших причин.

Високоміцні низьколеговані конструкційні сталі (ВНКС) усе більше використовуються для зварних конструкцій з високими вимогами у процесі експлуатації. Їхньою перевагою над вуглецевими конструкційними сталями є— розширений діапазон механічних характеристик, покращена міцність і краща зварюваність. Формування локальної, крупнозернистої окрихченої субзони в зоні термічного впливу (ЗТВ) є найбільш серйозна задача, що стосується зварюваності цих сталей.

Дефекти зварювання можуть звичайно бути визначені у реальних зварних з'єднаннях. Вони формуються під час зварювання, під час випробування чи експлуатації. Вплив початкових мікро-дефектів на границю витривалості ЗТВ у основі зварного шва є важливим для розвитку макротріщини у випадку втомних навантажень. Одна з головних причин — концентрація напружень, викликана формою зварного шва. Крупнозерниста ЗТВ (КЗТВ) важлива з точки зору допустимих імпульсних навантажень. Існування локальних крихких зон (ЛКЗ) у КЗТВ полегшує ініціювання крихкого руйнування. Основною проблемою зварного з'єднання є ризик, ініціалізації крихкої тріщини, оскільки у цьому випадку відбувається руйнуванням з'єднання.

Проблема втоми металів досить детально описана в технічній літературі. В даний час вона пов'язана з багатьма технічними вузлами в автомобільній промисловості та багатьох інших скорочує термін служби вузлів і потребує багато коштів.

Упродовж процесу втомного руйнування в металі, вільному від тріщиноподібних дефектів, спочатку мікротріщини формуються, згодом об'єднуються, а потім ростуть до макротріщин. Макротріщини поширюються доти, поки не перевищується циклічна в'язкість руйнування матеріалу, після чого відбувається остаточне руйнування.

При повторному, навантаженні в реальних умовах елементи конструкції, піддаються втомі. Втомні тріщини ініціюються біля сингулярностей, які розміщені на або під поверхнею. Це - подряпини, різкі зміни поперечного перерізу, виступи, включення, окрихчені границі зерен, і т.д. Мікротріщини можуть бути зініційовані зварюванням, термічної обробкою, механічним формуванням і т.д.

Границя втоми багатьох матеріалів визначена не як критичне напруження для зародження тріщин, а як порогове напруження нижче якого не поширюються мікротріщини. Відомо, що реальні машинобудівні матеріали містять різні мікроструктурні дефекти (мікроскопічні дефекти литва, мікропори, неметалічні включення, корозійні виразки.). Усі ці дефекти відрізняються за напрямком і розміром, формою і характеристиками. Проте, деякі теоретичні підходи досить перспективні для кількісного опису ефекту впливу цих малих трьохмірних дефектів на втомну міцність матеріалу. З використанням параметрів, що описують різні геометричні властивості мікродефектів всі наявні достатньо малі дефекти у металах, які класифікуються як мікродефекти, можна вважати однорідними. Тому, малі отвори, надрізи, заглибини, тріщини і подібні штучні мікро-дефекти заданої форми і розміру використовуються для вивчення впливу реальних мікродефектів на границю витривалості металів, в тому числі через їхні втомні напруження.

Відбиток індентора Вікерса — зручний для використання як штучний мікродефект. Це доволі простий і високопродуктивний метод для застосування індентора для розрахункового розміру дефекту на поверхні металевих зразків, а також для лабораторних випробувань чи на реальних конструкціях або натурних зразків. Ефективно регулюючи навантаження можна, одержувати штучні мікродефекти сталого розміру на поверхні матеріалів з різними механічними властивостями. Тільки необхідно знати або певним чином розрахувати твердість. Однак необхідно враховувати, що протягом нанесення відбитка пірамідою, метал пластично деформується. У той час коли прикладне навантаження знаходиться в рівновазі з реакцією деформованого металу в ході втискування піраміди, то після цього, виникають залишкові напруження. Для експериментального визначення границі тримкості при відомому розмірі штучного дефекту цей спосіб занадто консервативний.

Для застосування у багатьох реальних конструкціях при розробці нових елементів та виробів, необхідно виконати велику кількість досліджень і випробувань матеріалів на опір втомі, щоб кваліфіковано гарантувати надійність вузлів у всьому діапазоні експлуатаційних умов.

Деталі виготовлені з металу, містять малі дефекти та включення, які розміщені на поверхні виробу чи близько до неї. Їх розміри і градієнт залежить від якості матеріалу, тобто технології виготовлення. Механічна обробка виробу є іншим джерелом подібних мікродефектів на поверхні. Термічна обробка також може бути джерелом мікродефектів (мікротріщини гартувального зміцнення). Зварювання теж є причиною для росту зерна і формування мікродефектів. Взаємозв'язок цих дефектів є вирішальним для границі витривалості ЗТВ матеріалу як до зварного шва також і для тримкої здатності і зварних конструкцій в цілому .

Втомне руйнування циклічно навантажених зварних металевих вузлів без тріщин починається з ініціювання втомної тріщини, що зароджується з концентратора з максимальною інтенсивністю напружень. Тоді, вже ініційована тріщина поширюється до розміру, що звичайно веде до раптового остаточного

руйнування. Причинами для ініціювання втомної тріщини в стикових зварних швах при більш низькому навантаженні ніж очікуване відповідно до їх фактичного розміру є дефекти зварного шва, особливості форми зварного шва, отримані при зварюванні.

У випадку стикових зварних швів найвищої якості, що не мають ніяких дефектів типу непровару, пористості, і т.д.; напруження звичайно концентрувалися б на границі зовнішньої поверхні зварного шва. Тому, якщо концентрації напружень, що пов'язана з геометрією границі зовнішньої поверхні зварного шва не можна уникнути або значно знизити, ініціювання тріщини на границі зовнішньої поверхні зварного шва буде мати найбільш важливе значення для вантажопідйомності циклічно навантаженої зварної конструкції. Тріщини на границі зовнішньої поверхні зварного шва ініціюються і починають поширюватися в зоні термічного впливу зварного шва (ЗТВ). Ініціювання та концентрація напруження відбувається у твердій і крупнозернистій області. Великі зерна є прямим результатом безпосереднього зварювання. Крім того, залишкові напруження при розтязі присутні на границі зовнішньої поверхні зварного шва та в зварних швах в умовах зварювання. Ці напруження мають також значний вплив на ініціювання втомної тріщини.

До недавня, S-N криві були єдиним інструментом придатним для передбачення втомної довговічності зварних швів; ще раніше, концепції лінійно - пружної механіки руйнування (ЛПМР) застосовувались до зварних швів з макроскопічними тріщиноподібними дефектами. Однак, ЛПМР може значно недооцінювати швидкість поширення коротких тріщин у межах локальної пластичної зони, що утворюється в результаті концентрації напружень. Тому, при визначенні концентрації напружень, очікуваний період зародження тріщин в зварних конструкціях є коротшим ніж той, що передбачається при застосуванні підходів ЛПМР якщо тріщини формуються на границі зовнішньої поверхні зварного шва.

Малими дефектами, що часто присутні на границі зовнішньої поверхні зварного шва є такі як шлак, газові включення, подряпини, ямки, вкорочені

спряження, тріщини, і т.д. Їхня наявність може мати негативний вплив на конструкційну стійкість зварних конструкцій, що піддаються циклічним навантаженням. Втомна міцність полікристалічних металів, що майже не мають тріщин визначається як границя витривалості. Надзвичайно малі тріщини, набагато менші ніж найменші мікроструктурні одиниці металу, тобто, мікроструктурні короткі тріщини, не мають ніякого впливу на втомну міцність. Однак, наявність тріщин, розміри яких співрозмірні мікроструктурним одиницям, тобто, фізично короткі тріщини, втомна міцність зменшується з збільшенням розміру тріщини. Негативний вплив тріщин розмір, яких набагато більший ніж мікроструктурні одиниці металу може бути кількісно оцінено, тому що вони не тільки концентраторами напруження, а також вони можуть також діяти як підсилювачі напруження. ЛПМР може успішно використовуватися для оцінки цього ефекту.

Розмір небезпечно орієнтованих тріщин є критичним параметром для цілісності переважно циклічно навантажених зварних конструкцій, та їх експлуатації вцілому. Концентрація напружень, викликана тріщиною приводить до локальної пластичної деформації матеріалу. Поки розмір цієї зони у вершині тріщини - мізерно мала величина в порівнянні з розміром тріщини, товщина матеріалу і розмір структурного компоненту, область напружень в околі вістря тріщини може бути задовільно описана ЛПМР.

У випадку достовірності підходу ЛПМР, співвідношення між тріщиною і напруженнями визначають за формулою:

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \cdot f(a) ,$$

де K , σ a - коефіцієнт інтенсивності напруження, напруження, і довжина тріщини, приймаючи до уваги, що $f(a)$ - коефіцієнт форми.

Якщо структурна компонента з тріщиною, піддається циклічному навантаженню, амплітуда інтенсивності напруження ΔK , залежить від найбільшого і найменшого значення K . Можливе поширення тріщини викликане прогресуючою втомою матеріалу в вістрі тріщини. Якщо

$\Delta K < \Delta K_{th}$ (ΔK_{th} - порогова амплітуда інтенсивності напруження для поширення втомної тріщини) тріщина не буде поширюватися. Якщо максимум K наближається до інтенсивності напруження для раптового розриву, втомна тріщина пошириться дуже швидко. В області поширення тріщини:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m$$

де C і m - константи, що залежать від матеріалу, в околі вістря тріщини.

Співвідношення між N і a представляє рівень напружень, нижче якого тріщини не повинні рости, якщо припущення ЛПМР мають силу.

$$\Delta\sigma = \frac{\Delta K_{th}}{f(a) \cdot \sqrt{\pi a}}$$

Підходи ЛПМР можна застосовувати тільки для довгих тріщин, а не для коротких.

Зварні з'єднання мають вирішальне значення для структурної цілісності в усіх зварних конструкціях через їхню чутливість до тріщин, спричинену неоднорідністю матеріалу (основний метал; зона термічного впливу і метал шва), а також можливі концентрації напружень в випадок недосконалості геометрії [7-9]. Як показано нещодавно, не тільки зварні з'єднання зазвичай супроводжуються дефектами, але часто множинні дефекти відіграють важливу роль [93]. Це було показано навіть для звичайних вуглецевих конструкційних сталей (S235, S275), які досліджували щодо їх поведінки при руйнуванні за наявності тріщин і виявили дещо дивовижні результати [9]. З іншого боку, добре відомо, що сталі HSLA схильні до розтріскування [7-12], що вимагає високої якості зварного з'єднання. В обох випадках невідповідність зварного з'єднання може спричинити руйнування за експлуатаційних навантажень.

Необхідно оцінити вплив однорідних малих штучних дефектів, типу відбитку Вікерса, на втомну міцність крупного зерна ЗТВ в умовах концентрації напружень. Штучний дефект вважається малий, якщо його розмір співрозмірний з розміром зерна. У ЗТВ близько до зварного шва, тобто на

зовнішній границі зварного шва, зерно більш крупне ніж де-небудь в околі. Через великі мікроструктурні одиниці у крупному зерні ЗТВ великі дефекти є малими у мікроструктурному змісті.

Результатом індукування відбитку Вікерса є не тільки утворення заглибини, але також і області залишкового напруження через релаксацію матеріалу після зняття навантаження. Існуючі стискаючі зусилля сповільнюють ініціювання втомної тріщини, і експериментальні результати достатньо оптимістичні.

2.2 Методика дослідження впливу мікроефектів на втомну міцність конструкційних матеріалів

Для дослідження використовувалась сталь 21Х2НМФА, хімічний склад і механічні властивості якої представлені в розділі 1.

Відомо, що концентрація напружень у зварних виробках з'являється у крупному зерні (КЗ) ЗТВ. На рис. 2.1 представлено умову напруженого стану в стиковому зварному з'єднанні з КЗ ЗТВ, який був змодельований для цієї сталі.

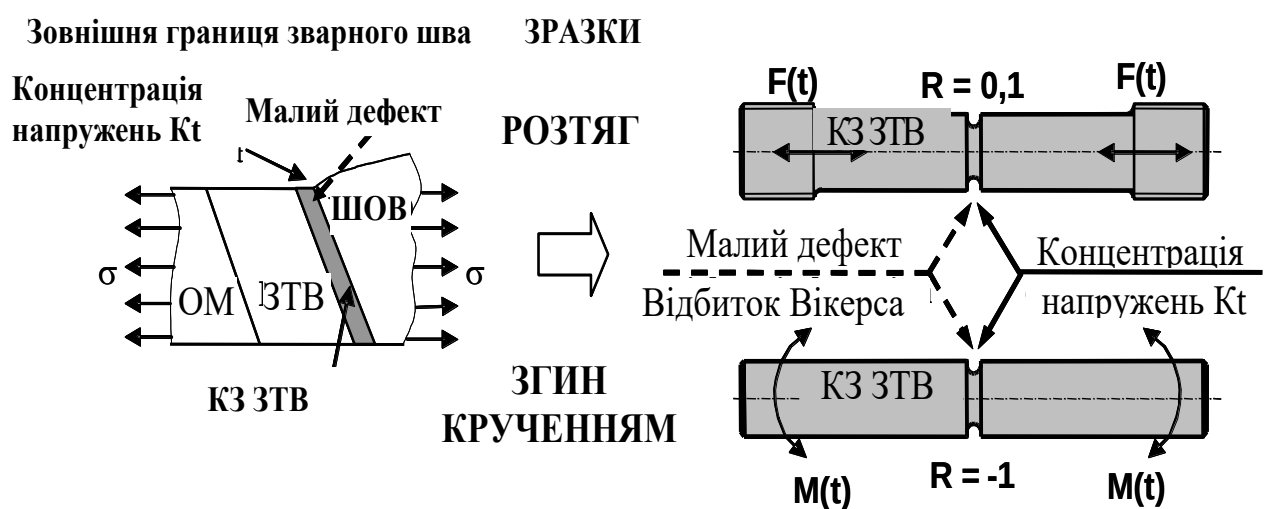


Рис. 2.1. Форма стикового зварного з'єднання і умови на зовнішній границі зварного шва у двох зразках для випробування на втому крупного зерна ЗТВ

Концентрація напружень K_t присутня упродовж навантаження зовнішньої границі зварного шва і обумовлена переміщенням зварного шва. Відповідно до цього концентрації напружень охоплюючої дуги зварного стикового з'єднання можуть досягати приблизно 1,74. Така концентрація напружень була взята до уваги. Зразки були спеціально оброблені на верстаті, щоб мати ту ж саму концентрацію напружень. Канавка з радіусом $R3$ використовувалася для зразків на розтяг і канавки з радіусом $R2$ для зразків на згин із крученням.

Реальна КЗ ЗТВ дуже вузька і тому важка для дослідження. Моделювання КЗ ЗТВ часто використовують, для дослідження і перевірки частини зварного з'єднання. Реєструється термічний цикл протягом реального зварювання (максимальна температура, час охолодження, і т.д.) і потім використовується для КЗ ЗТВ Зразки, що використовувались для моделювання на термоциклічному симуляторі Smitweld. Зразки на згин крученням, використовувалися, тому що модельована КЗ ЗТВ, мікроструктура, існує тільки всередині зразків. Для визначення механічних властивостей необхідна більш велика модельована область КЗ ЗТВ. Для моделювання "КЗ ЗТВ", використовували піч для вирощування зерна і загартовування, для отримання мартенситної мікроструктури (рис. 2.2).

Мікроструктура "КЗ ЗТВ" була підготовлена, використовуючи наступну методику: зразок КЗ ЗТВ був підготовлений на термоциклічному симуляторі.

- Для одержання бажаної якості і розміру зерна була досліджена мікроструктура, що була отримана моделюванням термічного циклу зварювання.

- Ці результати були базою для подальшого моделювання в печах.

- Експериментально досліджували різні теплові режими термообробки у печах, щоб одержати той же самий розмір мартенситного зерна і твердість.

- Мікроструктура для подальшої експериментальної роботи (рис. 2.3) була підготовлена, наступним чином.



Рис. 2.2. КЗ ЗТВ змодельована на термоциклічному симуляторі

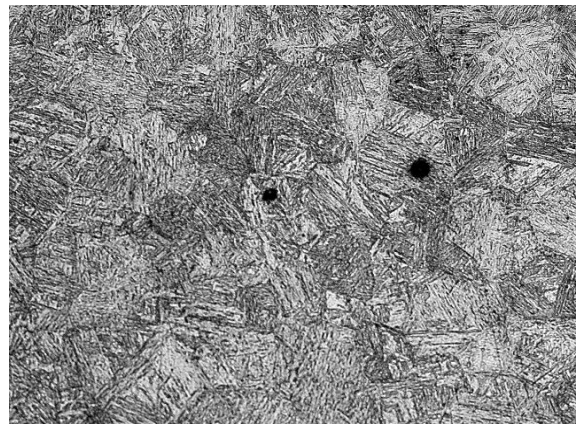


Рис. 2.3. КЗ ЗТВ змодельована з використанням нагріву і гартування

Моделювання “КЗ ЗТВ”, здійснювали в два етапи використовуючи піч і гартування (рис. 2.4.). Перший етап - нагрівання до 1100 °С протягом 3 годин і далі гартування у воді. на цьому етапі вирощували зерно. Швидкості охолодження при гартуванні від 1100 °С було не достатньо, щоб одержати чисту мартенситну мікроструктуру. Другий етап - нагрівання до 870 °С протягом 45 хвилин і загартовування у воді. Це дозволяє одержувати чисту мартенситну мікроструктуру тому, що гартування починається при більш низькій температурі (870°C).

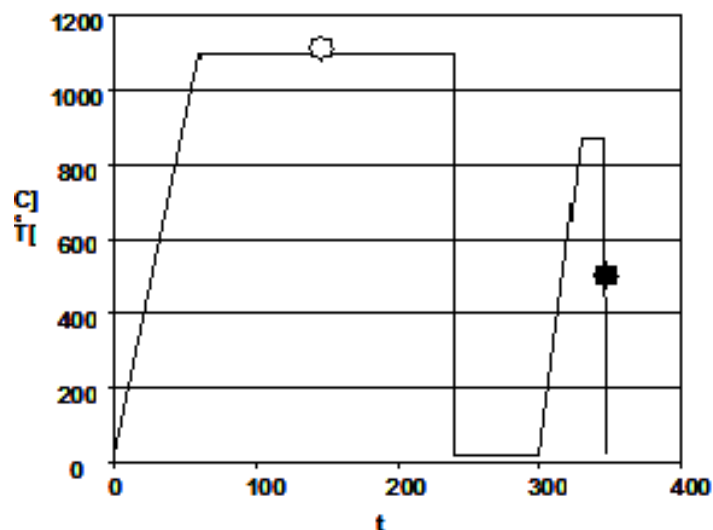


Рис. 2.4. Термічна обробка для моделювання “КЗ ЗТВ”

Для підготовки мікроструктури на зразках використовувалося наступна процедура:

- Термічна обробка для росту зерна (нагрів протягом 3 годин до 1100 С, щоб одержати розмір зерна орієнтовно $\gamma = 200$ нм. Використовувалися циліндричні зразки діаметром 22 мм.
- Загартування у воді (мікроструктура не чистий мартенсит).
- Механічна обробка, для одержання кінцевих розмірів канавки (R3/Ø10,3 мм для зразків на розтяг і R2/12 мм для зразків на згин крученням). Механічна обробка інших частин зразка до Ø 19 мм.
- Нагрів до 870 С протягом 45 хв.
- Загартування у воді (мікроструктура чистий мартенсит).
- Кінцева механічна обробка зразків до Ø 16,3 мм (зразків на розтяг) і Ø 18 мм (зразків на згин крученням). Форма канавки і чистота не змінювалась.

Відбиток алмазної піраміди Вікерса використовувався для підготовки малих дефектів, що є співрозмірними розміру зерен “КЗ ЗТВ”. Якщо дефект наноситься після другого гартування, необхідне навантаження 100 Н, щоб одержати дефект із довжиною 200 нм. Зразки з таким типом змодельованого дефекту відповідають умові з існуючими залишковими напруженнями. Твердість після першого гартування більш низька ніж після другого гартування. Причиною є мікроструктура. Якщо дефект змодельований перед другим гартуванням, для отримання того самого розміру дефекту необхідне менше навантаження. Зразки з таким типом дефекту відповідають умові без залишкових напружень.

Ці умови використовувалися, для вивчення впливу наведених залишкових напружень, на втомну міцність. У зразках з існуючими залишковими напруженнями стискаючі залишкові напруження наведені нижче дефекту. Відбиток був виконаний після останнього гартування. У зразках без залишкових напружень вони були усунені повторним нагрівом при гартуванні. Розмір, форма і характеристика розміру штучного дефекту показані на рис. 2.5.

Зразки були виконані з концентратором, щоб забезпечити теоретичну концентрацію напруг $K_t = 1,74$. Втомна міцність була визначена в трьох різних станах: без дефекту (гладка поверхня); з наявним відбитком (із залишковими напруженнями); повне зняття напружень (без залишкових напружень).

Програма дослідження представлена в табл. 2.1. Дослідження втомної міцності “КЗ ЗТВ” з малим дефектом здійснювали на обертально- згинальному верстаті.

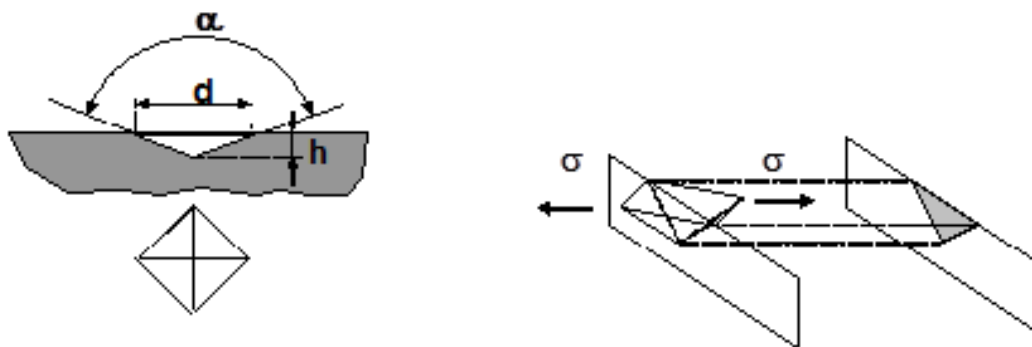


Рис. 2.5. Розмір і характеристика малого дефекту, з використанням відбитка Вікерса

Таблиця 2.1- Програма випробувань на втому

Умова	Зразки	
	Зразки на розтяг	Зразки на згин крученням
без дефекту (гладка поверхня)	●	●
наведений дефект (із залишковими напруженнями)	●	
зняті залишкові напруження (без залишкових напружень)	●	

Для випробування використовувались два типи зразків: на розтяг та згин крученням. Обидва типи представлено на рис.2.6 і 2.7.

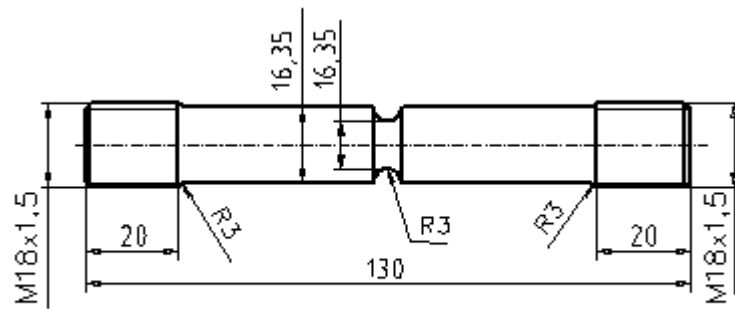


Рис. 2.6. Зразок для втомного випробування при розтягу.

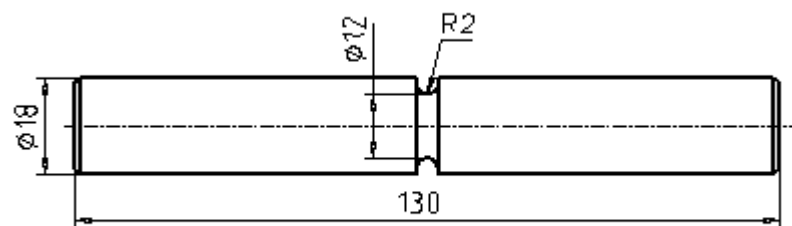


Рис. 2.7. Зразок для випробування на згин крученням .

Зразки були спеціально оброблені на верстаті, щоб мати концентрацію напружень 1,74, оскільки концентрації напружень охоплюючої дуги зварного стикового з'єднання можуть досягати цього рівня. Канавка з радіусом R3 використовувалася для зразків на розтяг і канавки з радіусом R2 для зразків на згин із крученням.

Механічна обробка, для одержати кінцеві розмірів канавки (R3/ $\varnothing$ 10,3 мм для зразків на розтяг і R2/ $\varnothing$ 12 мм для зразків на згин крученням). Механічна обробка інших частин зразка до $\varnothing$ 19 мм.

Кінцева механічна обробка зразків до $\varnothing$ 16.3 мм (зразків на розтяг) і $\varnothing$ 18 мм (зразків на згин крученням). Форма канавки і чистота не мінялись.

2.3 Обґрунтування параметрів термоциклу для моделювання зони термічного впливу

Насамперед реєструється термічний цикл протягом реального зварювання (максимальна температура, час охолодження і т.д.) і потім використовується для КЗ ЗТВ моделювання. Для моделювання використовується термоциклічний симулятор. Для визначення механічних властивостей необхідна більш велика модельована область КЗ ЗТВ. Для моделювання КЗ ЗТВ, використовували піч для вирощування зерна і загартовування мартенситної мікроструктури. Мікроструктура КЗ ЗТВ була підготовлена, використовуючи наступну методику:

- Зразок КЗ ЗТВ був підготовлений на термоциклічному симуляторі.
- Для одержання інформації про якість і розмір зерна була досліджена мікроструктура, що отримана моделюванням термічного циклу зварювання.
- Експериментально досліджували різні теплові режими термообробки у печах, щоб одержати той же самий розмір мартенситного зерна і твердість.

Моделювання КЗ ЗТВ, здійснювали в два етапи використовуючи піч і гартування. Перший етап - нагрівання до 1100 °C протягом 3 годин і далі гартування у воді. на цьому етапі вирощували зерно. Швидкості охолодження при гартуванні від 1100 °C було не достатньо, щоб одержати чисту мартенситну мікроструктуру. Другий етап - нагрівання до 870 °C протягом 45 хвилин і загартовування у воді. Це дозволяє одержувати чисту мартенситну мікроструктуру тому, що гартування починається при більш низькій температурі (870°C).

2.4 Мікроструктура зони термічного впливу

Для підготовки мікроструктури на зразках використовувалося наступна процедура: термічна обробка для росту зерна (нагрів протягом 3 годин до 1100 °C, щоб одержати розмір зерна орієнтовно $\gamma = 200$ нм. Використовувалися

циліндричні зразки діаметром 22 мм. Загартування у воді (мікроструктура не чистий мартенсит).

Дослідження мікроструктури виконано на електронному просвічувальному мікроскопі.

При виготовленні об'єктів електронно-мікроскопічних досліджень із зразків вирізали тонкою дисковою пилою пластини товщиною 0,6...1 мм (рис. 2.8). Пластини шліфували з двох сторін на круглошліфувальному верстаті до товщини 0,3-0,4 мм. Потім з пластин вирізали диски діаметром 3 мм для зручності закріплення об'єкта в тримачі електронного мікроскопа. Диски остаточно шліфували до товщини не більше 0,1 мм, оскільки даний матеріал являється феромагнетиком і при дослідженні об'єктів більшої товщини виникають значні труднощі пов'язані з відхиленням електронного променя в колоні мікроскопа. На всіх етапах механічної обробки використовували охолодження об'єктів дослідження струменем води, а також мінімізували внесення механічних пошкоджень для забезпечення ідентичності мікроструктури об'єкта і масивного зразка.

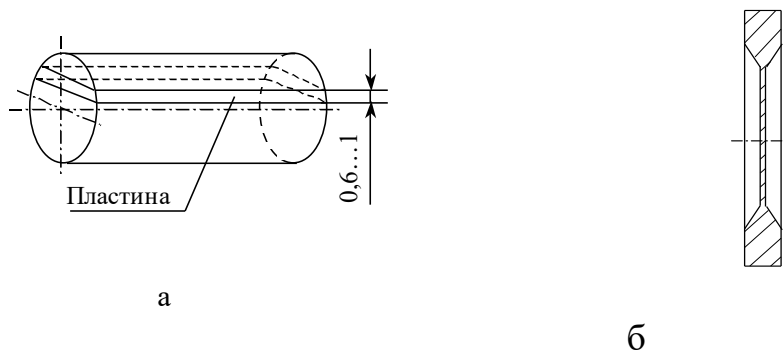


Рис. 2.8. Схема вирізу пластин в поздовжньому напрямку (а); об'єкт електронно-мікроскопічних досліджень (б).

Для отримання тонкої фольги кінцеве стоншення об'єкта здійснювали методом електролітичного полірування. Процес стоншення виконували не по всій поверхні диска, а лише у його центральній частині, зберігаючи більш товсте периферійне кільце, яке захищало тонкий центр від механічних

ушкоджень (див. рис. 2.8, б). Електролітичне полірування проводили за допомогою струминного методу.

Кінцеве стоншення об'єктів зі сталі 21Х2НМФА досягали шляхом струминного електролітичного полірування у розчині, що складається з 10% HClO_4 і 90% CH_3COOH , при напрузі 140 В і струмі 90 мА.

Полірування припиняли коли у фользі утворювався перший дрібний отвір. Відразу після утворення отвору об'єкт промивали в метанолі і підсушували фільтрувальним папером. Вузька смужка матеріалу біля отвору придатна для дослідження в електронному мікроскопі просвічувального типу.

Мікроструктура сталі представляє собою рейковий дислокаційний мартенсит (рис. 2.9 а-г), містить частину мартенситу з виділеннями дрібнодисперсних карбідів (рис. 2.9 д,е), а також з пластинчатими виділеннями цементиту (рис. 2.9 ж,з).

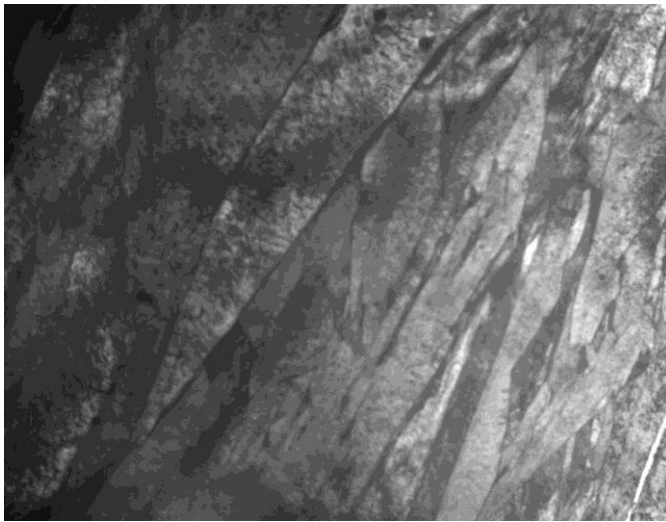
Паралельні рейки мартенситу утворюють пакети мартенситу. Структура пакетів характеризується системою паралельних (рис. 2.9 в,г), а також істотно “ламаних” (рис. 2.9 д,е) рейок різного розміру. Сусідні пакети рейкового дислокаційного мартенситу розорієнтовані між собою, за даними отриманими методом мікродифракції (рис. 2.10), приблизно на $13 \pm 3^\circ$. Товщина рейок мартенситу складає в межах від 0,1 до 2 мкм, причому кількісно переважають рейки розміром 0,2-0,3 мкм. Рейки дислокаційного мартенситу в даній сталі в значній мірі фрагментовані (рис. 2.9 а,б).

На рис. 2.9 в,д,ж видно границі між сусідніми пакетами мартенситу. Видно, що границі не гладкі, а східчасті, що пов'язано з взаємним пристосуванням кристалів, які ростуть.

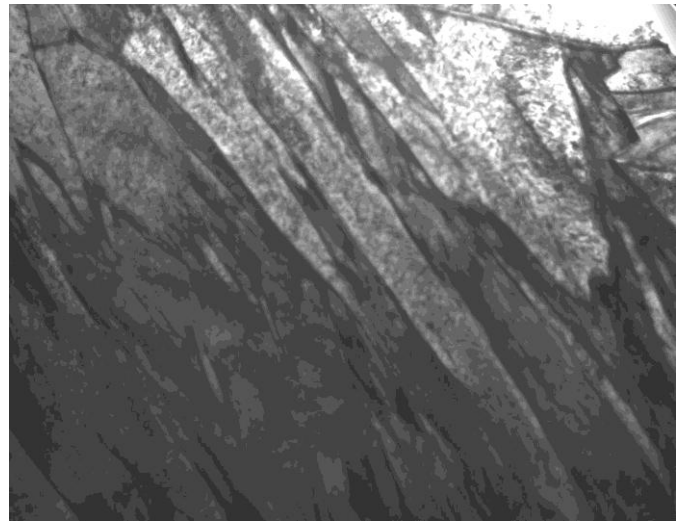
У мартенситних рейках спостерігається висока концентрація дислокацій, які формують хмароподібну структуру та зливаються одна з одною, утруднюючи окреме розрізнення. У зонах із меншою густотою дислокацій на знімках зафіксовано світліші ділянки. В мартенситних рейках також виявлені дрібнодисперсні включення карбідної фази, зокрема цементиту. Через високу

густоту дислокацій контраст між карбідними частинками та дислокаціями стає важко розрізнити.

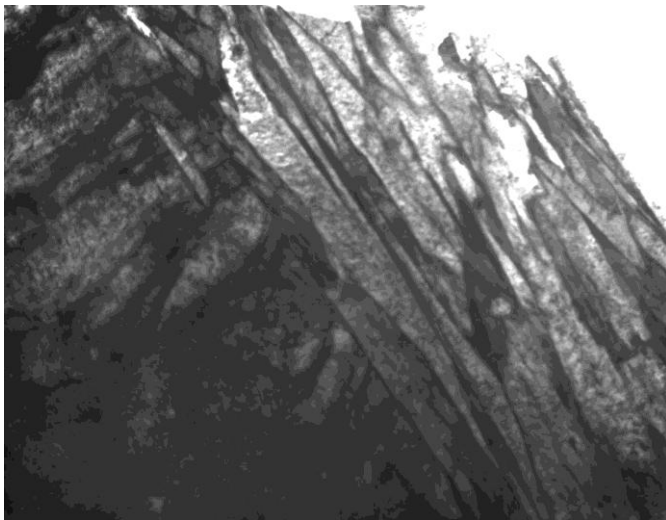
Цементит в мартенситі виділився також у вигляді пластинок під кутом приблизно 60° до довшої вісі мартенситного кристалу (рис. 2.9 ж,з). Причому спостерігаються пластинчаті виділення одночасно в трьох орієнтаціях, що дозволяє ідентифікувати дану структуру, як відпущений мартенсит.



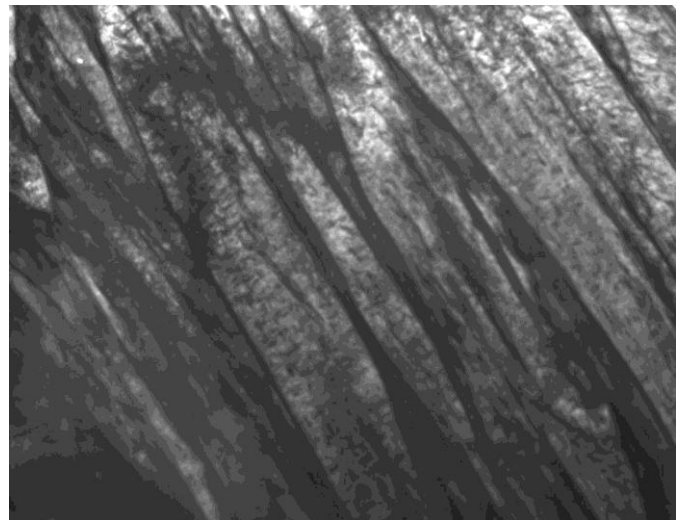
а



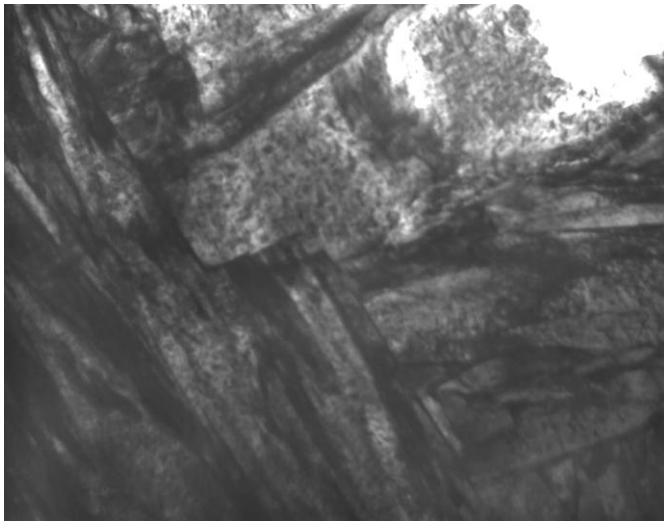
б



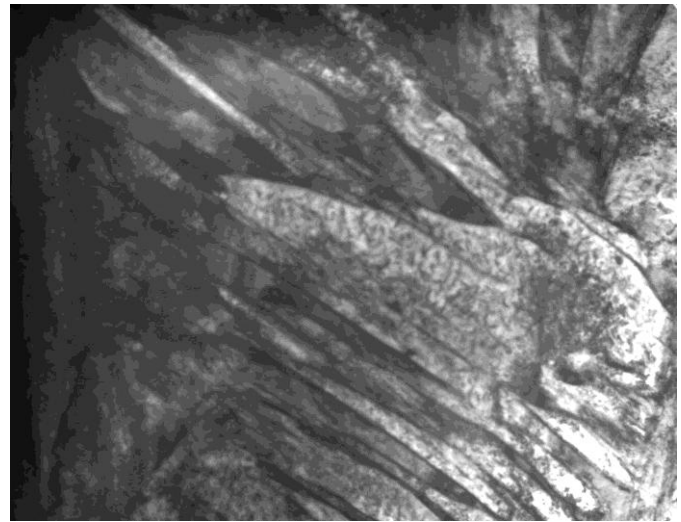
в



г



д



е



ж

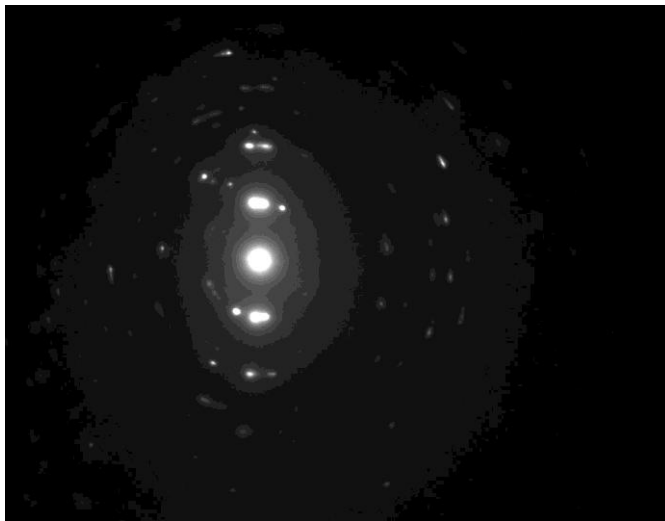


з

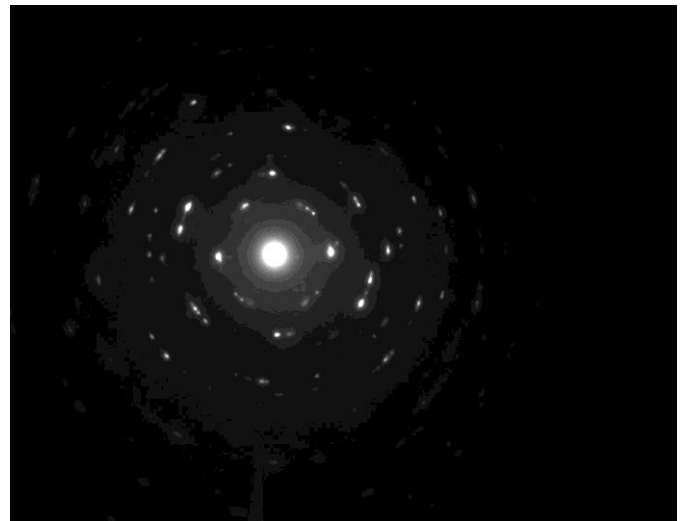
Рис. 2.9 Типова дислокаційна структура сталі 21Х2НМФА: а-г - рейковий дислокаційний мартенсит; д, е – мартенсит з виділеннями дрібнодисперсних карбідів; ж, з - мартенсит з пластинчастими виділеннями цементиту.

Оскільки основна маса дислокацій зосереджена у субграницях дислокаційного рейкового мартенситу, густину дислокацій у малокутових границях дислокаційної структури визначали за допомогою аналізу азимутальної розорієнтації рефлексів на мікродифракційних знімках (див. рис. 2.10). Скалярна густина дислокацій, виміряна методом перерізів, істотно нижча (приблизно 10^{14} м^{-2}) і складна для точного визначення, оскільки окремі

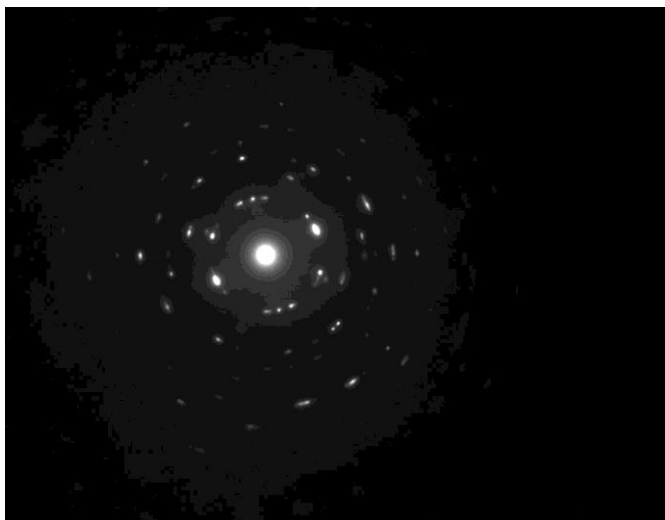
дислокації не розрізняються. Тому аналітично виправданим є зосередження на вимірюванні густини дислокацій саме у малокутових границях.



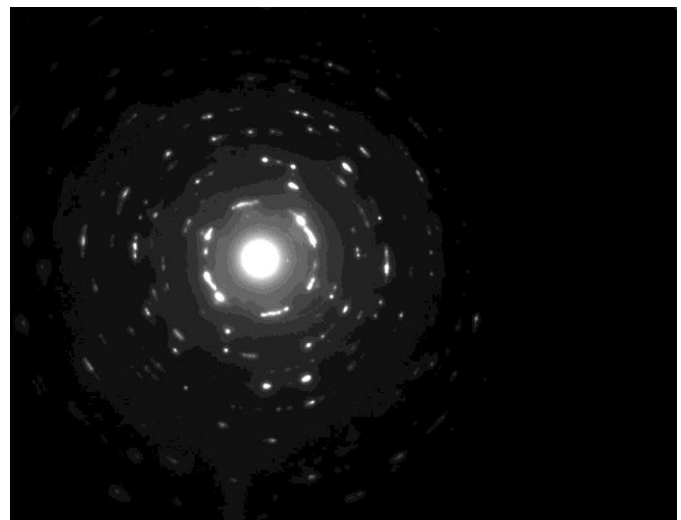
а



б



в



г

Рис. 2.10. Мікродифракційні картини сталі СТ-781

Густину дислокацій з вектором Бюргерса у субграницях дислокаційної структури визначали, виходячи з середньої відстані між субграницями та кутом їх розорієнтації. Цей підхід дозволяє оцінити рівень структурних змін у

матеріалі та визначити механічні напруження, що виникають внаслідок деформаційних процесів на мікрорівні.

$$\rho_{cp} = \frac{K\theta}{bd},$$

Кут розорієнтації малокутової границі визначали на основі аналізу мікродифракційних зображень:

$$\theta = \frac{\Delta r}{R_{hkl}},$$

Густина дислокацій у границях дислокаційного рейкового мартенситу сталі 21Х2НМФА аналізується для оцінки структурних перетворень після термообробки складає $9,1 \pm 2,3 \times 10^{14} \text{ м}^{-2}$.

2.5 Вплив залишкових напружень на втомну міцність

На рис. 2.11 показані результати випробувань на втому на зразках для розтягу. Коефіцієнт асиметрії протягом випробування на втому R був приблизно 0,1. Найвище значення втомної міцності було отримане на гладких циліндричних зразках, без дефекту. Найнижча втомна міцність була отримана на зразках із знятими залишковими напруженнями, шляхом вилучення відбитку Вікерса.

Залишкові стискаючі напруження в зразках з наведеними напруженнями, впливають на зародження тріщин. Фактично, вони перешкоджають зародженню тріщин, і втомні тріщини ініціюються пізніше. Результатом є - вища втомна міцність у порівнянні з втомною міцністю при повному знятті залишкових напружень.

На рис. 2.12 подані результати випробувань на втому на гладких зразках без дефекту, отриманого на обертальному згинальному верстаті. Коефіцієнт асиметрії упродовж випробування на втому R був приблизно -1.

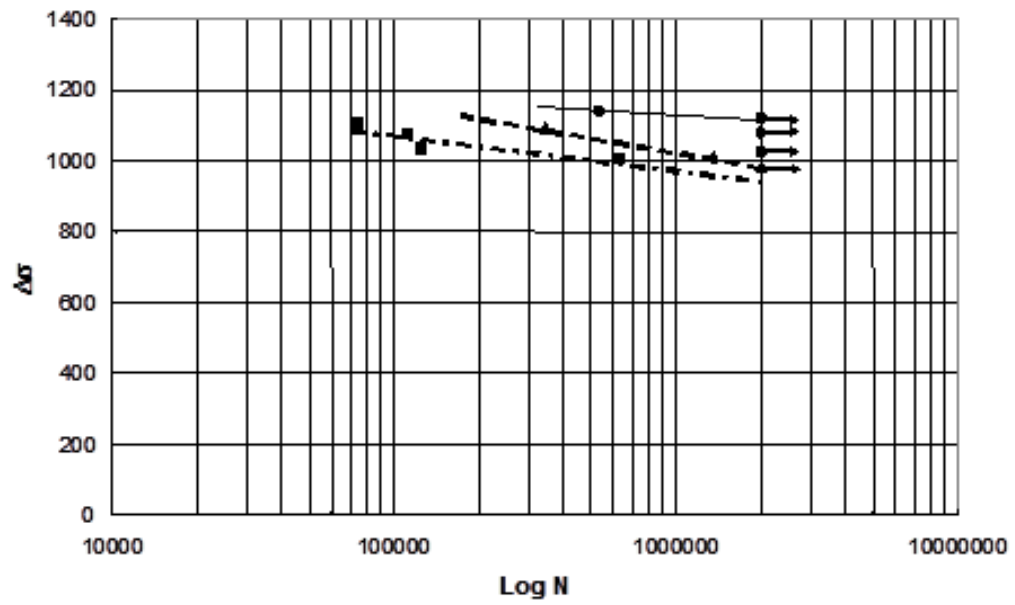


Рис. 2.11. Результати випробувань на втому на зразках для розтягу.

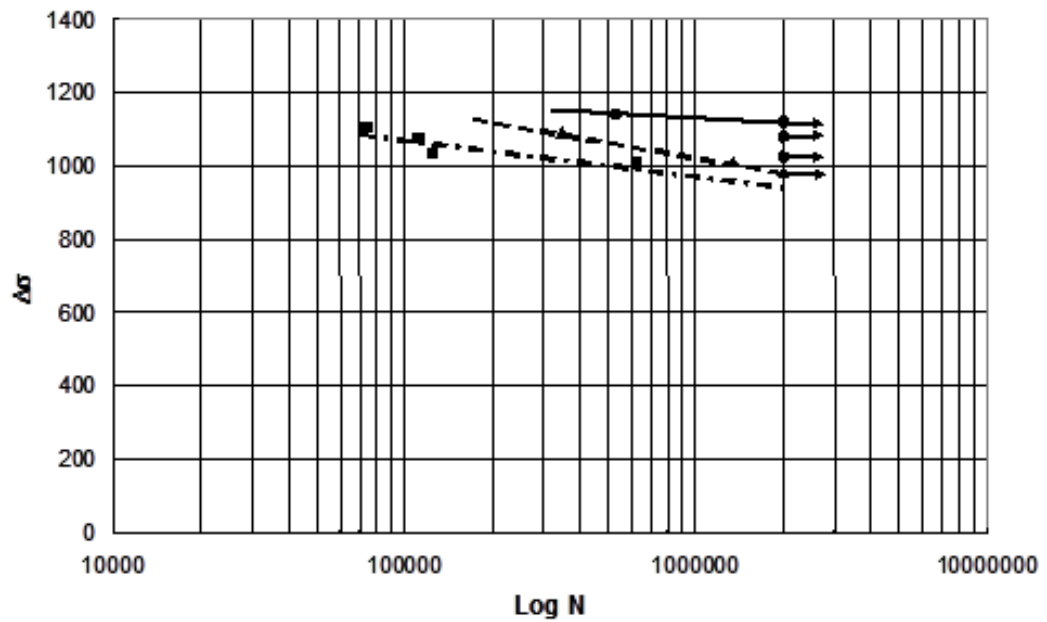


Рис. 2.12. Результати випробувань на втому на зразках згину крученням.

Був оцінений коефіцієнт концентрації напружень відносно до самого дефекту. Результати представлені в таблиці 2.2 і таблиці 2.3. Втомна міцність з наведеними напруженнями знижується на 14 % у порівнянні з зразками без дефекту. Втомна міцність для зразків з знятими напруженнями зменшується більше ніж на 20 %.

Таблиця 2.2 - Результати випробувань на втому при розтягу

Зразки на розтяг $R \sim 0,1$	Втомна міцність σ_d , МПа	Коефіцієнт концентрації напружень дефекту $K_f = \sigma_{dn} / \sigma_d$
без дефекту (гладкий)	1093	1,00
наведені напруження (із залишковими напруженнями)	976	1,11
зняті напруження (без залишкових напружень)	924	1,23

Таблиця 2.3 - Результати випробувань на втому при згині крученням

Зразки для згину крученням $R = -1$	Втомна міцність σ_d , МПа	Коефіцієнт концентрації напружень дефекту $K_f = \sigma_{dn} / \sigma_d$
без дефекту (гладкий)	569	1,00

3 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

3.1 Обґрунтування способу зварювання

У промисловості при виробництві зварних конструкцій широко застосовуються низьковуглецеві низьколеговані сталі. Сумарний вміст легувальних елементів у цих сталях не перевищує 4,0% (без урахування вуглецю), а частка вуглецю становить до 0,25% [13].

Низьколеговані сталі поділяють на кілька типів залежно від введених легувальних елементів: марганцеві, кремнемарганцеві, хромокремнієвонікельмідні тощо. Додавання марганцю збільшує ударну в'язкість і холодоламкість, забезпечуючи добру зварюваність. У порівнянні з іншими низьколегованими сталями, марганцеві сталі забезпечують високу міцність зварних з'єднань при дії змінних та ударних навантажень. Невелика частка міді (0,3–0,4%) у складі підвищує корозійну стійкість сталі, зокрема в атмосферних умовах і в морській воді. Низьколеговані сталі для зварних конструкцій використовуються в гарячекатаному стані. Термічна обробка покращує їх механічні властивості, хоча ці характеристики залежать від товщини прокату. Особливо важливим є те, що термічна обробка дозволяє значно знизити температуру холодоламкості. У зв'язку з цим деякі марки низьколегованих сталей для виробництва зварних конструкцій застосовують після зміцнювальної термообробки.

Зварювання необхідно виконувати без перерв, не допускаючи охолодження шва нижче температури попереднього підігріву, а перед виконанням наступного проходу – нагрівати його понад 200°C.

Зварювання під шаром флюсу виконується на постійному струмі зворотної полярності. Сила струму не повинна перевищувати 800 А, напруга дуги – 40 В, а швидкість зварювання змінюється в межах 13–30 м/год. Одностороннє однопровідне зварювання застосовується для з'єднань товщиною до 8 мм і виконується на сталевій підкладці або флюсовій подушці. Максимальна товщина з'єднань без розділення кромки для двостороннього зварювання становить 20 мм.

При зварюванні низьковуглецевих і легованих сталей у середовищі захисних газів як електрод використовують дріт марок Св-08Г2С, Св-08ХМНФБА, Св-08ХН2Г2СМЮ, Св-10ХГНМАА або порошковий дріт. У суміші газів на основі аргону перевага надається дроту марки Св-08ХН2ГМЮ, який забезпечує високі механічні властивості та холодостійкість швів при міцності сталі до 700 МПа [14-16].

У порівнянні з низьковуглецевими сталями, високолеговані сталі та сплави мають знижений коефіцієнт теплопровідності (до 2 разів) і підвищений коефіцієнт лінійного розширення (до 1,5 разів). Низька теплопровідність сприяє концентрації тепла під час зварювання, що збільшує глибину проплавлення металу. Для досягнення необхідної глибини проплавлення рекомендується зменшувати струм зварювання на 10–20%.

Пори при зварюванні високолегованих сталей виникають через потрапляння водню з покриття електродів, вологого захисного газу або забруднених кромки. Для запобігання цього електроди прокалюють, аргон осушують, а кромки очищають від жиру. Знижена теплопровідність і високий коефіцієнт лінійного розширення спричиняють значне короблення конструкцій під час зварювання. Для зменшення цього ефекту необхідно мінімізувати об'єм наплавленого металу та використовувати зварювання із низьким тепловкладенням, наприклад, у середовищі захисних газів.

Високолеговані сталі характеризуються підвищеним вигоранням легуючих елементів, таких як титан (до 60–80%). Щоб мінімізувати цей ефект, використовують коротку дугу або виконують зварювання в захисних газах. Молібден і ніобій менше схильні до вигорання, тому їх частіше додають у зварювальні дроти.

Вибір оптимального способу зварювання здійснюється на основі аналізу характеристик основного металу, конструктивних особливостей з'єднань та виробничих умов. Ураховуючи ці фактори, визначається метод зварювання, який забезпечує відповідність технічним вимогам і є економічно обґрунтованим.

До розгляду беруться такі способи:

- Ручне дугове зварювання покритим електродом (Е).
- Механізоване та автоматизоване зварювання в середовищі CO_2 (УП).
- Зварювання плавким електродом в інертних газах (ІП).
- Автоматичне зварювання під шаром флюсу (Ф).
- Електрошлакове зварювання (Ш).
- Газополум'яне зварювання (Г).
- Аргонодугове зварювання неплавким електродом (ІН).

Конструкція містить наступні зварні з'єднання:

- ✓ Стикове з'єднання з товщиною металу 12 мм.
- ✓ Таврове з'єднання з товщиною металу 16 мм.

Завдяки хорошій зварюваності матеріалу всі запропоновані методи можуть бути використані. Проте найбільш доцільними є:

- ✓ ручне дугове зварювання (Е);
- ✓ механізоване та автоматизоване зварювання в середовищі CO_2 (УП);
- ✓ автоматичне зварювання під шаром флюсу (Ф);
- ✓ електрошлакове зварювання (Ш);
- ✓ газополум'яне зварювання (Г).

Методи зварювання в інертному середовищі (ІП, ІН) не застосовуються через їхню високу вартість та обмежену економічну ефективність для нелегованих конструкційних сталей.

Для товщини металу 12–16 мм оптимальними є:

- ✓ механізоване та автоматизоване зварювання в середовищі CO_2 (УП);
- ✓ автоматичне зварювання під шаром флюсу (Ф);
- ✓ ручне дугове зварювання покритим електродом (Е).

Газополум'яне зварювання (Г) ефективне лише для металів товщиною до 4 мм, тоді як електрошлакове зварювання (Ш) застосовується для товщини понад 30 мм. Відповідно, ці методи виключаються.

Для зварювання кільцевих швів довжиною 2200 мм, які мають високі вимоги до якості, доцільним є автоматичне зварювання під шаром флюсу, що забезпечує максимальну продуктивність і якість швів.

Переваги автоматичного зварювання під шаром флюсу є:

- I. Підвищення продуктивності праці в 6–12 разів завдяки високим зварювальним струмам і глибині проплавлення.
- II. Зменшення втрат металу через відсутність розбризкування та вигорання.
- III. Висока якість швів, оскільки зварювальна ванна надійно захищена шаром флюсу.
- IV. Механізація процесу зварювання, що покращує умови праці зварників.

Недоліки цього методу включають:

- a) обмеження щодо положення зварювання (лише нижнє, з нахилом до 15°);
- b) складність застосування для коротких швів та монтажних робіт;
- c) потребу в точному збиранні кромок та складному обладнанні.

Через неможливість використання автоматичного зварювання під шаром флюсу для приварювання штуцерів до корпусу, вибирається механізоване зварювання в середовищі CO₂. Для швів довжиною до 1 м застосовується напівавтоматичне зварювання в середовищі вуглекислого газу.

Для приварювання трубного пучка до решітки використовується орбітальне зварювання вольфрамовим електродом в середовищі аргону.

Вибір зварювального дроту - вибираємо зварювальний дріт Св-08ХМНФБА призначений для зварювання низьколегованих сталей. Даний зварювальний дріт підібраний відповідно до хімічного складу матеріалу корпусу теплообмінника і з умов забезпечення необхідних механічних характеристик. Хімічний склад дроту Св-08ХМНФБА наведений в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 - Хімічний склад дроту Св-08ХМНФБА [15,17]

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Mo	V	N	Nb
0.06 - 0.1	0.12 - 0.3	0.35 - 0.6	0.65 - 0.9	до 0.025	до 0.025	1.1 - 1.4	0.8 - 1	0.2 - 0.35	до 0.015	0.1 - 0.23

Вибір флюсу. В якості зварювального флюсу будемо використовувати флюс марки АН-348А. Цей захисний флюс призначений для зварювання низьколегованих сталей. Цей флюс повинен сприяти отриманню металу шва

підвищеної міцності з високими значеннями ударної в'язкості при низьких температурах. Хімічний склад флюсу наведений в табл.3.2.

Таблиця 3.2 - Хімічний склад флюсу АН-348А [15]

Хімічні елементи	Вміст, %
SiO ₂	28...32
MgO	6,5...10,5
CaF ₂	9...13
Al ₂ O ₃	9...13
Fe ₂ O ₃	2,0
MnO	14...18
CaO	13...18
K ₂ O + Na ₂ O	1...2
P	0,05
S	0,05
Температура сушіння	400 °С, 2год

Вибір захисного газу [17]. Для зварювання сталі 21Х2НМФА допускається застосування активного захисного газу – CO₂. Але в нашому випадку краще застосовувати суміш газів, оскільки процес зварювання в CO₂ характеризується крупно крапельним переносом металу шва внаслідок стиснення дуги при дисоціації вуглекислого газу, що значно збільшує розбризкування електродного металу, підвищує лускатість поверхні зварного шва, та погіршує якість металу шва.

Тому нами запропоновано використовувати замість CO₂ суміш 75%Ar+20%CO₂+5%O₂, яка забезпечує дрібно крапельний перенос та вищу якість поверхні зварного шва, що особливо важно для зовнішнього виду конструкції. Окрім зовнішнього вигляду шва ця суміш забезпечує кращі властивості металу шва порівняно з CO₂, оскільки при зварюванні у даній суміші маємо менше окислення елементів як при зварюванні в чистому CO₂.

Спосіб постачання, враховуючи організацію зварювальних робіт, обираємо централізований.

При зварюванні корпусу теплообмінника використовуються наступні зварні з'єднання, а саме зварне стикове з'єднання С21 та зварне таврове з'єднання Т6. Зварні з'єднання С21 зварюються автоматичним зварюванням під флюсом, а Т6 – напівавтоматичним зварюванням в середовищі CO₂ та

аргону. Режими зварювання залежать від способу зварювання, від положення зварювання, від товщини зварюваних елементів і від діаметру дроту.

Розрахунок режимів стикового шва N1 С21 товщиною 12 мм і довжиною 4185 мм ззовні та із середини автоматичним зварюванням, здійснюємо згідно літератури [5] :

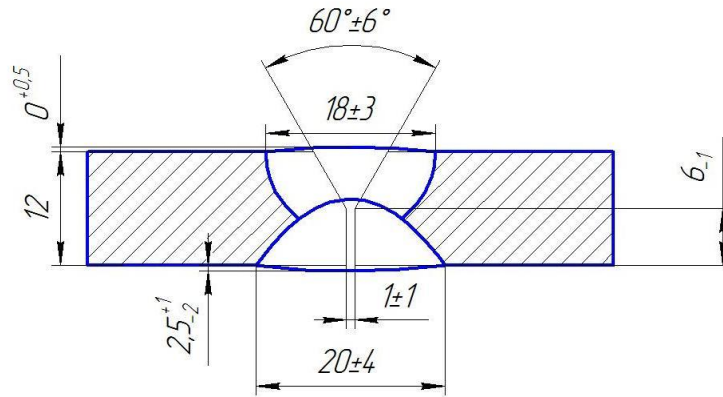


Рис. 3.1- Конструктивні розміри шва N1

$$H = \frac{s}{2} + 2 \text{ , мм} \quad (3.1)$$

$$H = \frac{12}{2} + 1 = 7 \text{ мм}$$

$$F_H = F_1 + F_2 \text{ , мм} \quad (3.2)$$

$$F_1 = 1/2 \times e \times b \text{ ,} \quad (3.3)$$

$$F_2 = 1/2 \times e_1 \times b, \quad (3.4)$$

Підставимо дані отримаємо:

$$F_1 = 1/2 \times 18 \times 6 = 54 \text{ мм}^2$$

$$F_2 = 1/2 \times 20 \times 6 = 60 \text{ мм}^2$$

$$F_H = 54 + 60 = 114 \text{ мм}^2$$

$$I_{3B} = \frac{H}{K_H} \times 100 \text{ , А} \quad (3.5)$$

де, $K_p = 1,1$

$$I_{3B} = \frac{7}{1,1} \times 100 = 640, A$$

$$d_e = 1,13 \times \sqrt{\frac{I_{3B}}{j}}, \text{ мм} \quad (3.6)$$

де, $j = 70 A/\text{мм}^2$.

$$d_e = 1,13 \times \sqrt{\frac{640}{70}} = 3,4 \text{ мм}$$

Приймаємо $d_e = 4 \text{ мм}$.

$$U_d = 20 + \frac{50 \times 10^{-3}}{\sqrt{d_e}} \times I_{3B} + 1, B \quad (3.7)$$

$$U_d = 20 + \frac{50 \times 10^{-3}}{\sqrt{4}} \times 640 + 1 = 37 B$$

$$V_{3B} = \frac{A}{I_{3B}}, \text{ м/год} \quad (3.8)$$

де, $A = 20 \times 10^3 A \cdot \text{м/год}$ для діаметру дроту 4мм.

$$V_{3B} = \frac{20 \times 10^3}{640} = 31 \text{ м/год}$$

$$V_{п.д.} = \frac{4 \times \alpha_n \times I_{3B}}{\pi \times d_e \times j}, \frac{\text{м}}{\text{год}} \quad (3.9)$$

де, $\alpha_n = 16 \text{ г/год} \cdot A$.

$$V_{п.д.} = \frac{4 \times 16 \times 640}{3,14 \times 4 \times 70} = 47 \text{ м/год}$$

$$t = \frac{L}{V_{зв}} \text{ год} \quad (3.10)$$

де, $L = 4,185 \text{ м}$.

$$t = \frac{4,185}{25} = 0,14 \text{ год} = 9 \text{ хв}$$

Маса наплавленого металу:

$$G_{\text{н}} = F_{\text{н}} \times L \times \gamma, \text{ кг} \quad (3.11)$$

де, $\gamma = 7850 \text{ кг/м}^3$

$$G_{\text{н}} = 114 \times 10^{-6} \times 4,185 \times 7850 = 3,75 \text{ кг}$$

Витрата електроенергії:

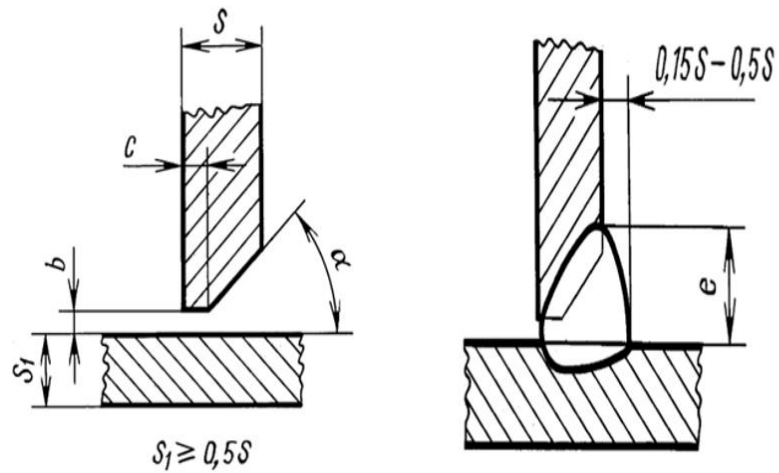
$$Q_e = \frac{U_{\text{д}}}{\alpha_{\text{н}} \times \eta \times K_u} \times G_{\text{н}} \text{ кВт} \cdot \text{год} \quad (3.12)$$

де, $\eta = 0,85$ – ККД для азф;

$K_u = 0,5$.

$$Q_e = \frac{37}{16 \times 0,85 \times 0,5} \times 3,75 = 20,4 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Розрахунок режимів таврового з'єднання N2 Т6 товщиною 12 мм механізованим зварюванням в середовищі CO₂ 25% та аргону [5]:



$$S=12 \text{ мм}, c=2 \text{ мм}, b=0 \text{ мм}, \alpha=45^\circ, e=20 \text{ мм}$$

Рис. 3.2- Конструктивні розміри шва Т6

$$F_H = 1/2 \times 12 \times 16 = 96 \text{ мм}^2$$

Таблиця 3.3. – Залежність діаметру дроту від товщини листа [5]

Товщина листа, мм	1- 2	3-6	6-24 і більше
Діаметр електродного дроту d_e , мм	0,8-1,0	1,2-1,6	2,0

Згідно таблиці 3.4 приймаємо $d_e = 2 \text{ мм}$.

$$I_{3B} = \frac{\pi \cdot d_e^2 \cdot a}{4} \quad (3.13)$$

де, $a = 110 - 130 \text{ А/мм}^2$.

$$I_{3B} = \frac{3,14 \cdot 2^2 \cdot 120}{4} = 380 \text{ А}$$

Таблиця 3.4 – Залежність напруги від сили струму [5]

Сила зварювального струму, А	50÷60	90÷100	150 ÷160	220 ÷240	280÷300	360÷380	430 ÷450
Напруга дуги, В	17-28	19-20	21-22	25-27	28-30	30-32	32-34
Витрата газу, л/хв	8-10	8-10	9-10	15-16	15-16	18-20	18-2

Напруга на дузі вибирається із таблиці 3.4, $U_d = 32$ В.

$$\alpha_p = 3,0 + 0,08 \cdot \frac{I_{3B}}{d_e} \quad (3.14)$$

$$\alpha_p = 3,0 + 0,08 \cdot \frac{380}{2} = 18,2 \text{ г/А} \cdot \text{год}$$

$$V_{пд} = \frac{4 \cdot 18,2 \cdot 380}{3,14 \cdot 2^2 \cdot 7,8} = 282 \text{ м/год}$$

$$V_{3B} = \frac{\alpha_n \cdot I_{3B}}{100 \cdot F_H \cdot \rho} \quad (3.15)$$

$$\alpha_n = \alpha_p \cdot (1 - \Psi) \quad (3.16)$$

де, $\Psi = 0,1 - 0,15$;

F_H – при зварюванні в CO_2 приймається рівним $0,3 - 0,7 \text{ см}_2$.

$$\alpha_n = 18,2 \cdot (1 - 0,15) = 15,5 \text{ г/А} \cdot \text{год}$$

$$V_{3B} = \frac{15,5 \cdot 380}{100 \cdot 0,5 \cdot 7,8} = 15,1 \text{ м/год}$$

$$G_H = F_{3B} \cdot l \cdot \rho \quad (3.17)$$

$$G_H = 1,04 \cdot 73 \cdot 7,8 = 592 \text{ г}$$

$$t_0 = \frac{G_H}{I_{CB} \cdot \alpha_H} \quad (3.18)$$

$$t_0 = \frac{592}{380 \cdot 15,5} = 0,1 \text{ год}$$

$$T = \frac{t_0}{K_{\Pi}} \quad (3.19)$$

де, $k_{\Pi} = 0,6 \div 0,57$.

$$T = \frac{0,1}{0,57} = 0,17 \text{ год}$$

$$A = \frac{U_{\Delta} \cdot I_{CB}}{\eta \cdot 1000} \cdot t_0 + W_0 \cdot (T - t_0) \quad (3.20)$$

На постійному струмі $W_0 = 2,0 \div 3,0$ кВт, на змінному $0,2 \div 0,4$ кВт.

$$A = \frac{32 \cdot 380}{0,7 \cdot 1000} \cdot 0,1 + 3 \cdot (0,17 - 0,1) = 2 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Режими зварювання трубного пучка до трубної решітки орбітальним зварюванням вибираємо з довідника. Діаметр трубок 20 мм, товщина стінки 2 мм. Кількість трубок 498 штук [9].

Таблиця 3.5 - Режими зварювання трубного пучка і решітки [15]

Назва параметру	Значення параметру
Процес зварювання	TIG
Зварювальний струм, А	86
Діаметр вольфрамового електроду, мм	1,6
Швидкість обертання, об/хв	8
Швидкість подачі дроту, см/хв	152
Діаметр присадкового дроту, мм	0,8
Напруга на дузі, В	32
Швидкість зварювання, м/год	28

Режими зварювання для виготовлення корпусу теплообмінника подані в таблиці 3.6

Таблиця 3.6 – Режими зварювання корпусу кожухотрубного теплообмінника

Номер шва	Сила струму $I_{зв}$, А	Напруга на дузі U_d , В	Діаметр дроту d_e , мм	Швидкість зварювання $V_{зв}$, м/ГОД	Швидкість подачі дроту $V_{п.д.}$, м/ГОД
N_1	640	37	4	31	47
N_2	380	32	2	15,1	282
N_3	86	32	0,8	28	152

При виготовленні кожухотрубного теплообмінника необхідно виконати зварювання таких елементів, як обичайка, штуцери та трубний пучок. Вибір зварювального обладнання здійснюється з урахуванням габаритів деталей і методу зварювання, оскільки саме правильний підбір забезпечує високу якість зварних швів і оптимізацію витрат на обладнання.

Основними критеріями вибору є технічні характеристики обладнання, що відповідають заданим режимам зварювання. Важливим фактором також є тривалість робочого циклу апарата (тривалість включення), від якої залежить продуктивність і ефективність виробництва [16].

Оскільки процес зварювання теплообмінника буде складатися декілька етапів, тому для виконання кожного із етапів будемо застосовувати різне обладнання.

Так для зварювання кожуха теплообмінника, а саме зварювання зовнішніх швів обичайки застосовуємо установку система SWC (рис. 3.3.

Установка SWC призначена для виконання поздовжніх зварних стикових швів обичайок круглої або прямокутної форми. У стандартній комплектації установка дозволяє зварювати обичайки товщиною від 0,5 до 15 мм та довжиною від 500 до 6000 мм. Зварювання може виконуватися одним із наступних методів:

- ✓ MIG/MAG (зварювання в середовищі активних або інертних газів),
- ✓ TIG (аргонодугове зварювання),
- ✓ PLASMA (плазмове зварювання),
- ✓ SAW (зварювання під флюсом).

Технічні характеристики установки SWC-4 наведено в таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Технічні дані установки SWC-4 [18]

Модель	Довжина шва, мм	Товщина стінки, мм	Хв. діаметр заготовки, мм	Макс. діаметр заготовки, мм*	Швидкість ходу каретки, мм/хв	ДхШхВ, мм		
SW 4.0	4100	0,5-8,0	340	1000	0-18000	5300	1200	2100



Рис. 3.3 - Установка SWC-4 [18]

Для зварювання внутрішніх швів обичайки використовується установка SLIUP (рис. 3.4). Установка SLIUP є сучасним зварювальним обладнанням, яке використовується для виконання стикових і поздовжніх швів. Вона забезпечує високу якість зварювання завдяки широкому діапазону налаштувань і технічних можливостей. Установка SLIUP є універсальним рішенням для промислового зварювання, дозволяючи забезпечити високу якість зварних з'єднань при мінімізації витрат часу та ресурсів. Технічні дані установки дозволяють зварювати товщини від 0,5 до 12 мм довжиною до 6000 мм, внутрішнім діаметром мінімум 170 мм.

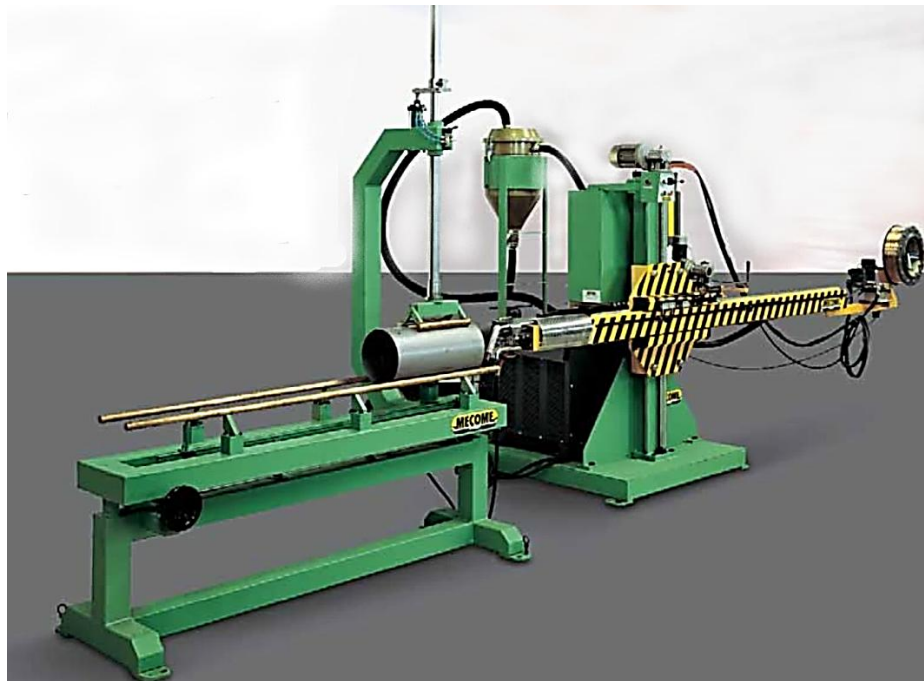


Рис. 3.4 - Зварювальна установка SLIUP [18]

Для приварювання фланців застосовуємо автоматизовану зварювальну установку (рис. 3.5) (табл.3.8).



Рис. 3.5 - Автоматизована установка для приварювання фланців [19]

Таблица 3.8 – Технічна характеристика установки [19]

Діаметр труби	159 мм- 830 мм
Довжина труби	2000 мм-6000 мм
Швидкість зварювання	0.2-2об/хв
Потужність двигуна змінного струму	0.75 кВт
Повітряний тиск	4бар-6бар
Джерело зварювального живлення	MIG 500A
Споживання захисного газу	15 л/хв

Дана установка укомплектовується зварювальними роботами та роликовим обертачем.

Для приварювання патрубків до кожуха теплообмінника застосовуємо автоматичну установку для приварювання штуцерів і патрубків (рис. 3.6) (табл. 3.9).



Рис. 3.6 – Установка для приварювання патрубків і штуцерів [18]

Таблиця 3.9 – Основні дані установки [18]

Швидкість обертання	1-10 об/хв, безступеневе регулювання
Потужність приводу	0.37 кВт
Довжина обичайки	500-10 000 мм
Діаметр обичайки	300-900 мм

Для з'єднання трубного пучка з трубною решіткою використовується технологія орбітального зварювання. Цей процес виконується за допомогою установки PIPEMASTER 515 (рис. 3.7), яка забезпечує значну економію часу та мінімізує вплив людського фактора на якість зварних з'єднань [20]. Технічні характеристики установки наведені в табл. 3.10.

PIPEMASTER 515 — це високопродуктивне джерело живлення, розроблене для гарантованої точності та стабільності параметрів зварювального процесу. Завдяки вбудованому перемикачу система миттєво припиняє роботу при збої або припиненні подачі газу в пальник, що підвищує безпеку та надійність під час експлуатації. Упроваджені цифрові технології усувають необхідність у періодичному калібруванні зварювальної головки: навіть за тривалого використання швидкість двигунів та вихідні характеристики залишаються точними та незмінними, незалежно від зносу обладнання чи умов навколишнього середовища. Ба більше, оператор має

змогу оперативно замінювати зварювальні головки без зайвих затрат часу на додаткові налаштування, що суттєво підвищує ефективність виробничого процесу.

Таблиця 3.10- Технічна характеристика установки [20]

Найменування параметру	Значення параметру
Процес зварювання	GTAW
Діаметри вварювальних труб	від 10,0 до 140,2 мм
Функції голівки	Обертання пальника, подача присадного дроту, електронний контроль за довжиною дуги
Зварювальний струм на виході	до 200 А
Напруга живлення	200-400 В, АС (автовольтаж), 1 або 3 фази
Потужність джерела	4,0 кВа
Частота	50/60 Гц



Рис. 3.7- Установка PIPEMASTER 515 [13]

3.2 Опис технологічного процесу

Виготовлення корпусу теплообмінника включає виконання низки технологічних операцій, що забезпечують його точність, міцність і герметичність.

Послідовність виконання техпроцесу є наступна:

I. Виправлення, різання та очищення листового прокату. Листи металу піддаються виправленню на прокатних машинах для усунення деформацій. Для реалізації даної операції застосовують машину Bendmak BPSM (рис. 3.8). Після виправлення нерівностей листового прокату проводять розкрій на необхідні заготовки за допомогою лазерного різання. Це реалізують за допомогою установки Mitsubishi ML3015eX – S (рис. 3.9).



Рис. 3.9 - Машина Bendmak BPSM [18]



Рис. 3.9 Установка Mitsubishi ML3015eX – S [18]

Після виконання операцій різання листового прокату на заготовки вони поступають на установку для дробоструменевого очищення, а також очищення торців листової заготовки та при необхідності розроблення кромки.

II. Вальцювання листів в обичайку. Листи згинають на вальцювальних верстатах для отримання циліндричної форми обичайки. Це здійснюють із застосуванням вальцювального верстату OHS 4070x400 OSTAS (рис. 3.10).



Рис. 3.10 - Вальцювальний верстат OHS 4070x400 OSTAS [18]

III. Зварювання поздовжнього шва обичайки. Перед початком виконання зварювальних операцій проводять складання поздовжнього стику у спеціалізованій установці, де встановлюють необхідний зазор між кромками та забезпечують симетричність торців обичайки. Після цього складена обичайка поступає на установку SWC де зварюється зовнішній поздовжній шов (див. рис. 3.3). Дана установка розроблена для зварювання поздовжніх стиків обичайок із товщиною листів до 12 мм. Для забезпечення точності та стабільності процесу корпус обичайки фіксується на рамі стану за допомогою пневматичних притискачів, які усувають сили попереднього розтягу кромки, що зварюються. Після закріплення обичайки проводиться автоматизоване зварювання (рис. 3.11).



Рис. 3.11 – Зварювання стика

Після зварювання зовнішнього стика кожуха проводять зварювання його внутрішньої сторони із застосуванням установки SLIUP (див. рис. 3.4).

Враховуючи те, що для кожуха теплообмінника застосовують сталь 21Х2НМФА, то перед зварювання проводять попереднє підігрівання до температури 180-200 °С. Для цього застосовують індукційний нагрівач для зварювання та нагрівальні елементи з керамічної накладки. Це дозволяє швидко нагріти метал до необхідної температури та на необхідну зону відносно стика, а також необхідної довжини.

IV. Збирання та зварювання обичайок і фланців у корпус. Обичайки стикують і зварюють між собою за допомогою кільцевих зварних швів. До зварених обичайок приварюються фланці для монтажу теплообмінника. Цей процес реалізується за допомогою установки див. рис. 3.5.

V. Вирізка отворів у корпусі. Встановлюються отвори для штуцерів і технологічних елементів за допомогою плазмового різання.

VI. Приварювання штуцерів до корпусу. Штуцери встановлюються в підготовлені отвори та приварюються за допомогою автоматизованого зварювання на установці рис. 3.6.

VII. Встановлення та зварювання трубного пучка до решітки. Трубний пучок монтується в корпус і з'єднується з трубною решіткою за допомогою орбітального зварювання (див. рис. 3.7).

VIII. Контроль якості корпусу теплообмінника. Виконується перевірка зварних швів методами неруйнівного контролю (ультразвукова діагностика). Її реалізують за допомогою приладу A1212 MASTER.

Також враховуючи умови роботи теплообмінників проводять випробування їх на герметичність шляхом пневматичних або гідравлічних випробувань.



Рис. 3.12 Ультразвуковий пристрій діагностики зварних швів A1212 MASTER [21]

4 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

4.1 Розрахунок зусиль підгинання кромки

Після процесу вальцювання обичайки можуть виникати неточності у її геометрії (рис. 4.1) [22]

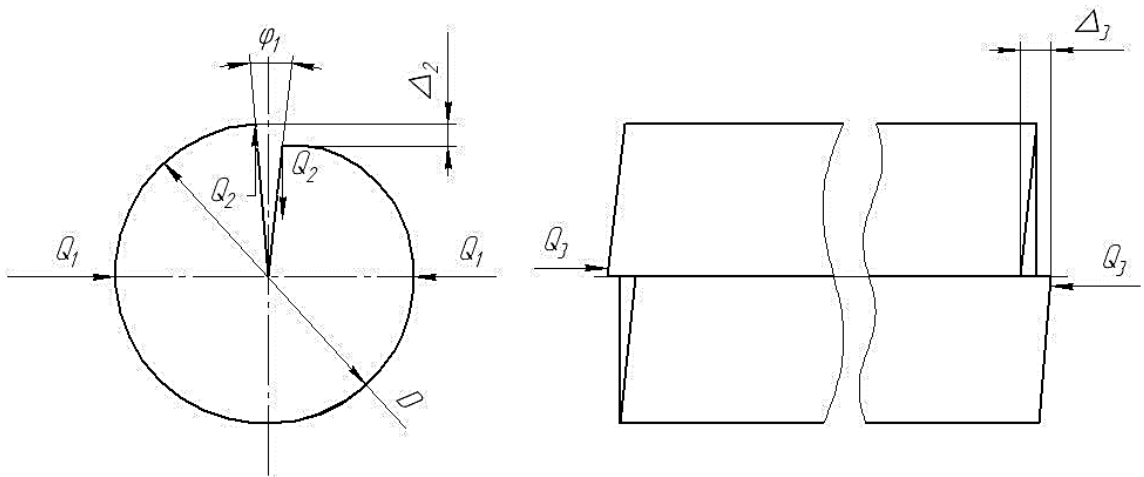


Рис. 4.1 - Дефекти вальцювання обичайки

В умовах масового та стабільного вальцювання обичайок технічними умовами дозволяються такі допустимі значення відхилень: $\varphi_1 \leq 3^\circ$, $\Delta_2 \leq 4$ мм і $\Delta_3 \leq 3$ мм.

На основі цих припустимих меж визначається зусилля, необхідне для стягування торців недовальцованої обичайки.

$$P = \frac{LE\delta^3}{6KD^2} = \frac{2 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 10^6 \cdot 0,012^3}{6 \cdot 18 \cdot 0,7^2} = 13,7 \times 10^3 \quad \text{Н} \quad (4.1)$$

де E – модуль пружності сталі, Н/мм², приймаємо $E = 2 \cdot 10^5$ Н/мм²;

δ – товщина стінки, $\delta = 12$ мм;

L – довжина обичайки, $L = 2000$ мм;

D – діаметр обичайки, $D = 700$ мм.

Зусилля, необхідне для сполучення крайок:

$$P_1 = \frac{\Delta L E \delta^3}{1,5 \pi D^3}; \quad (4.2)$$

$$P_1 = \frac{20 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 10^6 \cdot (12 \cdot 10^{-3})^3}{1,5 \cdot 3,14 \cdot 0,7^3} = 8,9 \times 10^3 \text{ Н.}$$

Зусилля, необхідне для сполучення торців:

$$P_2 = \frac{L^2 \delta^3 G \Delta}{2,8 \cdot D^3 (L^2 + \delta^2)}, \quad (4.3)$$

де $G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$ – модуль зсуву.

З урахуванням коефіцієнта Пуассона для сталі $\nu = 0,3$

$$G = \frac{2,1 \cdot 10^5}{2(1+0,3)} = 8 \times 10^4 \text{ МПа}$$

Величина сили, для вирівнювання торців

$$P_2 = \frac{2 \cdot 0,012^3 \cdot 8 \cdot 10^4 \cdot 10^6 \cdot 0,15}{2,8 \cdot 0,7^3 (2^2 + 0,012^2)} = 10,8 \times 10^3 \text{ Н}$$

4.2 Розрахунок пневмоциліндрів довальцювання обичайки [22].

Конструктивна розрахункова схема підгинання і фіксації торців обичайки в процесі складання на спеціалізованому складальному стенді представлена на рис. 4.2.

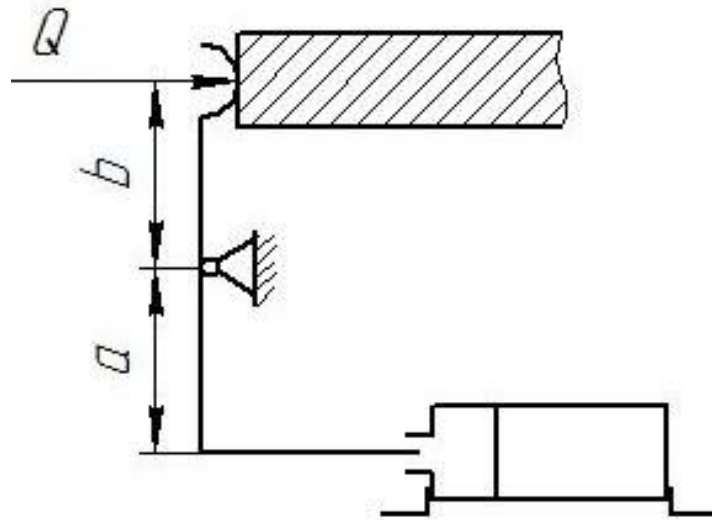


Рис. 4.2 - Розрахункова схема фіксації крайок

Визначимо зусилля на штоку:

$$Q = Q_{\text{тр}} \cdot K; \quad (4.4)$$

$$K = K_0 \cdot K_1 \cdot K_2 = 1,5 \cdot 1 \cdot 1 = 1,5,$$

де K_0 – гарантований коефіцієнт запасу;

K_1 – коефіцієнт, що враховує стан поверхні (для обробленої поверхні);

K_2 – коефіцієнт, що враховує сталість зусилля затискача, що розвиває силовим приводом пристосування.

$$Q_{\text{тр}} = m \cdot g \cdot f = 314 \cdot 9,81 \cdot 0,2 = 616 \text{ Н};$$

$$Q = 616 \cdot 1,5 = 924 \text{ Н}.$$

Визначаємо зусилля привода P пневмоциліндра.

$$P = \frac{Q}{\frac{1}{b} \left(a - \frac{a+b}{b} \cdot f \cdot r \right)}, \quad (4.5)$$

де a, b – плечі важеля: $a = b = 137$ мм;

$f = 0,1$ – коефіцієнт тертя в осях шарнірів;

$r = 10$ мм – радіус осі шарніра.

$$P = \frac{924}{\frac{1}{13,7} (13,7 - \frac{13,7 + 13,7}{13,7} \cdot 0,1 \cdot 1)} = 920 \text{ Н.}$$

Визначаємо діаметр циліндра:

$$D = \sqrt{\frac{4Q}{\pi \rho \eta}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 924}{3,14 \cdot 0,63 \cdot 0,8}} = 49 \text{ мм}, \quad (4.6)$$

де $\rho = 0,63$ МПа – тиск стисненого повітря в пневматичній системі.

Приймаємо $D = 50$ мм.

Зі стандартного ряду вибираємо пневмоциліндр 2111 – 50x200 [15].

Для фіксації зазору між крайками (2 пневмоциліндри), для упору (1 пневмоциліндр).

Визначаємо діаметр циліндра:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot 4710}{3,14 \cdot 0,63 \cdot 0,95}} = 100 \text{ мм.}$$

Приймаємо $D = 100$ мм, та вибираємо пневмоциліндр 2311 – 100x300.

Для усунення недовальцювання крайки підтискаються пневмоциліндрами з бічних сторін. Для цього застосовуємо 4 пневмоциліндри 2311 – 100x300.

4.3 Опис конструкції пристосувань

Стенд для складання циліндричного корпусу. Для забезпечення високої точності під час складання був розроблений спеціалізований стенд, що дозволяє зберігати співвісність кромek циліндричної заготовки. До його складу входять приводні роликові опори та холості роликові опори, на які встановлюється циліндрична заготовка. Крім того, стенд оснащений пневмоциліндрами, механізмом підйому та опорними стійками, а для контролю зазору між кромками обичайки застосовуються спеціальні ріжучі елементи.

Процес роботи стенду відбувається так: попередньо вальцьована обичайка циліндричного корпусу розташовується на роликові опори та притискається поздовжнім пневматичним пристроєм до упора. Потім здійснюється стягування звальцьованої обичайки до необхідного розміру зазору між кромками, після чого виконуються прихватки зварного з'єднання.

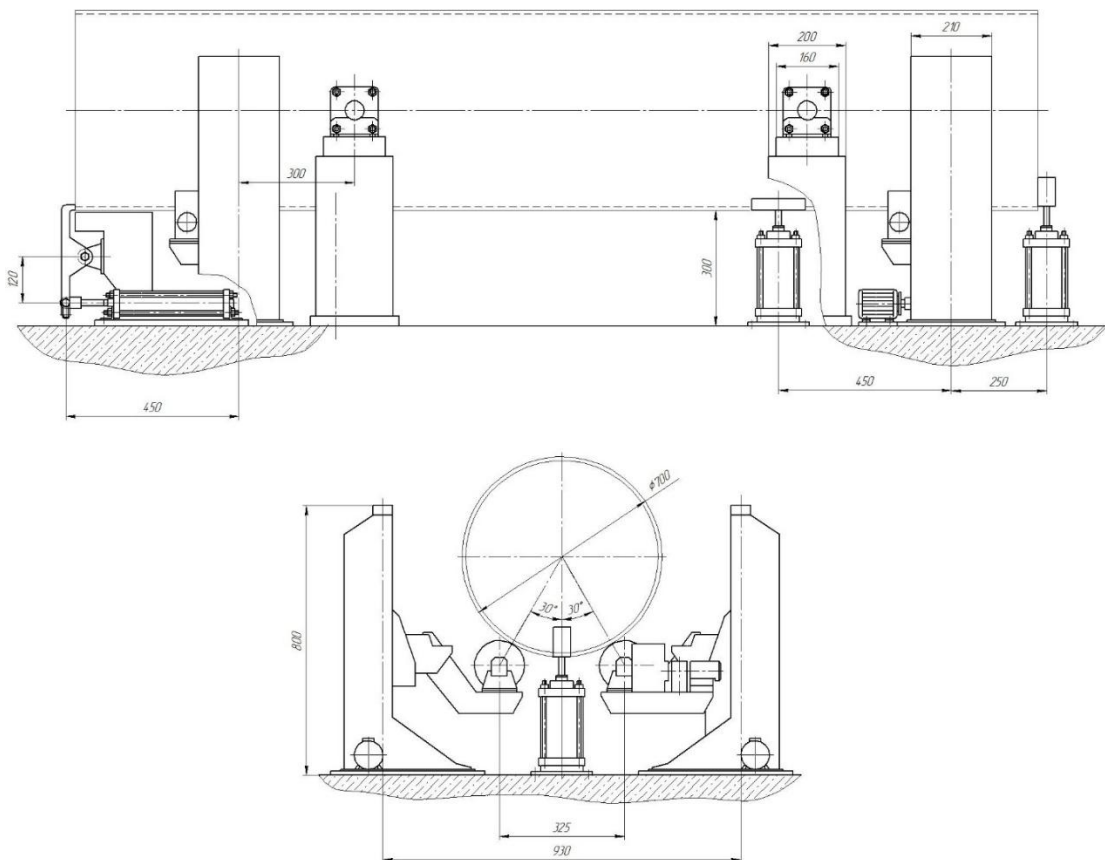


Рис. 4.3 – Установка складання кожуха теплообмінника

Зварювальна установка. Дана установка призначена для виконання одностороннього автоматичного зварювання з використанням флюсової подушки. Вона ефективно застосовується для фіксації та зварювання поздовжніх стикових з'єднань обичайок діаметром від 300 до 1000 мм. Конструктивно установка складається з притискного пристрою, на якому розміщується обичайка, та зварювального автомата.

Притискний пристрій (рис. 4.4) обладнаний затискними механізмами й має двосекційну будову: стаціонарну частину з верхніми контр-балками та підйомну частину, що містить підйомну балку та затискний механізм. Підйомна частина являє собою колону з горизонтальною консоллю, всередині якої встановлено підйомну балку. На цій балці розташовано технологічну флюсову підкладку [5].

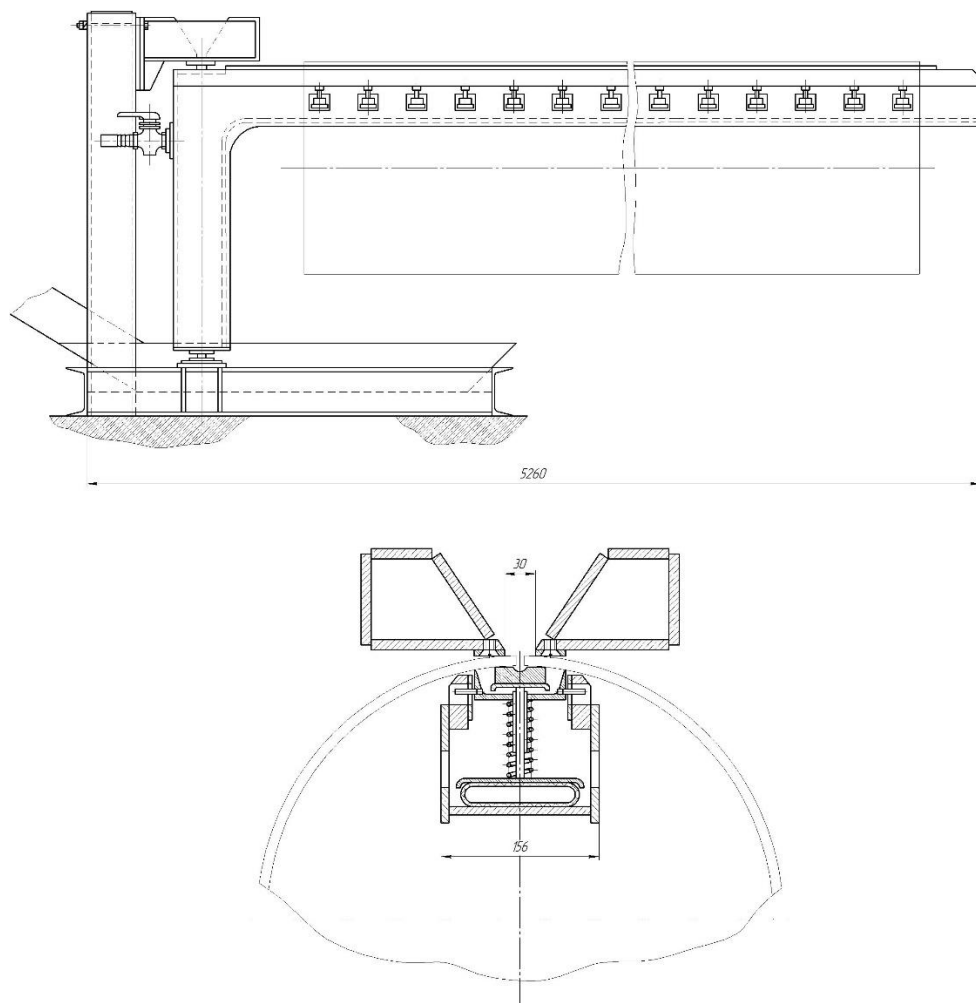


Рис. 4.4 Притискний пристрій установки SWC

Обичайка встановлюється на консоль таким чином, що вона зависає на підйомній балці, спираючись на флюсову підкладку. Підйомна балка підіймається й притискається до верхніх контр-балок, після чого здійснюється зварювання. Конструкція затискного пристрою включає контр-балки, які з'єднані з рамою за допомогою колон.

Принцип дії механізму підйому балки та затискання обичайки такий: при обертанні маховичка гвинта, що має праву та ліву різьбу на своїх кінцях, дві гайки зближуються. Це зближення спричиняє поворот важелів навколо їхніх нерухомих осей, унаслідок чого балка, підвішена на важелях, підіймається, створюючи необхідне зусилля притиску.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

5.1 Загальні вимоги до посудин, що працюють під тиском

У різних галузях промисловості і будівництва значна кількість обладнання працює за рахунок використання енергії стисненого повітря, газу або пари. До обладнання, що працює під тиском, відносяться парові і водяні котли, компресори і балони зі стисненими або зрідженими газами. Ці установки бувають стаціонарними і пересувними. Стаціонарні встановлюються на нерухомому фундаменті, а пересувні мають ходову частину. Пересувні посудини з високим тиском експлуатуються в будівлях тимчасового типу або на відкритому повітрі.

За правильність конструкції посудин з високим тиском, за розрахунок їх на міцність і вибір матеріалу, за якість виготовлення, монтажу і ремонту, а також за відповідність їх вимогам „Правил влаштування і безпечної експлуатації парових і водогрійних котлів” відповідає підприємство (організація), що виконує відповідні роботи.

Елементи посудин, що працюють під тиском, у відношенні до конструкції, вибору матеріалів і розрахунків на міцність мають відповідати діючим „Нормам розрахунку елементів парових котлів на міцність”.

При проектуванні елементів, що працюють під тиском, мають бути враховані напруги, що виникають при гідравлічному випробуванні, яке не повинно перевищувати 1,25 величини допустимих напруг при температурі 20 °С, прийнятої у відповідності до вказаних норм розрахунку.

Конструкція посудин з високим тиском має бути надійною і безпечною в експлуатації; повинна бути передбачена можливість огляду, очищення з використанням засобів механізації, промивання і продування, а також ремонту їх елементів.

Температура стінок елементів посудин з високим тиском не повинна перевищувати величин, прийнятих у розрахунках на міцність

відповідно, „Єдиному нормативному методу теплового розрахунку котельних агрегатів”.

Конструкція і гідравлічна схема вказаних посудин має забезпечувати надійне охолодження стінок елементів, що знаходяться під тиском.

Посудини, конструкція яких не виключає можливості перегрівання стінок окремих їх елементів, в період розпалювання або при раптовому припиненні споживання пари мають бути оснащені спеціальними пристроями, що запобігають підвищенню температури металу цих елементів вище норми.

Недотримання правил експлуатації обладнання і посудин, що працюють під тиском в несприятливих умовах, може призвести до нещасних випадків внаслідок вибуху.

При вибуху обладнання і посудин, що працюють під тиском, травми і каліцтва може отримати не тільки обслуговуючий персонал, а й люди, що знаходяться в районі дії вибуху. Вибух викликає забиття, струси мозку, переломи кісток, опіки, призводить до руйнування будівель і споруд.

На системи, що працюють під тиском розповсюджуються ДНАОП 0.00.-1.07-94 „Правила будови і безпечної експлуатації посудин, що працюють під тиском”.

До посудин, що працюють під тиском, відносяться ємності, у яких $p > 0,7 \text{ кгс/см}^2$ (0,07 МПа) або $pV > 200$, де V — внутрішній об'єм посудини, л.

Основна вимога до котельних установок, згідно НПАОП 0.00.-1.08-94 „Правила будови і безпечної експлуатації парових та водогрійних котлів” полягає в тому, щоб підтримувати поряд з постійним тиском постійну номінальну температуру пари без значних відхилень. Допустиме відхилення температури перегрітої пари $\pm 5^\circ \text{C}$.

При експлуатації котельних установок нерідко бувають випадки значного відхилення температури пари від номінальної. Причини, які викликають порушення нормальної роботи котельних установок, розглянуто нижче.

5.2 Вимоги нормативних документів до систем виробничого освітлення, їх основні величини

Зорові відчуття при впливі світла на очі людини викликають електромагнітні хвилі оптичного діапазону. Область видимих оптичних електромагнітних випромінювань розташована між областю ультрафіолетових та ІЧ-випромінювань.

Виробниче освітлення—це система заходів і пристроїв, що забезпечують сприятливу роботу зорового аналізатора людини та виключають шкідливий або небезпечний вплив світла на нього в процесі праці.

Освітлення у виробничих будинках і на відкритих площадках здійснюється природним і штучним світлом. При недостатності природного застосовують сполучене освітлення, при якому у світлий час доби використовується одночасно природне і штучне освітлення.

Нормуються всі види освітлення за характеристикою зорової роботи (ступеня її точності) відповідно до вимог ДБН В.2.5-28 - 2006 «Природне і штучне освітлення», згідно з яким для створення нормальних умов роботи зорового аналізатора людини в процесі праці повинні виконуватися такі основні вимоги:

- освітленість на робочих місцях має відповідати характеру зорової роботи (забезпечення необхідної освітленості робочих поверхонь поліпшує умови бачення об'єктів, підвищує продуктивність праці);
- рівномірний розподіл яскравості на робочій поверхні (при нерівномірній яскравості в процесі роботи око змушене переадаптуватися, що веде до стомлення зорового аналізатора);
- відсутність різких тіней на робочих поверхнях (у полі зору людини різкі тіні спотворюють розміри й форми об'єктів розрізнення, що додатково втомлює зір, а тіні, що рухаються, можуть призвести до травм);

- відсутність блискоті й засліпленості (блискоті викликає порушення зорових функцій, а засліпленість – призводить до швидкого втомлення зорового аналізатора і зниження працездатності людини);
- сталість освітленості в часі (коливання освітленості викликає переадаптацію ока, призводить до значного втомлення);
- правильна передача кольору (спектральний склад штучних джерел світла повинен бути максимально наближений до спектра природного освітлення);
- забезпечення електро-, вибухо- і пожежонебезпечності;
- економічність.

Світло, а отже і зорова інформація про навколишній світ, сприймана оком людини, передається по зоровому нерві в спеціальний відділ кори головного мозку, в якому формується суб'єктивний зоровий образ. У процесі праці людина через зоровий аналізатор сприймає виробничу обстановку, предмети праці, які називають об'єктами розрізнення.

Для того, щоб людина могла якісно виконувати зорову роботу, необхідні певні характеристики світлових приладів і системи освітлення, що повинні відповідати параметрам об'єкта розрізнення і конкретним умовам праці.

Основними світлотехнічними величинами, що кількісно характеризують вплив світлового випромінювання на око людини, є наступні:

Сила світла(I) – просторова щільність світлового потоку, що визначається відношенням світлового потоку (F) до тілесного кута (ω), в якому він поширюється. За одиницю сили світла прийнята кандела (кд). Кандела являє собою силу світла точкового джерела, що випускається в перпендикулярному напрямку з площі в $1/600000$ м² чорного тіла при температурі затвердіння платини $T = 2042$ К і атмосферному тиску $P = 101,325$ КПа.

Світловий потік (F) – це потік випромінювання, що оцінюється за його дією на очі людини. За одиницю світлового потоку прийнятий люмен (лм). Люмен відповідає світловому потоку, що випромінюється в одиничному тілесному куті точковим ізотропним джерелом із силою світла 1 кандела.

Освітленість (E) – поверхнева щільність світлового потоку, перпендикулярного поверхні освітлення. Одиниця виміру – люкс (лк). За люкс прийнята освітленість поверхні площею 1 м^2 світловим потоком 1 лм. Освітленість поверхні не залежить від її світлових властивостей. Якість виробничого освітлення прийнято характеризувати необхідною освітленістю робочих поверхонь і ділянок. Освітленість робочої зони вимірюють за допомогою приладів – люксметрів.

Яскравість (B) – поверхнева щільність сили світла. Визначається як відношення сили світла (I) у даному напрямку до проекції поверхні, що освітлюється, на площу S , перпендикулярну до напрямку спостереження.

Тло – поверхня, що безпосередньо прилягає до об'єкта розрізнення. Тло вважають світлим при $\rho > 0,4$, середнім при $0,4 \geq \rho > 0,2$ і темним при $\rho < 0,2$, де ρ – коефіцієнт відбиття поверхні.

Основними показниками, що визначають працездатність зорового аналізатора людини є: контрастність; гострота зору; ймовірність розрізнення; час зорового сприйняття; поле зору; ступінь засліпленості.

Контрастність (K) об'єкта спостереження визначається як відношення різниці між яскравістю об'єкта розрізнення (B_n) і тла (B_ϕ) до яскравості об'єкта розрізнення або тла.

Контраст вважають великим ($K > 0,5$), якщо об'єкт і тло значно відрізняються за яскравістю; середнім ($0,2 < K < 0,5$), якщо різниця яскравості об'єкта розрізнення і тла досить помітна, і малим ($K < 0,2$), якщо різниця яскравості B_n і B_ϕ ледь помітна.

Коефіцієнт відбиття – це відношення відбитого від поверхні світлового потоку до падаючого на неї світлового потоку.

При $\rho > 0,4$ тло вважають світлим, $\rho = 0,2 \div 0,4$ тло вважається середнім, а при $\rho < 0,2$ – темним.

Гострота зору – характеристика просторового порога зору, що визначається величиною, зворотною мінімальному розміру об'єкта розрізнення, при якій він помітний оком.

Розміри предмета виражають у кутових величинах, що пов'язані таким лінійним співвідношенням:

$$\operatorname{tg} \alpha = \alpha / 2 = h / 2\ell,$$

де α – кутовий розмір об'єкта розрізнення; h – його лінійний розмір; ℓ – відстань від очей до об'єкта.

Основними часовими характеристиками зорового аналізатора є латентний період зорової реакції; критична частота злиття миготінь; мінімальна тривалість сигналу, який викликає зорове відчуття; час адаптації.

Латентним періодом називають проміжок часу від моменту подачі сигналу до виникнення зорового відчуття людиною. Для більшості людей $\tau_{\text{лат}} = 160 \dots 240$ мс.

Критична частота злиття миготінь – мінімальна частота сигналів, при якій виникає їх злите сприйняття. При нормальній яскравості $f_{\text{кр}} = 20 \dots 25$ Гц.

При розробленні системи виробничого освітлення необхідно обов'язково враховувати особливість процесу адаптації ока. При переході від високої яскравості до практичної темряви процес адаптації відбувається повільно і складає 60...90 хв. Зворотний процес відбувається швидше – 5...10 хв. У період процесу адаптації око працює зі зниженою працездатністю, тому необхідно уникати створення умов, що вимагають частоті і «глибокої» переадаптації.

Поле зору людини, залежно від чіткості розрізнення деталей предметів, прийнято розбивати на три зони: центрального зору ($\sim 2^\circ$), де деталі розрізняються чітко; ясного бачення ($30 \dots 35^\circ$), де при нерухомому оці можна пізнати предмет без розрізнення дрібних деталей; периферичного зору ($75 \dots 90^\circ$), де предмети тільки виявляються.

Імовірність розрізнення (видимість)– характеристика здатності ока сприймати об'єкт. Ця характеристика визначається числом граничних контрастів ($K_{\text{пор}}$ – найменший помітний контраст) у контрасті об'єкта розрізнення з тлом:

$$V = K/K_{\text{пор}}.$$

Показник дискомфорту(M) – характеристика якості освітлення, що визначає ступінь додаткового напруження зорової роботи людини, викликаного наявністю різкої різниці яскравості одночасно видимих поверхонь в освітленому приміщенні.

Розглянуті характеристики працездатності ока взаємозв'язані й взаємозалежні.

Одним зосновних факторів сприятливого функціонування зору є достатня яскравість або освітленість робочих поверхонь і їх ділянок. При незадовільних характеристиках освітленості виробниче освітлення може бути шкідливим чи небезпечним виробничим фактором.

При незадовільній освітленості погіршуються умови для здійснення зорових функцій і життєдіяльності організму: з'являються втомлення, очні хвороби, головні болі, що може бути непрямою причиною нещасних випадків. Погано освітлені небезпечні зони, прожектори і лампи, що засліплюють, відблиски від них, різкі тіні погіршують або можуть викликати втрату орієнтації працюючих.

5.3 Підвищення стійкості об'єкта до ударної хвилі

Інженерно-технічний комплекс будь-якого підприємства включає в себе: будівлі споруди, технологічне обладнання і комунікації, електромережі, тепломережі, водопровід, каналізацію і газопровід [24].

Від стійкості будівель і споруд залежить в основному стійкість всього об'єкту. Підвищувати стійкість всіх будівель і споруд не потрібно, так як це пов'язано з великими матеріальними затратами, які не завжди будуть

виправдані. Головним чином, потрібно підвищувати міцність найбільш важливих елементів виробництва, від яких залежить робота всього підприємства, але стійкість яких нижча загальної границі стійкості. Підвищення стійкості будівель і споруд досягається встановленням додаткових зв'язків між несучими елементами, будовою каркасів, рам, підкосів, опор для зменшення прольоту несучих конструкцій, а також за рахунок застосування більш міцних матеріалів.

Низькі споруди, для підвищення їх міцності, частково обсипаються ґрунтом. Високі споруди (труби, башти, колони) закріплюються розтяжками, які розраховані на певні навантаження.

Захист ємкостей для зберігання легкозаймистих рідин може здійснюватися побудовою підземних сховищ, заглибленням їх в ґрунт, а збільшення механічної міцності ємкостей – встановленням ребр жорсткості.

Надійно захистити все технологічне обладнання від дії ударної хвилі практично неможливо. Захист обладнання необхідний, якщо воно здатне при руйнуванні частини підприємства випускати особливо цінну продукцію і його необхідно зберегти для подальшого використання. Захист обладнання входить в загальний комплекс інженерно-технічних заходів по підвищенню стійкості роботи підприємства. Потрібно створювати запаси деталей і вузлів технологічного устаткування, а також виготовляти захисні конструкції і застосовувати їх в період загрози нападу ворога для запобігання виходу з ладу устаткування при обвалі конструкцій будівель [24].

Для сучасних підприємств характерна велика кількість комунікацій для подачі води, електроенергії, пари, газу, які розміщені відкрито на високих естакадах або зовнішніх стінах будівель, що полегшує їх регулярний огляд і ремонт, але з другого боку значно знижує стійкість до дії ударної хвилі ядерного вибуху.

Для підвищення надійності комунікацій потрібно: заглиблювати основні комунікаційно-енергетичні мережі і технологічні комунікації або розміщувати їх на низьких естакадах та обвалькувати землею; збільшувати

механічну міцність трубопроводів за рахунок встановлення ребр жорсткості, хомутів, які з'єднують два-три трубопроводи в один пучок.

Система електрозабезпечення займає значне місце на промисловому підприємстві, тому останнє повинно мати два джерела живлення – основне і аварійне. Для запобігання виходу з ладу електричних мереж потрібно встановлювати пристрої автоматичного відключення їх при утворенні перенапруг, які можуть бути створені електромагнітними полями, що виникають при ядерному вибуху.

При пошкодженні джерел газозабезпечення або газопроводів на великих підприємствах знаходяться підземні ємкості - газгольдери постійного об'єму. Газові мережі прокладають під землею і підводять до об'єкту з двох напрямків. Для запобігання руйнуванню газових мереж їх забезпечують пристроями для автоматичного відключення ділянок газопроводу.

Стійкість роботи промислових об'єктів визначається також стійкістю систем парозабезпечення і теплозабезпечення. Промислові об'єкти повинні мати два джерела пари і тепла - зовнішнє (ТЕЦ) і внутрішнє (місцеві котельні).

Важливе значення має створення стійкості системи водозабезпечення об'єкту. Промисловий об'єкт повинен забезпечуватись водою не менше ніж від двох джерел - основних і резервних. Одне із джерел повинно бути підземним. Мережі водозабезпечення прокладаються в землі і обладнуються засувками для відмикання окремих ділянок при аварії.

Щоб підвищити стійкість каналізації об'єкта потрібно створити роздільні системи каналізації – одну для дощових, другу для промислових і господарських вод, Система каналізації об'єкта повинна мати аварійні викиди в річку або в дощову мережу.

ВИСНОВКИ

В роботі розроблено удосконалену технологію виготовлення кожухотрубного теплообмінника та досліджено втомну міцність його зварних швів.

Запропоновані рішення, спрямовані на зниження трудомісткості та підвищення продуктивності зварювального процесу, що реалізується шляхом переходу від ручного механізованого зварювання в середовищі захисних газів до автоматизованого зварювання.

Виявлено, що моделювання крупне зерно зони термічного впливу при зварюванні з допомогою термоциклічного симулятора і застосування печі для росту зерна та гартування адекватно відтворює та дає змогу оцінити втомну міцність зварного з'єднання. Малі дефекти в крупному зерні зони термічного впливу на зовнішній границі зварного шва, що співрозмірні зернам матеріалу є ініціаторами втомних тріщин у випадку циклічного навантаження. Найвища втомна міцність отримана на гладких зразках без дефекту. Відбиток Вікерса з діагоналлю приблизно 200 нм у крупному зерні зони термічного впливу матеріалу знижує втомну міцність. Залишкові стискаючі напруження наведені індукуванням відбитку Вікерса впливають на ініціювання втомних тріщин. Втомна тріщина від дефекту починається пізніше в порівнянні з дефектом без залишкових напружень. Відбиток знижує втомну міцність до 14 %, а в подальшому до 21 %.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Теплові й масообмінні процеси та обладнання хімічних і нафтогазопереробних виробництв у системах «газ (пара) – рідина» : підручник / Я. Е. Михайловський, А. Є. Артюхов, М. П. Юхименко, Н. О. Артюхова ; за заг. ред. Я. Е. Михайловського. – Суми : Сумський державний університет, 2021. – 391 с.
2. Інноваційне теплообмінне обладнання [Текст] : монографія / І. О. Мікульонюк. Київ : КПП ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 140 с
3. http://www.s-metall.com.ua/spravochnik_stalej.html
4. Палаш В. М. Металознавчі аспекти зварності залізвуглецевих сплавів.: Навчальний посібник. – Львів: КІНПАТРИ ЛТД, 2003. - 263 с.
5. 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.
6. СОУ МПП 71.120-217:2009. Посудини та апарати сталеві зварні. Загальні технічні умови.
7. Vojvodic Tuma, J.; Sedmak, A. Analysis of the unstable fracture behaviour of a high strength low alloy steel weldment. Eng. Fract. Mech. 2004, 71, 1435–1451.
8. Sedmak, A.; Doncheva, E.; Medjo, B.; Rakin, M.; Milosevic, N.; Radu, D. Crack Size and Undermatching Effects on Fracture Behavior of a Welded Joint. Materials 2023, 16, 4858.
9. Arandelović, M.; Sedmak, S.; Jovičić, R.; Perković, S.; Burzić, Z.; Radu, D.; Radaković, Z. Numerical and experimental investigations of fracture behaviour of welded joints with multiple defects. Materials 2021, 14, 4832.
10. Song, W.; Man, Z.; Xu, J.; Wang, X.; Liu, C.; Zhou, G.; Berto, F. Fatigue Crack Growth Behavior of Different Zones in an Overmatched Welded Joint Made with D32 Marine Structural Steel. Metals 2023, 13, 535.

11. Tomków, J.; Landowski, M.; Rogalski, G. Application possibilities of the S960 steel in underwater welded structures. *Facta Univ. Ser. Mech. Eng.* 2022, 20, 199–209.
12. Jahns, H.; Unglaub, J.; Müller, J.; Hensel, J.; Thiele, K. Material Behavior of High-Strength Low-Alloy Steel (HSLA) WAAM Walls in Construction. *Metals* 2023, 13, 589.
13. Кривов, Г.О. Виробництво зварних конструкцій: підручник для студентів вищих навчальних закладів / Кривов, Г.О., Зворикін, К.О. – К.:КВІЦ, 2012.-896 с.
14. Биковський О.Г. Зварювання, різання й контроль якості під час виробництва металоконструкцій: підручник. – К.: Основа, 2021. – 400 с.
15. Биковский, О.Г. Довідник зварника: довідник / О.Г. Биковський, І.В. Пінковський. - К.: Техніка, 2002. – 336 с.
16. 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.
17. Костін О.М. Зварювальні матеріали: навч. посібник / О.М. Костін – Миколаїв: НУК, 2004. –225 с.
18. <https://svartech.com.ua/ua/>
19. <https://ua.chinatopwelding.com/automatic-pipe-flange-welding-machine/pipe-inner-outer-flange-seam-welding-machine.html>
20. <https://magnatech-welding.com/-261527>
21. <https://novotest.ua/ultrazvukovye-tolshinometry/defektoskop-ultrazvukovoy-ud-1.html>
22. Карпенко А.С. Технологічна оснастка у зварювальному виробництві / 2-ге видання, переробл. та доповн.: Навч. посібник.- К.: Арістей, 2006. - 272 с.
23. Левченко О. Г. Охорона праці у зварювальному виробництві Навчальний посібник / О.Г. Левченко – К.: Основа, 2010. – 240 с.
24. Стеблюк М.І. Цивільна оборона. Підручник. – К.: Знання, 2006 – 487с.

ДОДАТКИ