

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до практичних робіт з дисципліни
«Зварювання та наплавлення спеціальних сталей та сплавів»
для студентів освітньої програми «Технології та устаткування
зварювання» всіх форм навчання

Методичні вказівки до практичних робіт з дисципліни «Зварювання спеціальних сталей та сплавів» для студентів освітньої програми «Технології та устаткування зварювання» всіх форм навчання / Укл.: І.М. Білоник, О.Є. Капустян. Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2022. 51 с.

Укладачі: І.М. Білоник, канд. техн. наук, доцент
О.Є. Капустян, канд. техн. наук

Рецензент: В.В. Нетребко, д-р техн. наук, проф.
Редактор: І.П. Аверченко
Відповідальний за випуск: О.Є. Капустян

Затверджено
на засіданні кафедри ОТЗВ
Протокол № 11 від 24.06.2022 р.

Рекомендовано
до видання НМК ІФФ
Протокол № 11 від 28.06.2022 р.

ЗМІСТ

вступ.....	4
Практична робота №1 Електроди для дугового зварювання сталі типу 12X18H10T.....	5
Практична робота №2 Вибір електродів для зварювання корозійностійких сталей.....	10
Практична робота №3 Вибір електродів для зварювання аустенітних сталей з перлітними.....	19
Практична робота №4 Визначення схильності сталей та сплавів до міжкристалічної корозії.....	32
Практична робота №5 Вивчення корозійних руйнувань зварних з'єднань аустенітних хромонікелевих нержавіючих сталей в агресивних середовищах.....	42
Рекомендована література.....	51

ВСТУП

Наведені дані містять рекомендації до виконання практичних занять за темами, зміст яких відповідає змісту лекційного курсу «Зварювання спеціальних сталей та сплавів» в розділах «Зварювання корозійностійких аустенітних хромонікелевих сталей» та «Зварювання різнорідних сталей».

До кожного практичного заняття наведено основні теоретичні положення, індивідуальні завдання, приклад виконання завдання, довідкові матеріали.

Мета – допомогти студентам в вивченні та закріпленні лекційного курсу.

ПРАКТИЧНА РОБОТА №1

ЕЛЕКТРОДИ ДЛЯ ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ

СТАЛІ ТИПУ 12X18H10T

1.1 Мета роботи

Вивчити відомі марки електродів для зварювання сталі 12X18H10T. Визначити фазовий склад металу шва, користуючись діаграмою Шеффлера.

1.2 Загальні відомості

Технологічна міцність і корозійна стійкість виробів забезпечується за відсутності в зварних з'єднаннях гартівних структур та отриманні металу шва певного хімічного складу.

У зв'язку з цим, при виборі зварювальних матеріалів і визначенні допустимих ступенів проплавлення основного металу слід оцінити структуру і можливі властивості різних ділянок шва.

Попередній аналіз проводили за допомогою діаграми Шеффлера (рис. 1.1) відповідно до умов кристалізації металу при зварюванні хромонікелевих сталей. Відповідно до правил побудови діаграм, всі аустенітизуючі елементи наведені з відповідними коефіцієнтами до еквівалентного вмісту нікелю:

$$Ni_{\text{екв}} = \% Ni + 30\% C + 30\% N + 0,5\% Mn,$$

а всі феритизуючі елементи до еквівалентного вмістом хрому:

$$Cr_{\text{екв}} = \% Cr + \% Mo + 1,5\% Si + 1,5\% V + 0,8\% W + 0,5\% Nb + 4\% Ti + 3,5\% Al.$$

Структурний стан наплавленого металу та зварюваної сталі встановлювали за допомогою діаграми відповідно до вмісту в них аустенітизуючих і феритизуючих елементів. Для конкретного хімічного складу наплавленого металу він визначається точкою ($Ni_{\text{екв}}$, $Cr_{\text{екв}}$), для можливих складів у межах однієї марки - положенням області.

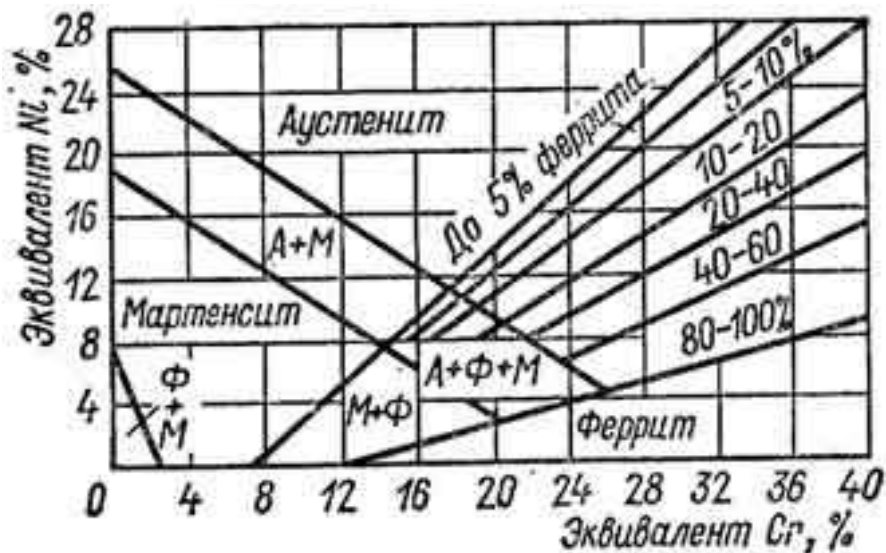


Рисунок 1.1 – Діаграма впливу елементів на структуру металу зварних швів (Шеффлера)

Структурний стан можливих проміжних складів визначали відкладаючи на прямих, що з'єднують точки наплавленого металу і сталі 12Х18Н10Т відрізки, що відповідають перемішуванню з основним металом (прямокутники зачернені) (рис. 1.2). Для ручного електродугового зварювання ступінь проплавлення основного металу становить 20...40%.

В якості прикладу розглянемо електроди з високим запасом аустенітності (ЭА-395/9) і електроди, що забезпечують двофазну аустенітно-феритного структуру шва (до 10% δ -фериту) АНВ-17. Використання діаграми дозволило оцінити структурний стан металу зварних швів і зробити попередній вибір зварювальних матеріалів.

Для остаточного вибору електродних матеріалів необхідно проаналізувати не тільки структуру наплавленого металу, але і його властивості в зоні сплавлення і визначити корозійну стійкість зварних з'єднань відповідно до технологічних середовищ.

Як видно з таблиці 1.1 міцнісні характеристики наплавленого металу в стані після зварювання перевищують рівень показників, характерних для хромонікелевих сталей типу Х18Н10. Міцність збільшує хром, нікель, молібден і ніобій, про що свідчить порівняння

даних, отриманих при наплавленні електродами ОЗЛ-9, ЦЛ-9, АНВ-17, ЭА-981/15 та ін.

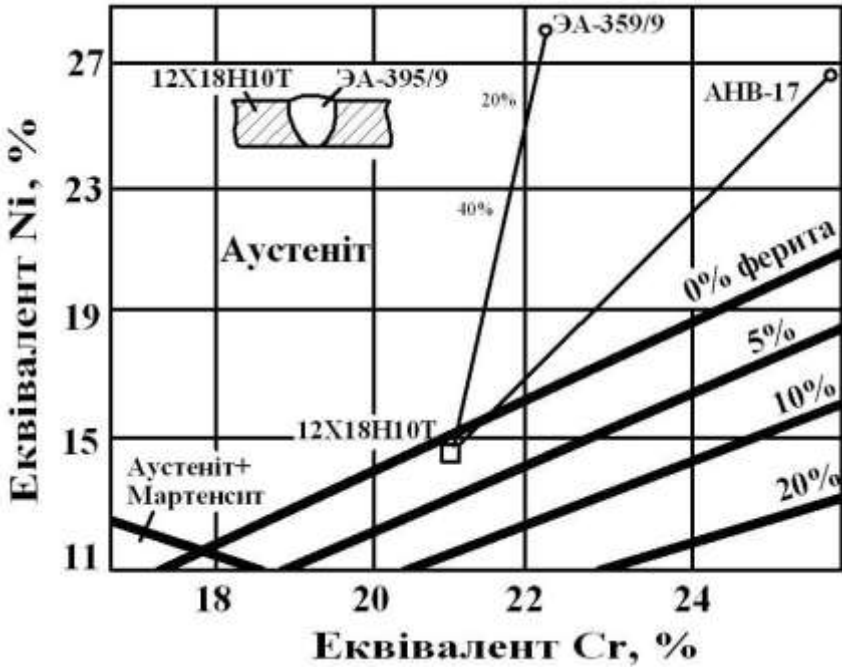


Рисунок 1.2 – Аустенітно-феритний кут діаграми Шеффлера

Межі плинності наплавленого металу знаходяться на високому рівні, що обумовлюється вмістом елементів що зміцнюють твердий розчин (Mo, Nb, V) [1-3].

Таблиця 1.1 – Хімічний склад, структура, механічні властивості та корозійна стійкість наплавленого металу

Марки електродів	Вміст елементів, %								Вміст δ - ферита, %	Механічні властивості			Швидкість корозії, г/м ² ·год	
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Nb	V		σ_B , МПа	σ_T , МПа	KCU, Дж/м ²	30% NaOH	55% NaOH
ОЗЛ-8	0,07	0,60	1,40	20,0	8,9	-	-	-	7	610	360	1200	0,6921	0,9937
ОЗЛ-6	0,09	0,55	1,25	25,6	12,5	-	-	-	4	570	350	1105	0,5972	0,8862
ОЗЛ-9	0,20	0,50	6,0	24,5	16,9	-	-	-	-	610	380	1400	0,0175	0,0335
ЗИО-8	0,07	0,55	1,89	23,8	12,6	-	-	-	3,5	560	340	1000	0,6007	0,8894
ЦЛ-11	0,10	1,00	1,55	19,8	9,5	-	0,98	-	6	620	360	817	0,590	0,6249
ЗИО-3	0,09	0,685	1,67	18,5	10,0	-	0,90	-	5	610	350	735	0,420	0,7877
ЦЛ-9	0,11	0,85	1,50	21,0	11,2	-	0,80	-	4	690	380	1000	0,127	0,5971
ЦТ-15	0,09	0,35	1,90	19,0	9,4	-	0,80	-	4	600	320	920	0,451	0,7112
АНВ-13	0,03	0,12	0,65	18,4	10,3	-	1,00	-	3,5	590	310	1000	0,840	1,1218
АНВ-23	0,08	0,80	1,45	18,7	9,1	-	0,36	-	3,5	590	320	1000	1,870	1,3773
ЦЛ-4	0,07	0,50	1,95	18,5	9,2	2,3	-	-	7	600	340	1000	1,8011	2,3672
НИАТ-1	0,09	0,72	1,25	18,3	8,7	2,1	-	-	5	590	350	1105	0,5812	1,5243
ЭА-395/9	0,09	0,69	1,70	15,5	25,0	5,8	-	-	-	620	470	1203	0,029	0,0438
АНВ-17	0,22	0,35	6,50	24,5	16,0	2,1	-	-	-	600	360	1300	0,048	0,1616
ЭА-400/10У	0,07	0,48	2,10	18,0	10,5	2,5	-	0,52	6	560	370	1100	0,690	3,2064
ЭА-981/15	0,08	0,50	2,00	15,3	25,0	5,8	-	1,25	-	690	500	1105	0,044	0,0507
НЖ-13	0,06	0,60	1,3	18,0	10,5	2,2	0,65	-	6	520	480	1000	0,293	0,9595
НИИ-48	0,18	0,38	5,60	19,8	10,2	0,1	-	-	-	560	370	1000	0,4511	1,3775
12Х18Н10Т	0,11	0,80	2,00	18,5	10,0	-	0,7	-	2	500	210	1005	0,4807	1,3775

1.3 Контрольні запитання для самоперевірки і контролю підготовленості студентів до роботи

1. Назвати типи і марки електродів.
2. Пояснити, як користуватися діаграмою Шеффлера.
3. Які існують фізичні методи визначення δ -фериту в металі зварних швів нержавіючих сталей?
4. Призначення δ -фериту в металі шва.
5. Методи боротьби з гарячими тріщинами при зварюванні аустенітних хромонікелевих сталей.
6. Як впливає δ -ферит на схильність до міжкристалітної корозії, структурно виборної корозії і корозійного розтріскування.
7. Як розрахувати хімічний склад і визначити структуру стану металу шва?

1.4 Зміст звіту

1. Відомості про основні марки та типи електродів для зварювання сталі 12X18H10T.
2. Докладний розрахунок фазового стану металу шва.
3. Обґрунтування області застосування електродів.

ПРАКТИЧНА РОБОТА №2 ВИБІР ЕЛЕКТРОДІВ ДЛЯ ЗВАРЮВАННЯ КОРОЗІЙНОСТІЙКИХ СТАЛЕЙ

2.1 Мета роботи

Опанувати за допомогою діаграми Шефлера методику вибору електродів для зварювання корозійностійких сталей.

2.2 Загальні відомості

Обмеження феритної фази в металі аустенітних швів є ефективним засобом забезпечення їх технологічної міцності і корозійностійких. Це обумовлює необхідність застосування для зварювання аустенітних сталей електродів з розрахунковими складами покриттів, що забезпечують утримання феритної фази в заданих межах (2,5-5,5).

Отримання однофазної аустенітної або двофазної аустенітно-феритної структури шва залежить в першу чергу від його хімічного складу, а також від швидкості охолодження при кристалізації і від режимів наступної термічної обробки. Всі елементи, що входять до складу високолегованих хромонікелевих сталей, можна розділити на дві основні групи: аустенітоутворюючі (вуглець, азот, нікель, марганець, мідь, кобальт тощо) і феритоутворюючі (хром, кремній, алюміній, молібден, ванадій, ніобій, титан, вольфрам та ін.) Елементи, атомний об'єм яких більше атомного об'єму заліза, є в більшості випадків феритоутворюючим, а з меншим атомним об'ємом - аустенітоутворюючі. Феритоутворюючі елементи при наявності надлишку в металі шва вуглецю утворюють карбіди, тобто є також карбідоутворюючі (крім кремнію і алюмінію, які в зварних швах карбідів не утворюють).

У залежності від співвідношення в металі шва аустенітно- і феритоутворюючих елементів виходить однофазна аустенітна або двофазна аустенітно-феритна структура.

Діаграма Шефлера (рис. 2.1) є не рівноважною, а реальної емпіричної діаграмою, побудованої для металу шва в початковому

стані після зварювання при звичайних усереднених режимах, що застосовуються при ручного дугового зварювання. Ця діаграма не враховує можливих змін кількості фериту при зміні швидкостей охолодження за рахунок зміни зварювальних режимів або за рахунок подальшої аустенізації або стабілізації металу шва і т.д. Крім того, точність визначення фериту по діаграмі Шеффлера залежить від застосовуваних коефіцієнтів, які характеризують аустеніто- і феритоутворюючу здатність легуючих елементів, які багатьма авторами оцінюються по різному. Мабуть, це обумовлено тим, що ряд елементів має змінну валентність і їх ферритоутворююча здатність може змінюватися в залежності від конкретного складу сплаву.

Тому магнітні і металографічні методи визначення фериту в шві дають більш точні результати.

Тим не менше з практично прийнятим ступенем точності оцінку структурного стану металу в залежності від його хімічного складу по діаграмі Шеффлера можна проводити.

За хімічним складом металу підраховується еквівалентну вміст хрому [Cr] і нікелю [Ni], для чого використовуються емпіричні коефіцієнти.

Структурний стан металу визначається точкою перетину на діаграмі еквівалентних значень хрому і нікелю, отриманих розрахунком. На рисунку 2.1 наведені області структур для ряду поширених типів електродів, які відповідають хімічним складам наплавленого металу за ГОСТ 10052-75. Для електродів з розрахунковими складами покриттів, що забезпечують утримання феритної фази в наплавленому металі в межах 2-5%, відповідні області структур заштриховані. З наведених на рисунку 2.1 даних видно, що при використанні переважної більшості типів електродів можна отримати в межах передбаченого складу наплавлений метал з різною структурою. Для ряду типів електродів структура наплавленого металу може бути як однофазною, так і двофазною, для інших - тільки двофазною, але зміст другої фази може змінюватися в широких межах. Це вирішально впливає на схильність наплавленого металу до утворення гарячих тріщин, його жароміцність, схильність до окрихчування при високих температурах і т.д. Саме ця обставина призвела до необхідності розробки марок електродів зі змінними розрахунковими складами покриттів, що забезпечують утримання феритної фази в наплавленому металі в заданих межах в залежності

від вихідного складу дроту і матеріалів покриття (КТИ-5, ЦТ-15, ЦТ-16 та ін.).

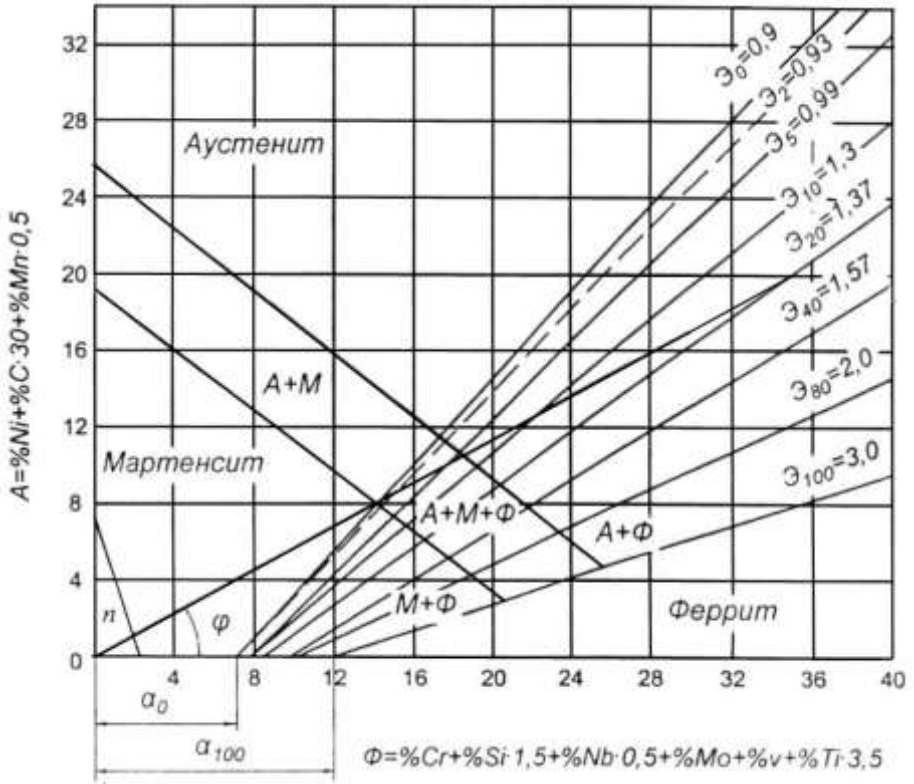


Рисунок 2.1 – Структурна діаграма Шеффлера та розрахункові області структур металу, наплавленого електродами різних типів

$$K = \frac{[Cr]}{[Ni]} \quad (2.1)$$

У роботі [1] показано, що дане відношення не характеризує по діаграмі Шеффлера певного структурного стану металу, так як рівні значення еквівалента K можуть відповідати різним структурним станам металу не тільки для різних типів електродів, але й у межах одного типу.

На рисунку 2.1 видно, що $K = \text{ctg}\varphi$, тому всі точки, які лежать на даній прямій відповідають однаковим значенням хромонікелевого еквівалента, але розташовуються при цьому в різних структурних областях (точки 1,2,3 і т.д.), так як лінії, що розмежовують структурні області, не паралельні лініям еквівалентів K і перетинаються з ними. Значення хромонікелевих еквівалентів, які для всіх типів електродів, марок зварювальних дротів і сталей будуть однаково характеризувати структурний стан фаз в металі, можуть розраховуватися за формулою:

$$\Xi = \frac{\Phi - a_{0-100}}{A}, \quad (2.2)$$

де Φ і A – розраховані за хімічним складом металу з урахуванням еквівалентних коефіцієнтів сумарний вміст феррито- та аустенітоутворюючих елементів, названих відповідно еквівалентами хрому і нікелю, які можуть бути обчислені за формулами:

$$\Phi = \%Cr + \%Si \cdot 1,5 + \%Nb \cdot 0,5 + \%Mo + \%V + \%Ti \cdot 3,5, \quad (2.3)$$

$$A = \%Ni + \%C \cdot 30 + \%Mn \cdot 0,5, \quad (2.4)$$

де a_{0-100} – величина ділянки, яка відсікається на осі абсцис діаграми Шеффлера відповідною лінією від початку координат ($a_0 = 7,5$ для лінії, що відповідає 0% фериту, і $a_{100} = 12$ – для лінії, що відповідає 100% фериту).

Відповідно хромонікелевий еквівалент для однофазної аустенітної сталі $\Xi_0 < 9,0$, а для однофазної феритної $\Xi_{100} > 3,0$ (рис. 2.1).

Всі проміжні значення хромонікелевого еквівалента відповідають двофазному стану металу. Структурний стан хромонікелевих аустенітних сталей може бути визначено розрахунком без знаходження координат точок по діаграмі Шеффлера.

Граничні умови існування металу з однофазною аустенітною і двофазною аустенітно-феритною структурою, які відповідають 0% фериту, виражаються лінійною залежністю:

$$[Cr]_p = 0,9A + 7,5\%, \quad (2.5)$$

Якщо еквівалент хрому Φ менше розрахункового вмісту хрому $[Cr]_p$, то сталь має однофазну аустенітних структуру, а якщо більше, то двофазну аустеніто-феритну структуру, і кількість фериту розраховується за формулою:

$$a = 3(\Phi - [Cr]_p)\%. \quad (2.6)$$

Приклад 1. Визначити вміст фериту по діаграмі Шеффлера і розрахунком за умови, що наплавлений метал має наступний хімічний склад (у ваг. %): C = 0,06; Mn = 1,1; Ni = 10,2; Cr = 20,5; Si = 0,6; Mo = 2,6.

1. Еквіваленти нікелю та хрому за формулами (2.3 і 2.4) складають:

$$A = 0,06 \cdot 30 + 10,2 + 1,1 \cdot 0,5 = 12,5\%;$$

$$\Phi = 20,5 + 0,6 \cdot 1,5 + 2,6 = 24\%.$$

Розраховані координати точки відповідають на діаграмі (рис. 2.1) аустенітно-феритної структурі металу з вмістом 17% фериту.

2. Розрахунковий вміст хрому за формулою (2.5) складає:

$$[Cr]_p = 0,9 \cdot 12,5 + 7,5 = 18,7\%,$$

тобто еквівалент хрому, визначений по діаграмі $\Phi = 24\%$ більше розрахункового $[Cr]_p$, отже, наплавлений метал має двофазну структуру та вміст фериту за формулою (2.6) становить:

$$a = (24 - 18,7) \cdot 3 = 15,9\%.$$

Отримані результати по діаграмі (17%) та розрахунком (~16%) досить близькі і практично рівноцінні.

Однак при наявності в наплавленому металі феритоутворюючих елементів, які є одночасно сильними карбідоутворювачами (Nb, Ti та ін), слід враховувати можливість утворення стійких карбідів (NbC, TiC та ін), так як це суттєво змінює величини еквівалентних значень нікелю та хрому в порівнянні з отриманими розрахунками по формулам (2.3) та (2.4) без урахування утворюючихся карбідів.

Приклад 2. Визначити вміст фериту в наплавленому металі по діаграмі Шеффлера без урахування і з урахуванням утворення карбідів, якщо наплавлений метал має наступний хімічний склад (у ваг. %): C = 0,1; Si = 0,4; Mn = 1,6; Ni = 10,8; Cr = 21,5; Nb = 1,0.

1. Еквівалентне значення хрому і нікелю за формулами (2.3) та (2.4) без урахування утворення карбідів ніобію становлять:

$$A = 0,1 \cdot 30 + 1,6 \cdot 0,5 + 10,8 = 14,6\%;$$

$$\Phi = 0,4 \cdot 1,5 + 21,5 + 1 \cdot 0,5 = 22,6\%.$$

2. Розраховані координати точки відповідають по діаграмі Шеффлера (рис. 2.1) аустенітно-феритній структурі наплавленого металу з вмістом фериту 6%.

3. При наявності в наплавленому металі ніобію будуть утворюватися карбіди NbC зі стехіометричним співвідношенням:

$$\frac{\text{Nb}}{\text{C}} = \frac{92,9}{12} \approx 8$$

4. Вважаючи, що межа розчинності вуглецю в твердому розчині становить 0,02%, визначаємо кількість надлишкового вуглецю, здатного утворювати карбіди ніобію:

$$C_K = 0,1 - 0,02 = 0,08\%.$$

5. Отримана кількість вуглецю здатне витратити ніобію на освіту карбідів:

$$\text{Nb}_K = 0,08 \cdot 8 = 0,64\%.$$

6. Кількість вільного феритоутворюючого ніобію складе:

$$\text{Nb}_K = 1,0 - 0,64 = 0,36\%.$$

7. Еквівалентне значення хрому і нікелю з урахуванням утворення карбідів ніобію становлять:

$$A = 0,02 \cdot 30 + 1,6 \cdot 0,5 + 10,8 = 12,2\%;$$

$$\Phi = 0,4 \cdot 1,5 + 21,5 + 0,36 \cdot 0,5 = 22,28\%.$$

8. Розрахункові координати точки відповідають по діаграмі Шеффлера (рис. 2.1) аустеніто-феритній структурі наплавленого металу з вмістом фериту 11%, тобто майже в два рази більше спочатку розрахованої кількості.

Хімічний склад наплавленого металу залежить як від хімічного складу електродного матеріалу, так і від хімічного складу і частки участі в металі шва основного металу. Частка основного металу залежить від типу розроблення та кількості наплавлених валиків при заповненні розроблення (табл. 2.1). При розрахунку еквівалентного вмісту аустеніту і фериту необхідно перш за все визначити дійсний хімічний склад металу даного шва або наплавленого валика [1, 2, 4-7].

Таблиця 2.1 – Частка участі основного металу в складі шва при ручного дугового зварювання та наплавленні, (в %)

№ шар шву	При зварюванні з кутом оброблення кромки			При наплавленні
	15°	60°	90°	
1	48-50	43-45	40-43	30-35
2	40-43	35-40	25-30	15-20
3	36-39	25-30	15-20	8-12

2.3 Контрольні запитання для самоперевірки і контролю підготовленості студентів до роботи

1. Причини утворення гарячих тріщин при зварюванні аустенітних сталей.
2. Механізм подавлення гарячих тріщин шляхом утворення двофазної структури в металі шва.
3. Оптимальний вміст дельта-фериту в металі шву при зварюванні аустенітних сталей.
4. Типи електродів для зварювання аустенітних сталей.
5. Склад покриття електродів.
6. Як визначити частку участі основного металу в металі шва?

7. Розрахункове визначення хімічного складу та структури металу зварних швів при одношаровому і багатошаровому зварюванні.

Завдання № 1.

1. Визначити хімічний склад при наплавленні валиків і зварюванні встик і структурний стан металу шва (пошарово) з урахуванням розведення основним металом.

2. Вибрати оптимальний тип електрода для заданої сталі при зварюванні в 1, 2, 3, 4, 5 шари (за завданням викладача), при зварюванні одношарового кореневого шва.

3. Обґрунтувати склад електродного покриття і, при необхідності, ввести до складу покриття феросплави та порошки металів для отримання в структурі металу шва 2%, 5%, 7%, 10%, дельта-фериту (марка сталі, розробка, кількість шарів, тип і марка електрода) за вказівкою викладача.

Підваріанти вказані в клітинах таблиці 2.2:

- 1) наплавлення в 3 шари;
- 2) зварювання в 3 шари, V-подібна розробка 60 градусів;
- 3) зварювання в 4 шари, V-подібна розробка 90 градусів;
- 4) зварювання в 5 шари, V-подібна розробка 60 градусів.

Приклад: варіант 1А. 3: варіант 10Е. 3.

Завдання №2.

Вибрати електроди, режим зварювання, розрахувати структурний стан металу шва, розрахувати фтористо-кальцієве покриття для наступних зварних виробів:

ЗАВДАННЯ 1. Ємність зі сталі 12Х18Н10Т товщиною 12 мм для зберігання 65% азотної кислоти.

ЗАВДАННЯ 2. Ємність із сталі 10Х17Н13М2Г товщиною 10 мм для зберігання 65% азотної кислоти.

ЗАВДАННЯ 3. Цистерна для перевезення 30% сірчаної кислоти зі сталі 12Х18Н10Т товщиною 10 мм.

ЗАВДАННЯ 4. Цистерна для перевезення 30% сірчаної кислоти зі сталі 08Х18Н12Т товщиною 12 мм.

ЗАВДАННЯ 5. Випарний циклон для випарювання лугу зі сталі 10Х23Н18 товщиною 10 мм.

ЗАВДАННЯ 6. Випарний циклон для випарювання лугу зі сталі 08Х22Н6Т товщиною 12 мм.

ЗАВДАННЯ 7. Автоклав для 40% їдкого натру зі сталі 10X17H13M2T товщиною 40 мм.

Таблиця 2.2 – Варіанти завдань

№ варіанту	Сталь	12X18H10T	10X17H13M2Г	07X16H6	08X22H5T	10X28H18	11X16H25AM
	Електрод	А	Б	В	Г	Д	Е
1	ОЗЛ-8	3	2	4	3	2	1
2	ЦЛ-11	2	3	2	4	3	2
3	ЦЛ-4	4	2	3	2	4	3
4	ЦЛ-9	3	4	2	3	2	4
5	ОЗЛ-11	2	3	4	2	3	2
6	ОЗЛ-17У	1	2	3	4	2	3
7	ЗИО-3			2	3	4	2
8	ЭА-395/9	1	1	1	1	2	2
9	НЖ-13	3	2	3	4	3	4
10	ЭА-400/109	2	2	2	3	3	3

ПРАКТИЧНА РОБОТА №3

ВИБІР ЕЛЕКТРОДІВ ДЛЯ ЗВАРЮВАННЯ АУСТЕНІТНИХ СТАЛЕЙ З ПЕРЛІТНИМИ

3.1 Мета роботи

Опанувати методику вибору електродів для зварювання аустенітних сталей з перлітними.

3.2 Загальні відомості

Для наближеного розрахунку вмісту дельта-фериту в шві використовують структурну діаграму Шеффлера та формули для розрахункового вмісту еквівалентів хрому та нікелю:

$$\Phi = \% \text{Cr} + 1,5\% \text{Si} + 0,5\% \text{Nb} + \% \text{Mo} + \% \text{V} + 3,5\% \text{Ti}, \quad (3.1)$$

$$A = \% \text{Ni} + 30\% \text{Cr} + 0,5\% \text{Mn} + 30\% \text{N}. \quad (3.2)$$

Граничні умови існування металу з однофазною аустенітною та двофазною аустеніто-феритною структурою виражені лінійними залежностями:

$$[\text{Cr}]_p = 0,9 \cdot A + 7,5\%. \quad (3.3)$$

Якщо еквівалент хрому Φ менше розрахункового вмісту $[\text{Cr}]_p$ то сталь має однофазну аустенітну структуру, якщо більше, то сталь має двофазну структуру, кількість дельта ферита в цьому випадку розраховується за формулою:

$$\text{Ферит} = 3 \cdot (\Phi - [\text{Cr}]_p)\% \quad (3.4)$$

Оскільки основний метал аустенітних сталей ідентичний, або близький по складу до наплавленого, то доля участі основного металу відіграє значно меншу роль, ніж при зварюванні різнорідних сталей. При зварюванні різнорідних сталей доля основного металу може

суттєво змінюватись від шару до шару та при багатошаровому зварюванні може істотно змінити структуру, хімічний склад та властивості металу шва по його перетину. Наближено долю участі основного металу в формуванні шва при ручному зварюванні та наплавленні можна оцінити по даним таблиці 3.1. Частка участі основного металу можна визначити в кожному конкретному випадку розрахунковим шляхом.

Таблиця 3.1 – Частка участі основного металу в складі шва, в %

№ Шару шва	При зварюванні з'єднань з кутом розробки, °			При наплавленні
	15	60	90	
1	48-50	43-45	40-43	30-35
2	40-43	35-40	25-30	15-20
3	36-39	25-30	15-20	8-12
4	35-37	20-25	12-15	4-6
5	33-36	17-22	8-12	2-3
6	32-36	15-20	6-10	<2
7-10	30-35	-	-	-

Можливі поєднання вуглецевих та низьколегованих сталей (гр. I-VI) з аустенітними та ферито-аустенітними хромонікелевими сталями (гр. X-XIV) приведені в таблиці 3.2.

Склади та структурний стан перехідних зон та металів шва в результаті змішування перлітної сталі з металом, наплавленим різними аустенітними електродами різних типів при зварюванні перлітної сталі, та ступені проплавлення та перемішування основного металу в межах 20-40% приведені на рисунок 3.1.

З'єднавши точку П, яка відповідає складу та структурі перлітної сталі, з точками, які відповідають металу, наплавленому електродами різних типів, отримаємо лінії можливих проміжних складів металу шва при різній ступені перемішування аустенітного наплавленого металу с основним перлітним. Хімічний склад наплавленого металу при зварюванні аустенітним електродом приведений в [2, 5, 10].

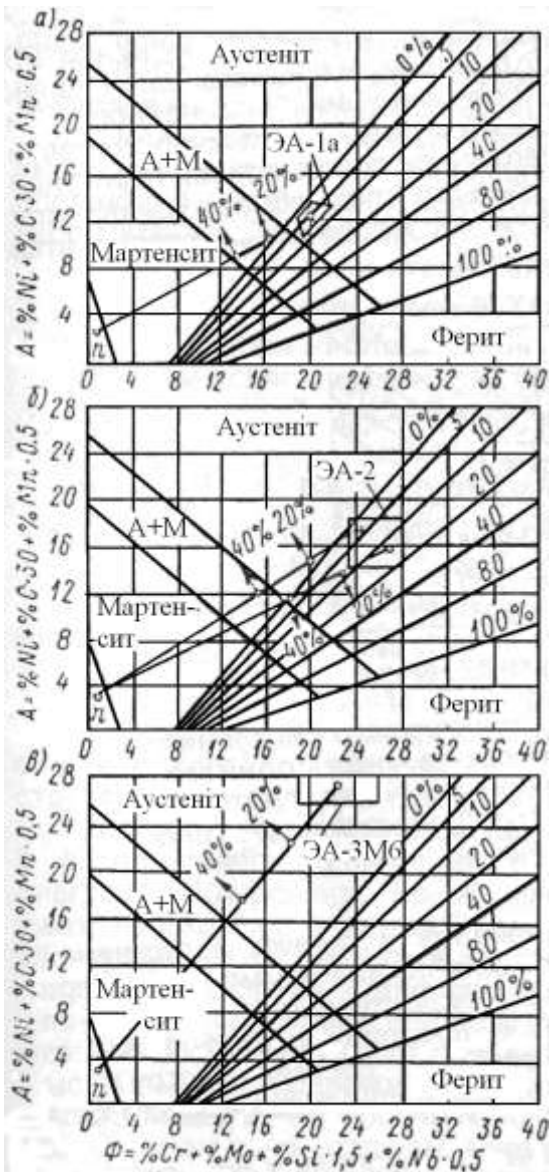


Рисунок 3.1 – Визначення структурного стану зварних швів при зварюванні перлітної сталі аустенітними електродами типу ЭА-1а (а), ЭА-2 (б) та ЭА3М6 (в)

Таблиця 3.2 – Вибір електродів для різнорідних зварних з'єднань зі сталей перлітного та аустенітного (ферито-аустенітного) класів

Група сталі		Типи електродів при поєднанні сталей				
Найменування	№	X	I XI	XII	XIII	XIV
Низьковуглецеві	I	ЭА-1Г6	А-3М6	ЭА-2		ЭА-3М6
					ЭА-3М6	
		ЭА-2Г6	ЭА-1М2Ба		ЦТ-28	ЭАФ-1МФ
		ЭА-3М6				
		ЭА-1М2				
Середньовуглецеві та низьколеговані	II	ЭА-1Г6	ЭА-3М6	ЭА-2	ЭА-3М6	ЭА-3М6
		ЭА-2Г6	ЭА-1М2Ба		ЦТ-28	ЭАФ-1МФ
		ЭА-3М6				
		ЭА-1М2				
Низьколеговані спеціального призначення	III	ЭА-3М6	ЭА-3М6	ЭА-3М6	ЭА-3М6	ЭА-3М6
		ЭА-981/15	ЭА-981/15			ЭАФ-1МФ
		ЭА-1М2	ЭА-1М2			
Середньовуглецеві та низьколеговані підвищеної міцності	IV	ЭА-1Г6	ЭА-1Г6	ЭА-2	ЭА-3М6	ЭА-3М6
		ЭА-3М6	ЭА-3М6		ЦТ-28	ЭАФ-1МФ
		ЦТ-28	ЦТ-28			ЦТ-28
Теплостійкі хромо молібденові	V	ЭА-2	ЭА-2	ЭА-2	ЭА-2	ЭА-3М6
		ЭА-3М6	ЭА-3М6		ЭА-3М6	ЭАФ-1МФ
		ЭА-1М2Ба	ЭА-1М2Ба		ЦТ-28	
		ЦТ-28	ЦТ-28			
Теплостійкі хромо молібденова надієві	VI	ЭА-2	ЭА-2	ЭА-2	ЭА-2	ЭА-3М6
		ЭА-3М6	ЭА-3М6			ЭАФ-1МФ
		ЭА-1М2Ба	ЭА-1М2Ба			ЦТ-28
		ЦТ-28	ЦТ-28			

Склади та структури, які відповідають частці участі основного металу в формуванні шва в межах 20-40%, відмічені стрілками та цифрами. При зварюванні електродами типу ЭА-1а, ЭА-1Ба, ЭА-1М2Фа та іншими, які забезпечують наплавлений метал з вмістом феритної фази в межах 2,5-5%, метал шва при перемішуванні з перлітною сталлю буде мати аустеніто-мартенситну структуру (рис 3.1, а), тобто, можливе утворення тріщин, особливо при зварюванні деталей великої товщини або жорстко закріплених. Тому електроди

типу ЭА-1а, ЭА-1Ба, ЭА-1М2Фа та інші, які забезпечують метал з малим вмістом α -фази (~5%), застосовувати для зварювання перлітних, вуглецевих та низьколегованих сталей не рекомендовано.

При використанні електродів типу ЭА-2 або ЭА-1М2, ЭА-1М2Б та інших, які містять в наплавленому металі феритну фазу в широких межах (5-15%), виключається можливість утворення мартенситної структури в шві при вмісту фериту на верхній межі (~10%). В цьому випадку при перемішуванні перлітної сталі з електродним металом у шві зберігається двофазна аустеніто-феритна структура, стійка проти утворення холодних та гарячих тріщин (рис. 3.1, б). Але при вмісті фериту на нижній межі (~5%), навіть при невеликому проплавленні основного металу (~20%), у шві утворюється однофазна аустенітна структура, яка схильна до утворення гарячих тріщин.

Отже, електроди типів ЭА-2, ЭА-1М2, ЭА-1М2Б та інші, можуть застосовуватися для зварювання перлітної сталі тільки вибірково, з контролем вмісту фериту в наплавленому металі.

Електроди типів ЭА-3М6, ЭА-3М9 та інші з підвищеним запасом аустенітності, леговані молібденом ($\geq 6\%$), забезпечують наплавлений метал із достатньо великою технологічною міцністю та допускають при зварюванні перлітних сталей найбільшу ступінь проплавлення та перемішування наплавленого металу з основним без небезпеки утворення тріщин. Навіть при ступені перемішування до 50% у швах зберігається однофазна аустенітна структура з досить високим вмістом молібдену, що забезпечує її стійкість проти утворення гарячих тріщин (рис. 3.1, в). Тому застосування електродів типів ЭА-3М6 та ЭА-3М9 найбільш раціонально при зварюванні перлітних сталей аустенітними електродами.

З діаграми Шеффлера (рис. 3.1) видно також, що для даного поєднання різнорідних сталей (аустеніт-перліт) застосування перлітних електродів неприпустимо, тому що навіть при малому проплавленні аустенітної сталі (до 10%) в перлітному шві утворюється мартенситна структура з високою твердістю, тому можливе утворення холодних тріщин.

Позитивно впливає на технологічну міцність однофазних аустенітних швів легування марганцем. Тому електроди типів ЭА-1Г6 та ЭА-2Г6, які забезпечують наплавлений метал, легований 5-7% марганцю, та володіють достатнім запасом аустенітності, також

можуть використовуватися для зварювання перлітних сталей з аустенітними (табл. 3.2).

Діаграма Шеффлера дозволяє також здійснювати попередню оцінку складу металу шва, якщо різні за структурою сталі зварюються електродами, які дають наплавлений метал, що відрізняється за складом і структурою від обох зварюваних сталей.

На рисунку 3.2 наведено приклад визначення складу металу багатшарового стикового шва при зварюванні перлітної сталі зі сталлю 12Х18Н9Т електродами типу ЭА-3М6.

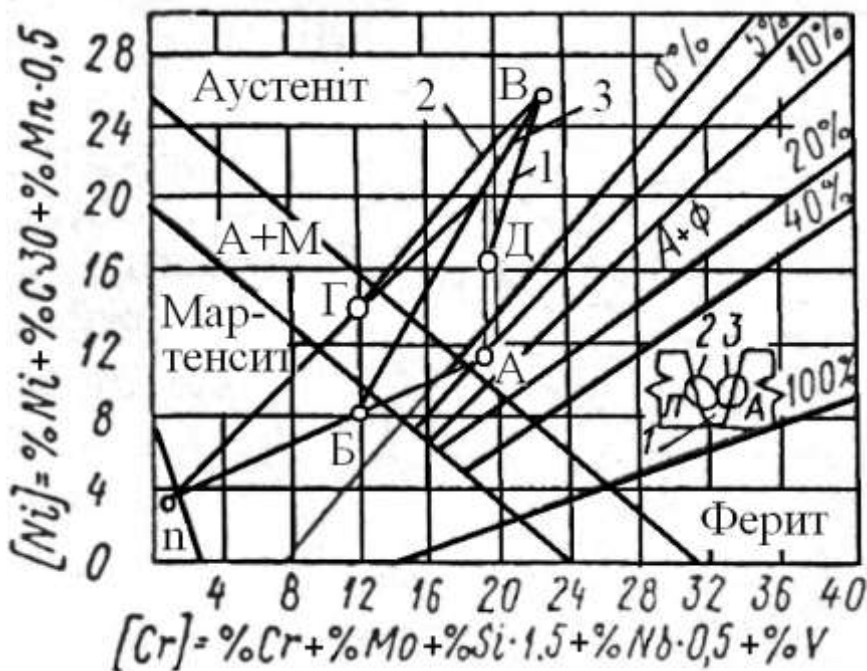


Рисунок 3.2 – Визначення структурного стану кореневого та наступних шарів багатшарового стикового шва при зварюванні маловуглецевої перлітної сталі з аустенітною електродами типу ЭА-3М6

При ступені проплавлення перлітної сталі (точка П), що дорівнює 40% і аустенітної сталі 12Х18Н9Т (точка А) – 60% (виходячи з різниці коефіцієнтів теплопровідності), склад розплавленого і перемішаного основного металу буде відповідати

точці Б, з'єднавши яку з точкою В, яка відповідає складу металу наплавленого електродами типу ЭА-3М6, і відклавши на лінії БВ відрізок 1, отримаємо склад і структуру кореневого шару шва, що відповідає ступеню перемішування основного і наплавленого металів в межах 20-40%. Аналогічно склад і структура другого шару, що утворюється при проплавлення перлітної сталі та кореневого шару, а також третього шару, що утворюється при проплавленні аустенітної сталі і кореневого шару, визначається відрізками 2 і 3.

При виборі зварювальних матеріалів та оцінці допустимого ступеня проплавлення основного металу за діаграмою Шеффлера слід враховувати можливість істотної зміни хімічного складу металу шва в межах одного фазового складу, а також значного коливання складу та структури наплавленого металу в межах, встановлених для даного типу електродів.

На ступінь проплавлення основного металу також істотно впливають технологічні фактори та форма розробки кромки зварного з'єднання (табл. 3.1).

Ступінь проплавлення зменшується при зварюванні аустенітними електродами в порівнянні з перлітними: зі збільшенням запасу аустенітності застосовуваних аустенітних електродів; зі зменшенням діаметра застосовуваних електродів при однаковій щільності струму; при зниженні щільності струму; при збільшенні кута розробки, зазору між кромками і т. п.

Показано, що при зварюванні перлітних сталей аустенітними електродами всі перелічені фактори можуть змінювати ступінь проплавлення в межах 20-45%. Тому попередню оцінку хімічного і фазового складів металу багатошарових зварних швів в залежності від хімічного складу зварюваних сталей і застосовуваних електродів (з урахуванням виду з'єднання і кількості шарів шва) необхідно виконувати розрахунковим способом з перевіркою результатів розрахунку по діаграмі Шеффлера. Це дає можливість більш точно оцінити правильність вибору електродів.

Приклад. Необхідно вибрати електроди для зварювання аустенітної сталі 08X18H10T з перлітною сталлю 10XCHД, які мають наступний хімічний склад (в %): 08X18H10T – 0,08 С; 0,6 Si; 1,2 Mn; 18,4 Cr; 9,6 Ni; 10XCHД – 0,10 С; 0,8 Si; 0,6 Mn; 0,7 Cr; 0,8 Ni; 0,2 Cu.

Товщина зварюваних листів 8 мм, з'єднання стикове з V-подібною розробкою кромки (60°), зварювання виконується в три шари.

1. Визначаємо частку участі основного та наплавленого металів в першому (кореновому) шарі шва.

Відповідно до таблиці 3.2 при зварюванні першого шару стикового шва з кутом розробки 60° частка участі основного металу становить 45%. Внаслідок різної теплопровідності зварюваних сталей, ступінь проплавлення (K) перлітної сталі 10ХСНД складе приблизно 40% та аустенітної 08Х18Н10Т відповідно 60% від частки основного металу, тобто:

- частка сталі 10ХСНД $\Psi_n = 45 \cdot 0,4 = 18\%$;
- частка сталі 08Х18Н10Т $\Psi_a = 45 \cdot 0,6 = 27\%$;
- частка наплавленого металу $100 - (18 + 27) = 55\%$.

2. Вибираємо для зварювання електроди марки 04Х4Н9

УОНИ-13/НЖ-2 (тип ЭА-1а), що забезпечують наплавлений метал, близький за складом до сталі 0Х18Н10. Хімічний склад металу, наплавленого обраними електродами, наступний (в %): 0,07 С; 0,9 Si; 1,7 Mn; 19,0 Cr; 8,5 Ni [2].

3. Обчислюємо хімічний склад першого шару металу шва

$$X_{\text{МШ}} = \Psi X_{\text{ОМ}} + (1 - \Psi) X_{\text{НМ}},$$

де $X_{\text{МШ}}$, $X_{\text{ОМ}}$, $X_{\text{НМ}}$ – відповідно вміст вуглецю або іншого шуканого елемента в металі шва, основному та наплавленому металах;

Ψ – частка участі основного металу в металі шва.

Тоді хімічний склад металу шва при зварюванні першого шару буде (в %):

$$C_{\text{МШ}} = (0,27 \cdot 0,08 + 0,18 \cdot 0,1) + 0,55 \cdot 0,07 = 0,08;$$

$$Si_{\text{МШ}} = (0,27 \cdot 0,6 + 0,18 \cdot 0,8) + 0,55 \cdot 0,9 = 0,80;$$

$$Mn_{\text{МШ}} = (0,27 \cdot 1,2 + 0,18 \cdot 0,6) + 0,55 \cdot 1,7 = 1,37;$$

$$Cr_{\text{МШ}} = (0,27 \cdot 18,4 + 0,18 \cdot 0,7) + 0,55 \cdot 19 = 15,54;$$

$$Ni_{\text{МШ}} = (0,27 \cdot 9,6 + 0,18 \cdot 0,8) + 0,55 \cdot 8,5 = 7,4.$$

4. Обчислюємо еквіваленти хрому та нікелю (в %) за формулами (2.1) і (2.2):

$$\Phi = 15,54 + 0,8 \cdot 1,5 = 16,7,$$

$$A = 7,44 + 0,08 \cdot 30 + 1,37 \cdot 0,5 = 10,4.$$

Отримані результати розрахунку наносимо на діаграму Шеффлера, з якої видно, що в структурі металу шва буде утворюватися мартенсит, що може привести до утворення тріщин.

Отже, вибрані електроди марки $\frac{04X4H9}{УОНИ-13/НЖ-2}$ з зазначеним складом наплавленого металу непридатні для зварювання сталей 08X18H10T і 10XCHД.

5. Вибираємо електроди, що дають наплавлений метал з більш високим вмістом хрому та нікелю – марки $\frac{07X25H13}{УОНИ-13/НЖ-2}$ (тип ЭА-2, рис. 3.2), який при перемішуванні з розплавленою низьколегованою сталлю може забезпечити одержання в шві двофазної аустеніто-феритної структури, стійкої проти утворення тріщин.

Вибрані електроди мають наступний хімічний склад наплавленого металу (в %): 0,11 С; 1,0 Si; 2,0 Mn; 26,5 Cr; 12,5 Ni.

6. Обчислюємо хімічний склад першого шару шва (в %):

$$C_{\text{МШ}} = (0,27 \cdot 0,08 + 0,18 \cdot 0,1) + 0,55 \cdot 0,11 = 0,10;$$

$$Si_{\text{МШ}} = (0,27 \cdot 0,6 + 0,18 \cdot 0,8) + 0,55 \cdot 1,0 = 0,86;$$

$$Mn_{\text{МШ}} = (0,27 \cdot 1,2 + 0,18 \cdot 0,6) + 0,55 \cdot 2,0 = 1,53;$$

$$Cr_{\text{МШ}} = (0,27 \cdot 18,4 + 0,18 \cdot 0,7) + 0,55 \cdot 26,5 = 19,7;$$

$$Ni_{\text{МШ}} = (0,27 \cdot 9,6 + 0,18 \cdot 0,8) + 0,55 \cdot 12,5 = 9,6.$$

7. Обчислюємо еквіваленти хрому і нікелю першого шару металу шва (в %):

$$\Phi = 19,74 + 0,86 \cdot 1,5 = 21,0,$$

$$A = 9,64 + 0,10 \cdot 30 + 1,53 \cdot 0,5 = 13,4.$$

Отримані значення еквівалентів хрому та нікелю відповідають по діаграмі Шеффлера двофазній аустеніто-феритній структурі з вмістом 6-7% фериту.

Отже, електроди марки $\frac{07X25H13}{УОНИ-13/НЖ-2}$ з зазначеним складом наплавленого металу придатні для зварювання першого шару

шва. Це може бути підтверджено також розрахунком за формулами (3.1) і (3.2) без використання структурної діаграми Шеффлера.

Розрахунковий вміст хрому, який відповідає граничним умовам існування металу з однофазною та двофазною аустеніто-феритною структурою, за формулою (3.3) становить:

$$[\text{Cr}]_p = 0,9 \cdot 13,4 + 7,5 = 19,56\%.$$

Так як еквівалент хрому $\Phi = 21,0\%$, тобто більше розрахункового $[\text{Cr}]_p$, то метал шва має двофазну аустеніто-феритну структуру та кількість фериту згідно (3.4):

$$\alpha = 3 \cdot (21,0 - 19,56) = 5\%.$$

Отриманий результат досить близький та практично рівноцінний визначеному за діаграмою Шеффлера.

8. Визначаємо частку участі основного та наплавленого металів у наступних шарах шва.

Частка основного металу в формуванні шва буде зменшуватися в міру збільшення кількості його шарів і для останнього, третього шару буде складати (табл. 3.1) близько 30%, отже:

$$\text{- частка сталі 10ХСНД } \Psi_{\text{шп}} = 30 \cdot 0,4 = 12\%;$$

$$\text{- частка сталі 08Х18Н10Т } \Psi_{\text{ша}} = 30 \cdot 0,6 = 18\%;$$

$$\text{- частка наплавленого металу } 100 - (12 + 18) = 70\%.$$

9. Обчислюємо хімічний склад третього шару шва (в %):

$$C_{\text{МШ}} = (0,18 \cdot 0,08 + 0,12 \cdot 0,1) + 0,7 \cdot 0,11 = 0,10;$$

$$Si_{\text{МШ}} = (0,18 \cdot 0,6 + 0,12 \cdot 0,8) + 0,7 \cdot 1,0 = 0,90;$$

$$Mn_{\text{МШ}} = (0,18 \cdot 1,2 + 0,12 \cdot 0,6) + 0,7 \cdot 2,0 = 1,69;$$

$$Cr_{\text{МШ}} = (0,18 \cdot 18,4 + 0,12 \cdot 0,7) + 0,7 \cdot 26,5 = 21,94;$$

$$Ni_{\text{МШ}} = (0,18 \cdot 9,6 + 0,12 \cdot 0,8) + 0,7 \cdot 12,5 = 10,57.$$

10. Обчислюємо еквіваленти хрому та нікелю третього шару металу шва:

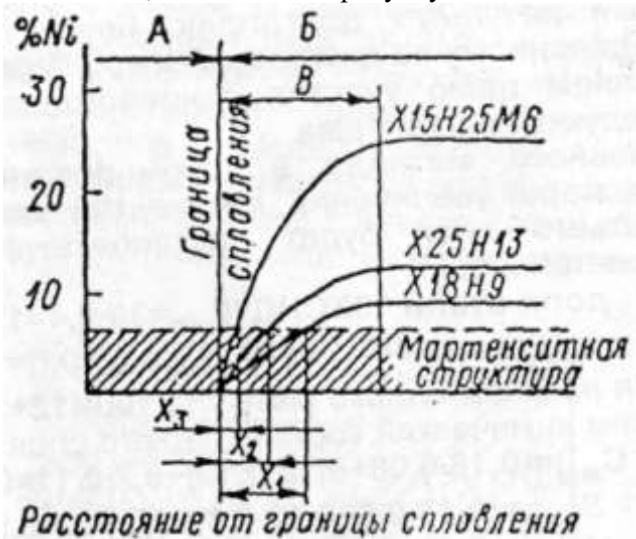
$$\Phi = 0,21,94 + 0,9 \cdot 1,5 = 23,3\%$$

$$A = 10,57 + 0,10 \cdot 30 + 1,69 \cdot 0,5 = 14,4\%.$$

Отримані значення еквівалентів хрому та нікелю відповідають по діаграмі Шеффлера аустеніто-феритній структурі з вмістом 8-9% фериту, що може бути підтверджено також розрахунком за

формулами (3.1) і (3.2) без діаграми, тобто практично співпадають з результатом, визначеним за діаграмою Шеффлера. Крім можливості утворення тріщин у швах необхідно враховувати при виборі електродів для зварювання різнорідних сталей також можливість утворення крихких кристалізаційних і дифузійних прошарків у зоні сплавлення. Ширина цих прошарків в більшій мірі залежить від складу металу шва та, в першу чергу, від вмісту в ньому нікелю.

Вплив вмісту в шві нікелю на ширину крихких кристалізаційних прошарків поблизу зони сплавлення з перлітною сталлю наочно ілюструється схемою, наведеною на рисунку 3.3.



А, Б – зварювані елементи; В – ширина зони сплавлення; X1, X2, X3 – ширина мартенситного прошарку

Рисунок 3.3 – Схема визначення ширини крихких кристалізаційних прошарків у зоні сплавлення перлітної сталі з аустенітних швом в залежності від вмісту нікелю в шві

Якщо умовно прийняти, що мартенситна структура в зоні перехідних кристалізаційних прошарків буде утворюватися при вмісті нікелю менше 5-6%, то ширина цих прошарків буде тим менша, чим більше вміст нікелю у зварювальних електродах.

При використанні електродів з нікелевою основою (наприклад, з покриттями марок ЦТ-28, ЦТ-36, АНЖР-1, які виготовляються на основі дротів Св-06Х15Н60М15, ЕП-705 і ЕП-606 відповідно), крихкі

кристалізаційні прошарки практично будуть відсутні.

Отже, для зменшення ширини крихких кристалізаційних прошарків у зоні сплавлення перлітної сталі з аустенітним швом необхідно використовувати електроди з великим запасом аустенітності. При відносно постійному вмісті хрому в переважній більшості застосовуваних марок електродів - у межах 15-20%, запас аустенітності наплавленого металу залежить, в основному, від вмісту нікелю в електродах [2, 4-6, 8-10].

3.3 Контрольні запитання для самоперевірки і контролю підготовленості студентів до роботи

1. Які виникають проблеми при зварюванні аустенітних сталей з перлітним?

2. Як зменшити крихкі прошарки при зварюванні аустенітних сталей з перлітними?

3. Яку структуру повинен мати метал шва при зварюванні аустенітних сталей з перлітними?

4. Типи електродів для зварювання аустенітних сталей з перлітними.

3.4 Завдання

Варіант завдання вибирається по таблиці 3.3 відповідно до вказівки викладача.

Підваріанти:

- 1) товщина металу 5 мм, кут розробки 15° , зварювання в 2 шари;
- 2) товщина металу 8 мм, кут розробки 60° , зварювання в 3 шари;
- 3) товщина металу 10 мм, кут розробки 90° , зварювання в 4 шари;
- 4) товщина металу 12 мм, кут розробки 60° , зварювання в 5 шарів.

Таблиця 3.3 – Варіанти завдання

№	Сталь	А	Б	В	Г	Д	Є
		15ХМ	30ХГС	15ХСНД	20ХЗНВФ	15Х1М1Ф	30Х2ГМ2
1	07Х16Н6	2	1	3	3	4	3
2	08Х22Н6Т	3	2	4	1	3	2
3	08Х21Н6М2Т	1	3	2	3	2	4
4	12Х18Н10Т	2	4	3	2	2	1
5	10Х17Н13М2Т4	4	3	2	3	2	1
6	10Х23Н18	3	2	2	4	3	2
7	06Х2Н28М3ДЗТ	2	3	4	1	2	1

ПРАКТИЧНА РОБОТА №4

ВИЗНАЧЕННЯ СХИЛЬНОСТІ СТАЛЕЙ ТА СПЛАВІВ ДО МІЖКРИСТАЛІЧНОЇ КОРОЗІЇ

4.1 Мета роботи

Вивчити способи визначення схильності сталей до міжкристалічної корозії. Провести випробування зварних зразків сталі 12X18H10T.

4.2 Загальні відомості

4.2.1. Визначення схильності сплавів до міжкристалічної корозії

Міжкристалічна корозія – один з небезпечних видів електрохімічного руйнування, що призводить до різкого зниження механічних властивостей металу без видимої зміни його зовнішнього вигляду.

У процесі виготовлення апаратури та устаткування з корозійностійких сталей, внаслідок неправильної термічної обробки або при зварюванні можуть виникати умови, які викликають міжкристалічну корозію. За сучасними уявленнями переважно руйнування меж зерен обумовлено електрохімічною неоднорідністю поверхні, що виникає в визначеному для даного сплаву інтервалі температур в результаті структурних перетворень. Наприклад, при нагріванні хромонікелевих сталей при 600-800 °С відбувається виділення з твердого розчину складних карбідів, які містять хром, залізо та нікель. Ці карбіди випадають переважно на границі зерен, що призводить до збіднення окремих ділянок сплаву хромом. Найбільш сильне збіднення спостерігається в зоні, яка знаходиться безпосередньо коло границі зерна. Є й інші чинники, що сприяють міжкристалічній корозії. Наприклад, для корозійностійких сталей, що містять молібден, велике значення набуває виділення σ -фази, також сприяє збіднення хромом прилеглих до границі ділянок. Перерозподіл хрому в корозійностійких сталях можливий і в результаті випадіння високохромистого фериту - продукту розпаду аустеніту, що викликає міжкристалічну корозію, наприклад, зварних швів. Існує думка, що на

схильність до міжкристалічної корозії впливають також і внутрішні напруження.

Тому при прискорених корозійних випробуваннях для виявлення схильності сплавів до міжкристалічної корозії застосовують електроліти, які розчиняють збіднені хромом границі зерен, залишаючи в пасивному стані саме зерно. На цьому принципі створені методи прискорених випробувань, що увійшли до ГОСТ 6032-75: АМ, АМУ, В, ВУ, ДУ і Б.

Методом АМ випробують зразки в розчині, що містить 160 г/дм^3 CuSO_4 і $100 \text{ см}^3/\text{дм}^3$ сірчаної кислоти ($\rho = 1,84$). Випробування проводять у колбах зі зворотним холодильником. На дно колби для створення окислювально-відновлювального потенціалу, рівного $+0,1 \text{ В}$, насапають мідну стружку, що дозволяє одержувати велику швидкість корозії і скорочувати час випробувань. Тривалість випробувань встановлюють залежно від складу сталей: 24 год. для сталей марок 08X17T, 15X25T, 08X17H7M3, 08X22H6T, 08X21H6M2T, 03X16H15M3Б, 09X16H15M3Б, 08X17H13M2T, 10X17H13M2T, 08X17H15M3T, 04X18H10, 08X18H10, 08X18H10T, 06X18H11, 03X18H11, 03XH12, 08X18H12T, 08X18H12Б і 15 год. для 20X13H4Г9, 09X15H8Ю, 07X16H6, 09X17H7Ю, 08X18Г8H2T, 10X14Г4H3, 10X14Г14H4T, 12X17Г9АН4, 12X18H9, 12X18H9T, 12X18H10T, 12X18H10Е, 12X18H12T, 07X2117АН5.

Методом АМУ випробують сталі тих же марок, що і методом АМ, але за більш короткий термін (8 год.). Випробування проводять при температурі кипіння в розчині, що містить 50 г/дм^3 CuSO_4 , $250 \text{ см}^3/\text{дм}^3$ H_2SO_4 ($\rho = 1,84 \text{ г/см}^3$).

Для контролю за методом В у водний розчин сірчаної кислоти міді та сірчаної кислоти замість мідної стружки додають 5 г цинкового пилю. Цей метод використовують для контролю сталі 03X21H21M4ГБ і сплавів 06XH28MДТ і 03XH28MДТ, тривалість випробування 144 год при температурі кипіння.

Для прискорених випробувань методом ВУ сталей тих же марок, що і методом В, застосовують розчин, який складається з $50\% - \text{H}_2\text{SO}_4 + 40 \text{ г/дм}^3 \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$. Тривалість випробувань - 48 год.

Для контролю сталей марок 03X16H15M3, 03X17H14M2, 03X18H11, 03X18H12 використовують метод ДУ. Зразки заливають розчином 65%-ної HNO_3 з розрахунку 9 см^3 розчину на 1 см^2 поверхні зразків. Розчин попередньо витримують протягом 24 год.

Випробування ведуть при температурі кипіння в п'ять циклів по 48 год. Після кожного циклу по зміні маси зразків визначають швидкість корозії. Вважається, що зразки не витримали випробування, якщо швидкість корозії зварного з'єднання або металу після будь-якого циклу перевищує 0,5 мм/рік або якщо на зварних зразках спостерігається ножова корозія.

Нестабілізовані сталі (не містять титану або ніобію) з вмістом вуглецю понад 0,03% слід випробовувати на зразках після термічної обробки (гартування). При використанні сталі без термічної обробки або після термічної обробки по режиму, вказаному в нормативно-технічній документації, випробування слід проводити на зразках після термічної обробки по режиму, погодженому між виробником і споживачем.

Стабілізовані сталі і сплави (містять титан або ніобій) та нестабілізовані сталі і сплави із вмістом вуглецю не більше 0,03% слід випробовувати на зразках після термічної обробки за режимами, вказаними в нормативно-технічній документації на продукцію, і додаткового провокуючого нагріву, який може викликати схильність сталі або сплаву до міжкристалічної корозії.

Допускається на підприємствах – виробниках зварних виробів проводити, але після узгодження зі споживачем, випробування основного металу на зварних зразках.

Зразки всіх стабілізованих сталей і сплавів, а також нестабілізованих сталей та сплавів з низьким вмістом вуглецю (не більше 0,03%), слід піддавати провокуючому нагріву при температурі 650 ± 10 °С. Посадку зразків слід проводити в піч, нагріту до температури провокуючого нагріву. Перед посадкою в піч зразки повинні бути знежирені. Витримка після встановлення в печі температури 650 ± 10 °С – 1 год. Охолодження на повітрі.

4.2.2 Метод відбору зразків

Заготовки для виготовлення зразків слід вирізати:

- зі стрічки, дроту та листового прокату – з будь-якого місця листа;

- з сортового прокату сплаву і трубно́ї заготовки – з осьової зони в поздовжньому напрямку, якщо немає інших умов приведених в нормативно-технічній документації на продукцію;

- з поковок – за нормативно-технічної документації на продукцію.

З відібраних заготовок сталі аустенітного класу і сплавів слід вирізати два зразки.

Розміри зразків по ширині та довжині повинні бути рівними:

- 20×80 мм – для листового прокату, стрічки, поковок, відливок та зварних зразків з одним швом;

- 35×80 мм – для зварних зразків з перехресними швами. Допускаються інші форми та розміри зразків. При випробуванні за методом ДУ допускається застосовувати зразки основного металу меншого розміру, але не менше 25×20 мм і зварних зразків - розміром 20×40 мм.

Підсилення шва не повинно перевищувати 1,5 мм.

Зразки зі зварного з'єднання повинні вирізати відповідно з рисунку 4.1 тип. I. Механічною обробкою з поверхні a слід видаляти шар металу товщиною не більше 1,0 мм.

Допускається вирізати зразки зі звареного з'єднання відповідно до рисунку 4.1 тип. II.

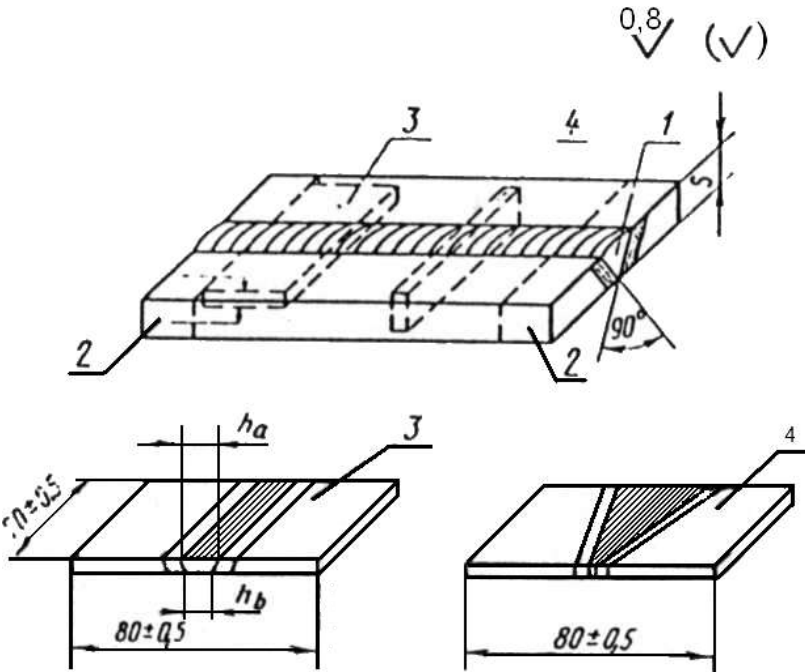
Кількість зразків становить 4 шт., з них контрольних – 2 шт.

При випробуванні зразка типу I контрольною поверхнею слід вважати поверхню внутрішнього шару наплавленого металу (поверхня b); візуальним оглядом після вигину слід піддавати зону h_b шириною 15 мм (рис. 4.1).

Допускається, при узгодженні між виробником та споживачем, контрольною поверхнею вважати поверхню зовнішнього шару наплавленого металу (поверхня a); візуальним оглядом після вигину слід піддавати зону h_a шириною 20 мм (рис. 4.1).

Електроди діаметром менше 3 мм слід контролювати на зварних з'єднаннях сталі, призначеної для виготовлення виробів.

Допускається випробовувати зразки з холоднокатаних сталей і сплавів з необробленою поверхнею і очищати поверхню зразків після провокуючого та інших нагрів, а також після зварювання хімічним або електрохімічним травленням, крім випробувань, які проводяться при розбіжностях в оцінці схильності до міжкристалічної корозії.



1-зварний шов; 2-невикористовувана ділянка шву; 3-зразок типу I; 4-зразок типу II
Рисунок 4.1 – Схема вирізання зразків з пластини зі зварним швом при контролі електродів

Хімічне травлення зразків зі сталей аустенітного, аустнітоферитного класу і сплавів на залізнікелевій основі рекомендується проводити в розчині, що містить 475 г/л азотної кислоти (HNO_3) і 75 г/л фтористого амонію (NH_4F).

Зразки слід травити при температурі 20 ± 5 °С до видалення окалини.

Поверхню зразків з труб після нагрівання допускається обробляти до шорсткості не більше 0,8 мкм за ГОСТ 2789-73 при знятті товщини шару: з холоднодеформованих, теплодеформованих труб не більше 0,1 мм; з гарячедеформованих труб на глибину не більше 0,2 мм.

Поверхня труб спеціального призначення, електрополірованих і особливо тонкостінних додатково оброблятися не повинна. Окалину зі зразків цих труб після провокуючого нагріву слід видаляти електрохімічним або хімічним травленням.

Перед випробуванням зразки слід маркувати. Номер повинен бути вибитий або нанесений електроолівцем (у разі крихких матеріалів) на одному або двох кінцях зразка на відстані 5-10 мм від торця.

4.2.3 Проведення випробувань

1. Метод АМ

1.1. Суть методу полягає у випробуванні зразків сталей у водному розчині міді сірчаною кислотою і сірчаної кислоти з додаванням мідної стружки.

Метод слід застосовувати для контролю сталей марок: 20X13H4Г9, 08X22H6Т, 08X21H6M2Т, 08X18Г8H2Т, 03X16H5M3Б, 08X17H13M2Т, 09X16H15M3Б, 10X17H13M2Т, 10X17H13M3Т, 08X17H15M3Т, 12X18H9, 12X18H9Т, 04X18H10, 08X18H10, 08X18H10Т, 12X18H10Т, 12X18H10Е, 06X18H11, 03X18H12, 08X18H12Т, 12X18H12Т, 08X18H12Б.

Рекомендується застосовувати цей метод для контролю сталей марок: 08X17Т, 15X25Т, 09X15H8Ю, 07X16H6, 09X17H7Ю, 09X17H7Ю1, 08X17H5M3, 10X14Г14H3, 10X14Г14H4Т, 10X14АГ15, 12X17Г9АН4, 07X21Г7АН5.

1.2. Розчин для випробування повинен містити: 160 г міді сірчаною кислотою за ГОСТ 4165-68 або мідного купоросу по ГОСТ 19347-74 (за винятком випробувань, проведених при розбіжностях в оцінці схильності до міжкристалічної корозії), 100 мл сірчаної кислоти густиною 1,835 г/см³ за ГОСТ 4204-66 і 1000 мл води. Випробування слід проводити при наявності мідної стружки. При виготовленні розчину слід розчинити необхідну кількість міді сірчаною кислотою у воді, а потім невеликими порціями додавати сірчану кислоту.

1.3. Випробування слід проводити в колбі зі зворотним холодильником або в бачку з хромонікелевої сталі, стабілізованої титаном або ніобієм, з кришкою, забезпеченою холодильниками; на дно реакційної посудини слід насипати шар мідної стружки, поверх якої слід завантажувати зразки. Допускається завантажувати зразки в кілька рядів за умови забезпечення всебічного контакту з мідною стружкою. Реакційну посудину слід заповнювати розчином приблизно

на 20 мм вище поверхні зразка або шару стружки. Рекомендується кип'ятити безперервно. Не можна допускати нагріву холодильника.

При розбіжностях в оцінці схильності до міжкристалічної корозії випробування слід проводити в скляних колбах безперервно.

Перед випробуванням зразки слід знежирити.

1.4. Після випробування зразки слід промивати водою і просушувати.

Тривалість випробування повинна встановлюватися у залежності від групи сталей:

- 24 год – для сталей марок 08X17T, 15X25T, 08X17H5M3, 08X22H6T, 08X21H6M2T, 03X16H15M3Б, 09X16H15M3Б, 08X17H13M2T, 10X17H13M2T, 10X17H13M3T, 08X17H15M3T, 04X18H10, 08X18H10, 08X18H10T, 06X18H11, 03X18H12, 08X18H12T, 08X18H12Б;

- 15 год – для сталей марок 20X13H4Г9, 09X15H8Ю, 07X16H6, 09X17H7Ю, 08X18Г8H2T, 10X14Г14H3, 10X14Г14H4T, 12X17Г9АН4, 12X18H9, 12X18H9T, 12X18H10T, 12X18H10Е, 12X18H12T, 07X21Г7АН5.

Примітка. По узгодженню між споживачем і виробником при особливих умовах експлуатації металу тривалість випробування зразків може бути збільшена.

1.5. При вимушеній перерві випробування зразки слід витягати з реакційної посудини, промивати й просушувати. Тривалість випробування має обчислюватись як сумарна кількість годин кип'ятіння.

1.6. При відкладанні на зразках шару міді, який не змивається струменем води, видалення його слід проводити промиванням у 20-30%-ному розчині азотної кислоти.

1.7. Допускається багато разів (але не більше п'яти) використовувати розчин за умови збереження кольору розчину, за винятком випробувань, проведених при розбіжностях в оцінці схильності до міжкристалічної корозії.

1.8. Мідну стружку можна використовувати багаторазово.

1.9. Допускається сумісне завантаження зразків сталей по такими групам:

а) 08X17T, 15X25T;

б) 20X13I4Г9, 09X15H8Ю, 07X16H6, 09X17H7Ю, 09X17H7Ю1, 10X14Г14H3, 10X14Г14H4T, 12X17Г9АН4;

в) 08X22H6T, 08X21H6M2T, 08X18Г8H2T, 07X21Г7АН5;

г) 12X18H9T, 08X18H10T, 12X18H10T, 12X18H10E,
08X18H12T, 12X18H12T, 08X18H12Б;

д) 03X16H15M3Б, 09X16H15M3Б, 08X17H13M2T,
10X17H13M2T, 10X17H13M3T, 08X17H13M3T, 08X17H15M3T.

1.10. Для виявлення міжкристалічної корозії після закінчення випробувань зразки повинні бути загнуті на кут 90°.

Вигин слід робити відповідно до ГОСТ 14019-68 і ГОСТ 6996-66.

Радіус закруглення оправки для зразків зі сталей аустенітного класу і сплавів повинен бути не більше однієї товщини зразка. При товщині зразка менш 1 мм допускається радіус оправки рівний 1 мм.

Радіус закруглення оправки для зразків зі сталей феритного, аустенітно-мартенситного та аустенітно-феритного класів повинен бути рівний: 3 мм - при товщині зразків до 1 мм; не більше трикратної (у випадку випробувань, проведених при розбіжностях в оцінці схильності до міжкристалічної корозії триразової товщини) - при товщині зразків від 1 до 3 мм; 10 мм - при товщині зразків більше 3 мм.

Зразки сталей феритного класу завтовшки більше 3 мм допускається згинати на оправці, радіус закруглення якої дорівнює трьом товщинам зразка.

Примітка. Допускається проведення повторних випробувань сталей аустенітного класу і сплавів на оправках, рекомендованих для всіх інших класів сталей.

1.11. При випробуванні зразків, товщина яких не перевищує 5 мм, рекомендується перевіряти обидві поверхні зразків. Для цього згинанням зразку слід надати Z-подібну форму. Вигиб зразків із сталей феритного класу марок 08X17T і 15X25T товщиною 3 мм і менше рекомендується проводити на зразках, нагрітих в киплячій воді або іншим способом до температури 80-120 °С.

При випробуванні зразків з корозійностійкого шару двохшарової сталі і біметалічних труб вигин слід робити таким чином, щоб сторона металу, що примикала до вилученого шару, була після вигину звернена в середину.

1.12. Наявність і глибину міжкристалічної корозії слід встановлювати на протруєного шліфах при збільшенні 400х. Допускається визначати глибину міжкристалічної корозії при

збільшення не менше 200х. Травлення варто робити лише до слабого виявлення меж зерен.

Режими травлення шліфів і реактиви для виявлення міжкристалічної корозії наведені в рекомендованому додатку 2. Шліф слід переглядати з двох сторін (по ширині корозійного зразка); в зварних зразках - з боку контрольної поверхні.

Середню глибину руйнування слід визначати з шести максимальних значень, виявлених в шести полях зору. У ці поля зору повинні бути включені ділянки з найбільшою глибиною міжкристалічної корозії.

1.13. Свідченням схильності до міжкристалічної корозії (при відсутності інших вказівок в нормативно-технічній документації) є руйнування кордонів зерен на середню глибину більше 30 мкм (п. 1.21).

У зразках товщиною менше 1,5 мм за погодженням між виробником і споживачем свідченням схильності до міжкристалічної корозії є руйнування кордонів зерен на глибину менше 30 мкм.

2. Метод АМУ.

2.1. Сутність методу полягає у випробуванні зразків сталей у водному розчині міді сірчаної кислоти і сірчаної кислоти з додаванням мідної стружки.

Метод призначений для контролю сталей марок, перерахованих у метод АМ. Метод є прискореним.

2.2. Розчин для випробувань повинен містити 50 г міді сірчаної кислоти за ГОСТ 4165-68 або мідного купоросу за ГОСТ 19347-74, 250 мл сірчаної кислоти за ГОСТ 4204-66 щільністю 1,835 г/см³ і 1000 мл води. Розчин слід готувати за п. 3.1.2. Випробування повинні проводитися при наявності мідної стружки.

2.3. Тривалість випробувань 8 год при температурі кипіння.

2.4. Випробування слід проводити за пп. 1.3, 1.5-1.9.

2.5. Виявлення міжкристалічної корозії та обробку результатів проводять по пп. 1.10 – 1.13

Примітка. Допускається проводити повторні випробування за методом АМ.

3. Метод В.

3.1. Сутність методу полягає у випробуванні зразків, сталей і сплавів у водному розчині міді сірчаної кислоти і сірчаної кислоти з додаванням цинкового пилу [1, 11, 12].

4.3 Контрольні запитання для самоперевірки і контролю підготовленості студентів до роботи

1. Сутність міжкристалічної та ножової корозії.
2. Зміст і методика проведення випробувань за методами АМ, АМУ, ДУ, їх відмінність.
3. Спосіб підготовки зразків для випробувань.
4. Як виявляються тріщини міжкристалічної корозії.

4.4 Порядок проведення практичної роботи

1. Вивчити методи визначення схильності сталей до міжкристалічної корозії.
2. Пластини зі сталі 12Х18Н10Т зварити електродами діаметром 3 мм марки ЦЛ-11, НЖ-13.
3. Виготовити зразки для випробувань на схильність до МКК згідно ГОСТ 14019-80 розміром 20×20×30 зі зварним швом посередині.
4. Провести кип'ятіння зразків у розчині міді сірчанокислої 50 г/дм³ в 250 см³/дм³ сірчаної кислоти ($\rho=1,84$) методом АМУ за ГОСТ 6032-84, впродовж 8 годин.
5. Для виявлення міжкристалічної корозії зразки згинають під кутом 90 ° на оправці з радіусом 3 мм (ГОСТ 14019-80).
6. По наявності тріщини на поверхні вигнутого зразка зробити висновок про схильність до міжкристалічної корозії.

4.5 Зміст звіту

1. Характеристика основного металу, його хімічний склад.
2. Характеристика електрода.
3. Режим зварювання.
4. Опис методу АМУ.
5. Результати випробувань, їх аналіз.

ПРАКТИЧНА РОБОТА №5

ВИВЧЕННЯ КОРОЗІЙНИХ РУЙНУВАНЬ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ АУСТЕНІТНИХ ХРОМОНІКЕЛЕВИХ НЕРЖАВІЮЧИХ СТАЛЕЙ В АГРЕСИВНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

5.1 Мета роботи

Вивчити види і характер корозійних руйнувань зварних з'єднань аустенітної хромонікелевої нержавіючої сталі типу 12Х18Н10Т в агресивних середовищах.

5.2 Загальні відомості

Нержавіючі сталі широко використовуються для апаратного оформлення технологічних процесів не тільки в хімічній, але і в інших галузях промисловості (глиноземній, целюлозно-паперовій і т.д.). У цих умовах обладнання часто піддається корозійному руйнуванню переважно по зварних з'єднанням.

Розрізняють наступні основні види корозійних руйнувань:

1. Загальна (суцільна) корозія, коли руйнуванню піддається в рівній мірі вся поверхня, що контактує з агресивним середовищем. При цьому може спостерігатися виборчу корозію окремих, порівняно великих ділянок, що відрізняються структурною або хімічною неоднорідністю, або корозія окремих ділянок протікає з різною швидкістю. Можна виділити рівномірну загальну корозію зварного з'єднання, загальну корозію металу шва, загальну корозію зони термічного впливу, загальну корозію основного металу (рис. 5.1, 5.2).

2. Місцева корозія, коли руйнуванню піддаються лише деякі ділянки, тоді як решта поверхні не руйнується.

Розрізняють наступні види місцевої (локальної) корозії:

1) Структурно-виборчу корозію металу шва по дельта-фериту, коли переважно руйнуванню піддається фаза, збіднена нікелем (рис. 5.3);

2) Міжкристалітну корозію, коли руйнування відбувається по межах зерен, де знаходяться збіднені хромом прошарку металу, тоді як зерна корозії не піддаються (рис. 5.4);

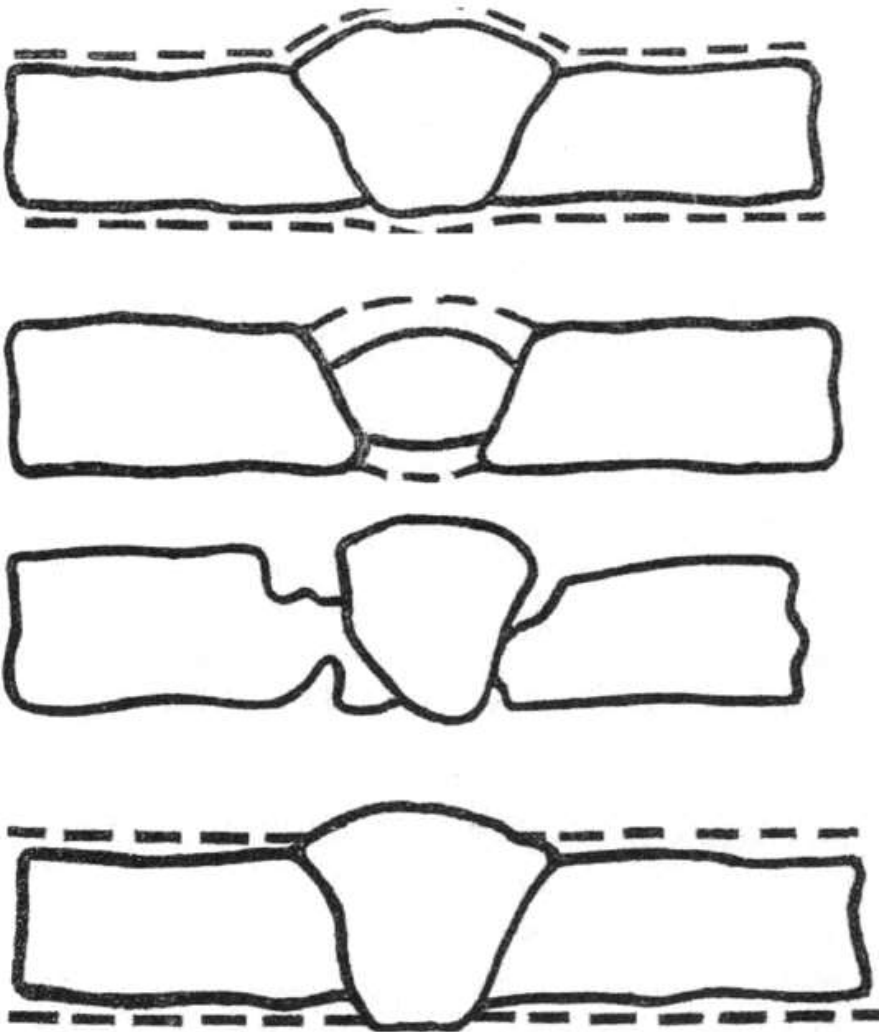


Рисунок 5.1 – Види загальної корозії зварних з'єднань

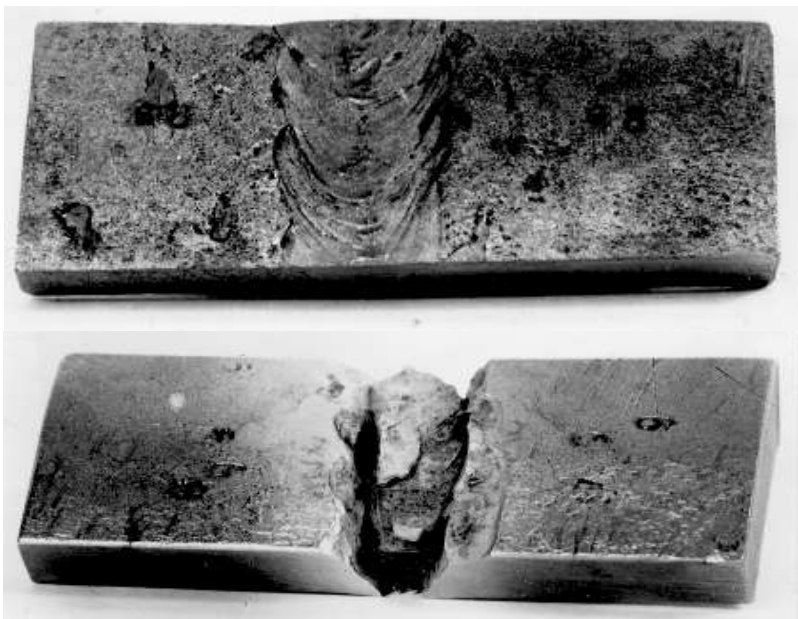


Рисунок 5.2 – Зовнішній вигляд зразків зварного з'єднання зі сталі 12X18H10T



Рисунок 5.3 – Структурно-виборча корозія металу шва ($\times 100$)

3) Піттингову корозію, коли в результаті впливу середовища, на поверхні утворюється піттинг, причиною чого може бути місцеве руйнування оксидної плівки, неметалеve включення;

4) Корозійне розтріскування - утворення тріщин в металі (рис. 5.5) конструкції при одночасному впливі корозійного середовища та розтягуючих робочих або залишкових напружень у зварних з'єднаннях (нержавіючі сталі особливо схильні до корозійного розтріскування в розчинах хлоридів і лугів);



Рисунок 5.4 – Зовнішній вигляд зразків і фотографія мікроструктури ($\times 100$) сталі 12X18H10T після випробувань на МКК за методом АМ

5) Ножову корозію (рис. 5.6), яка поширюється вздовж лінії сплавлення основного і наплавленого металу в результаті порушення хімічної однорідності і випадання великих карбідів титану при несприятливому термічному циклі зварювання (повторний багаторазовий нагрів металу при зварюванні). Ножова корозія може виникати у зварних з'єднаннях устаткування, що експлуатується в сильно окислювальних середовищах (концентрована азотна кислота).

Останні два види корозії найбільш небезпечні, бо руйнування зварних конструкцій відбувається раптово, іноді після декількох годин експлуатації, а тріщини розвиваються з високою швидкістю, що може створити аварійні ситуації.

б) Тріщини корозійної втоми (рис. 5.7).

Статистика показує, що при руйнуваннях загальна корозія складає 23% випадків; корозійне розтріскування – 24%; МКК і корозія зварних швів – 15%; піттингова корозія – 15%; корозійний знос – 7%; інші види корозії – 11% [1, 2, 13].

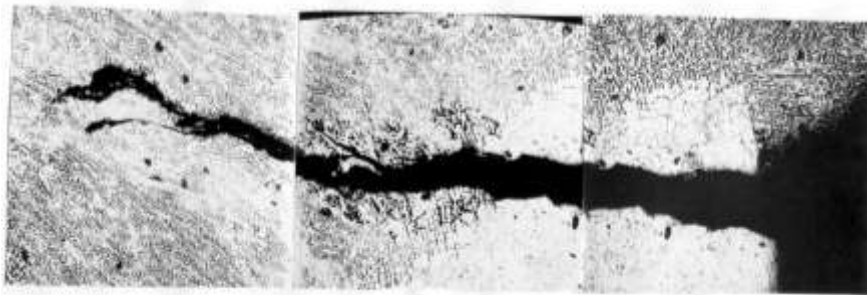
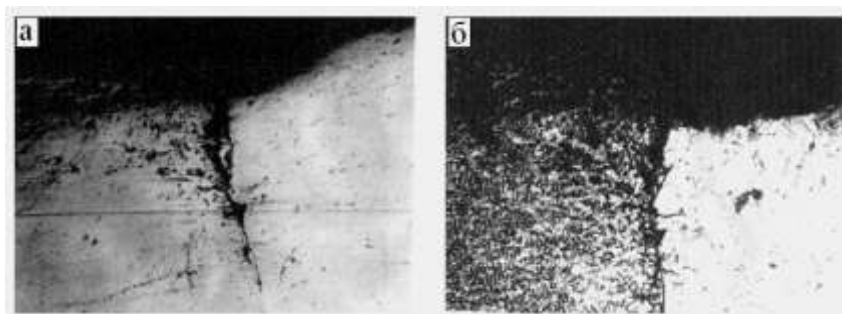


Рисунок 5.5 – Тріщина корозійного розтріскування трубопроводу із сталі 12X18H10T ($\times 100$)



а – шліф не травлений; б – шліф травлений

Рисунок 5.6 – Ножова корозія зварних з'єднань трубопроводу зі сталі 12X18H10T ($\times 100$)

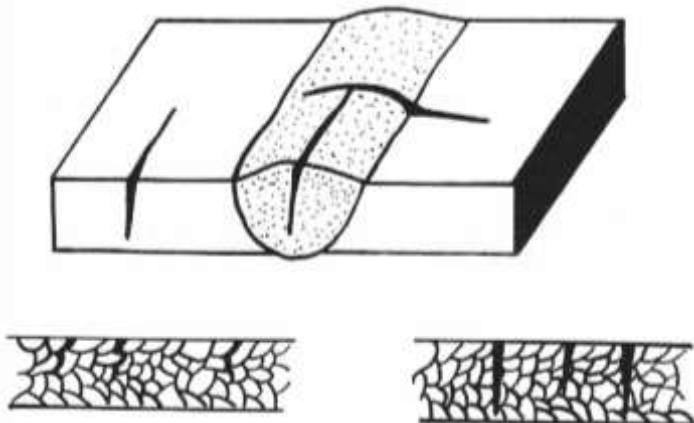


Рисунок 5.7 – Тріщини корозійної втоми

5.3 Контрольні запитання для самоперевірки і контролю підготовленості студентів до роботи

1. Причини, характер і механізм загальної корозії зварних з'єднань.
2. Причини МКК і способи її попередження.
3. Умови виникнення ножової корозії.
4. Умови виникнення тріщин корозійного розтріскування.
- 5 Характер і механізм структурно виборчої корозії наплавленого металу.

5.4 Порядок проведення практичної роботи

1. На зразках, вирізаних з різних ділянок зварного з'єднання зі сталі 12X18H10T після корозійних руйнувань, за допомогою фотографії і мікроструктур, шляхом вивчення мікрошліфів ознайомитися з характерними особливостями різних видів корозії. Дати опис і пояснення різних видів корозії. В якості прикладу наведені фотографії на рисунках 5.8 та 5.9.



Рисунок 5.8 – Зовнішній вигляд і мікроструктури зразків після експлуатації та практичних випробувань

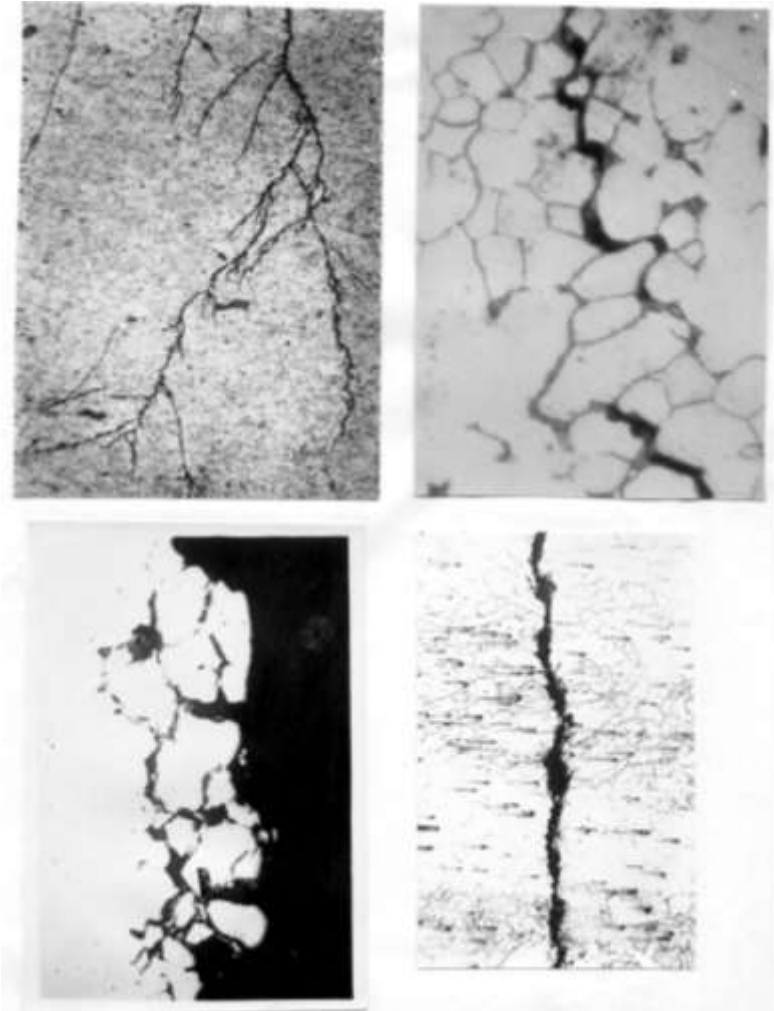


Рисунок 5.9 – Мікροструктура зразків після експлуатації та практичних випробувань

2. Проаналізувати контрольні фотографії зразків і мікροструктур корозійних руйнувань. Визначити та описати вид і механізм корозійного руйнування.

5.5 Зміст звіту

У звіті викласти характерні ознаки різних видів корозії.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Каховский Н.И. Сварка нержавеющей сталей. – К.: Техніка, 1968. – 312 с.
2. Каховский И.И. Сварка высоколегированных сталей. – К.: Техніка, 1975. - 376с.
3. Медовар Б.И. Сварка хромоникелевых аустенитных сталей. – 2-е изд., перераб. и доп. – К.-М.: Машгиз, 1958. – 198 с.
4. Закс И.А. Сварка разнородных сталей. – Л.: Машиностроение, 1973. – 208 с.
5. Справочник по сварке. Т.4. / Под ред. И.А. Акулова. – М.: Машиностроение, 1971. – 415 с.
6. Сварка в машиностроении. Т.2. / Под ред. И.А. Акулова. – М.: Машиностроение, 1978. – 465 с.
7. Электроды для сварки. Каталог. - К.: Наукова Думка, 1967. – 440 с.
8. Готальский Ю.Н. Сварка разнородных сталей. – К.: Техніка, 1981 - 184с.
9. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. Б.Е. Патона. – М.: Машиностроение, 1974-768с.
10. Электроды для дуговой сварки и наплавки. Каталог. – К.: Наукова думка, 1967 - 440с.
11. Фокин М.М., Жиганова К.Л. Методы коррозионных испытаний металлов. – М.: Металлургия, 1986. – 80 с.
12. ГОСТ 6032-84. Стали и сплавы коррозионностойкие. Методы определения стойкости против межкристаллитной коррозии. – М.: Госстандарт, 1984. – 30 с.
13. Сварка в машиностроении: Справочник. В 4-х т. Т. 3 / Под ред. В.А. Винокурова. - М.: Машиностроение, 1979. – 567 с.