

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**



ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МЕТОДИ У ЗВАРЮВАННІ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

МІТ – кафедра «зварювання»

Харків 2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ
з курсу
«ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МЕТОДИ У ЗВАРЮВАННІ»

Затверджено редакційно-
видавничою радою університету
протокол № від

Харків
НТУ «ХПІ»

2024

Методичні вказівки до лабораторних робіт з курсу «Експериментальні методи у зварюванні» /Уклад.: Дмитрик В. В., Погрібний М. А., Касьяненко І. В. – Харків : НТУ «ХП», 2024. – С.

Укладачі: В. В. Дмитрик, М. А. Погрібний, І. В. Касьяненко

Рецензент проф., докт. техн. наук А. В. Гайдамака

Виконання лабораторних робіт забезпечує оволодіння навичками практично використовувати експериментальні методи у зварюванні, що доцільно для отримання зварних з'єднань з високими якісними показниками.

Лабораторна робота 1

«РОЗРАХУНОК ЗВАРЮВАЛЬНОГО СТРУМУ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПЛОЩІ ПОПЕРЕЧНОГО ПЕРЕРІЗУ МЕТАЛУ ШВА ПРИ РУЧНОМУ ДУГОВОМУ ЗВАРЮВАННІ»

Мета роботи:

1. Розрахувати силу зварювального струму.
2. Теоретично та експериментально визначити площу поперечного перерізу металу шва.

1.1. Підготовка до лабораторної роботи

Виконання теоретичної та практичної частини роботи базується на знанні матеріалу електродугового зварювання курсу «Технологія та устаткування зварювання плавленням» [1-3]. Перед проведенням роботи необхідно вивчити теоретичний матеріал по технології ручного дугового зварювання (РДЗ), що широко використовується у промисловості. Мета роботи полягає в тому, що зварювальний струм та площа поперечного перерізу металу шва є основними характеристиками процесу РДЗ, від вибору яких залежать механічні властивості зварних з'єднань.

Виконання роботи розраховано на 6 годин учбового часу. На протязі перших 2-х годин засвоюються теоретичні положення дугового зварювання [4], а також виконується розрахункове визначення зварювального струму та поперечного перерізу металу шва з допомогою комп'ютера. На протязі наступних 2-х годин проводяться інструктаж з техніки безпеки, вивчення зварювального обладнання для РДЗ та ознайомлення зі зварювальними матеріалами [3], засвоєння навичок ручного дугового зварювання контрольних зразків і експериментальне визначення площі поперечного перерізу металу шва.

Потім, на протязі 2-х наступних годин виконується обробка і аналіз розрахункових та експериментальних даних, побудова схем, що визначається

площа поперечного перерізу металу шва, оформлення звіту і співбесіда викладача з кожним студентом особисто для виявлення рівня засвоєння вивченого матеріалу.

1.2. Загальні положення

Дугове зварювання – це технологічний процес одержання нероз’ємних з’єднань металів та їх сплавів, в т.ч. сталей, шляхом надання міжатомних зв’язків зварним з’єднанням при їх місцевому нагріванні. Місцеве нагрівання забезпечується дією висококонцентрованого джерела тепла – зварювальної дуги. Зварювальна дуга – це потужний стаціонарний довгодіючий електричний розряд, що горить у високо іонізованому середовищі парів та газів. Електропровідність дуги зумовлена направленим рухом елементарних частин – електронів та іонів, що утворюються внаслідок іонізації газів дугової проміжності. Зварювальна дуга при РДЗ має форму зрізаного конусу (рис. 1.1). Вважають, що зварювання на постійному струмі прямої полярності – мінус на електроді, плюс на виробі, зварювання на оберненій полярності – плюс на електроді, мінус на виробі. Зварювальна дуга умовно ділиться на три області: катодну, анодну та область стовпа дуги. Найбільшу подовженість, близько 2-10 мм, має область стовпа дуги. Під дією тепла дуги утворюється зварювальна ванна – область розплавленого металу зварних з’єднань, обмежена ізотермою плавлення (рис 1.2).

До складу зварювальної ванни входять розплавлений електродний (присадковий) та основний метал (метал з’єднань).

Температурний режим дуги та розплаву ванни визначає фізико-хімічні та металургійні процеси високотемпературної зони зварних з’єднань. Від інтенсивності протікання таких процесів залежать ступень дисоціації та іонізації газів у дузі; розчинення газів у розплавленому металі; характер реакцій між газовою, металевою та шлаковою фазами; плавлення електроду; перенесення електродного металу через дугову проміжність та ін. Температура дуги залежить від сили зварювального струму, теплофізичних

характеристик (щільність, теплоємність, теплопровідність, температуропровідність) основного та електродного металу, а також від складу покриття електроду і інших факторів. Температура дуги (середня) при РДЗ конструкційних сталей знаходиться близько 5440-5960 К. Середня температура ванни складає близько 1980-2130 К.

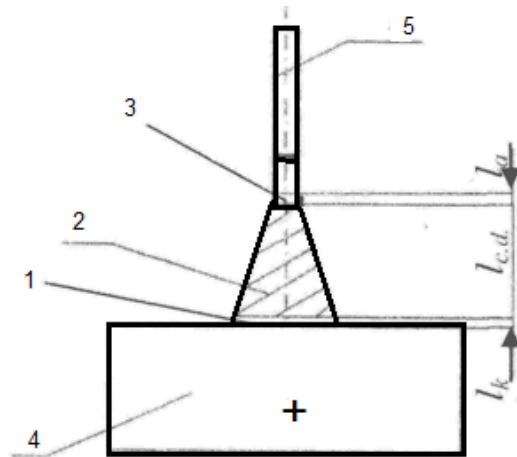


Рис. 1.1 – Схема зварювальної дуги: 1 - катодна область; 2 - область стовпа дуги; 3 - анодна область; 4 - зварне з'єднання; 5 - електрод що плавиться

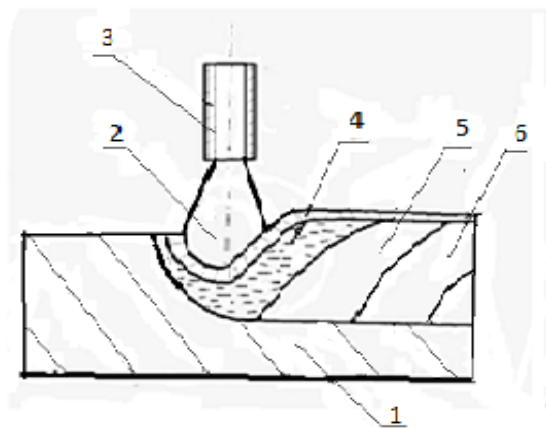


Рис. 1.2 – Схема процесу ручного дугового зварювання; 1- основний метал; 2 - дуга; 3 - електрод, що плавиться; 4 – розплав ванни; 5 - плівка розплавленого флюсу; 6 - метал шва

1.3. Джерела живлення для зварювання

Для РДЗ рекомендуються випрямлячі ВКСМ -1000, ВД 316, ВДУЧ-315Т, ВД-131У2, ВД-306М «Гарант», ВД-311У2 «УНТЕР», ВДУ-504 та ін. Випрямлячі забезпечують зварювання на постійному струмі прямої та оберненої полярності. Завдяки більш високим зварювальним якостям, випрямлячі мають суттєвими перевагами перед трансформаторами, що забезпечують зварювання на змінному струмі. Якість процесу РДЗ з використанням випрямлячів характеризується більшою стабільністю горіння дуги та відносно малим розбризкуванням електродного металу.

Для РДЗ широко використовують трансформатори ТД-350, ТСМ-250 У2, СТШ-250, ТДМ-121У2 «СЕЛМА», ТДМ-180 У2, ТДМ-259 У2, ТДМ-401, ТДМ-4П У2 «ТРАНС», ТДМ-511 У2, ТДЗ-251 У3.1, ТДЗ-252 У2 та ін. Трансформатори забезпечують процес зварювання на змінному струмі.

Джерела живлення для РДЗ повинні мати круто падаючу зовнішню характеристику (рис.1.3), яка забезпечує незначну зміну струму відносно зміни довжини дуги.

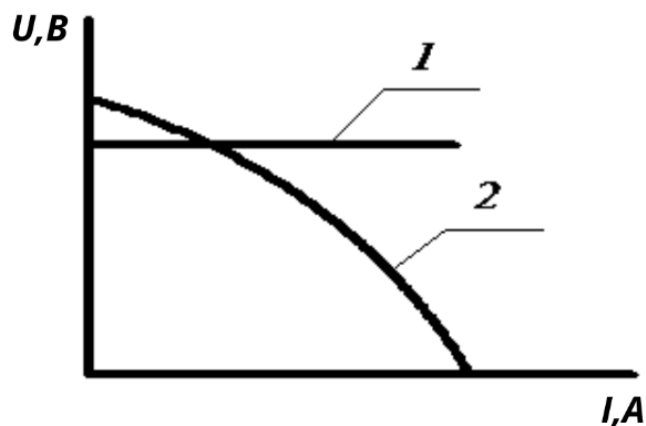


Рис. 1.3 – Зовнішня характеристика джерела живлення для ручного дугового зварювання. 1 - дуги; 2 – джерела живлення.

Загальні вимоги до джерел живлення:

- 1) обмежування струму короткого замикання;

- 2) ефективного регулювання режиму зварювання;
- 3) забезпечення стабільного горіння зварювальної дуги.

1.4. Електроди для ручного дугового зварювання

Штучний електрод являє собою металевий стержень на поверхню якого нанесено покриття (обмазка). Між електродом та основним металом при зварюванні горить електрична дуга. При цьому одночасно розплавляються основний та електродний метали.

Основні вимоги до електродів при РДЗ регламентуються STN ENISO 2560; 2014 / ДСТУ 9466-75.

Властивості кожної марки електродів занотовані в їх паспорті, в т.ч. їх тип та марка, а також призначення і дані про покриття самих електродів. В паспорті приводяться також короткі технологічні вказівки по зварюванню, характеристика розплавлення електродів, хімічний склад та властивості метала шва.

Електроди всіх типів повинні забезпечити:

- легке загорання та стабільне горіння зварювальної дуги;
- захист розплавленого металу від взаємодії з газами O_2 , N_2 , H_2 , що входять до складу атмосфери;
- одержання металу шва із заданими механічними властивостями;
- мінімальні втрати електродного металу від окислення, вигорання та розбризкування;
- відповідність металу шва експлуатаційним вимогам.

Для легкого загорання та стабільного горіння дуги до складу покриття вводять лужні з'єднання, силікати натрію і калію, кальциновану соду та вуглекислий барій.

При зварюванні електрод та його покриття розплавляються одночасно. Розплавлене покриття забезпечує утворення рідкого шлаку, який внаслідок своєї меншої щільності, чим розплавлений метал впливає на поверхню зварювальної ванни. Рідкий шлак утворює на поверхні розплавленого металу

ванни щільну плівку і таким чином захищає розплавлений метал від взаємодії з газами, що входять до складу атмосфери. Компонентами шлакоутворюючих покриттів є польовий шпат ($K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$), крейда ($CaCO_3$), магнезит ($MgCO_3$), плавиковий шпат (CaF_2), кварцовий пісок (SiO_2), титановий концентрат ($FeO \cdot TiO_2$), марганцева руда (MnO), гематит (Fe_2O_3), рутил (TiO_2) та інші.

Газовий захист розплавленого металу забезпечується продуктами дисоціації $CaCO_3$, $MgCO_3$, або сумішшю захисних газів, що утворюються при розпаді речовин органічного походження (крохмаль, декстрин, целюлоза тощо), які входять до складу покриттів.

1.5. Розрахункове визначення зварювального струму та площі поперечного перерізу металу шва

Режим зварювання включає основні параметри зварювального процесу, що забезпечують одержання швів заданої геометрії та відповідну їх якість. Параметрами при РДЗ є сила струму, напруга дуги, діаметр електроду, рід струму, полярність струму та ін. Визначення режиму зварювання починають з вибору діаметру електроду, який підбирають в залежності від товщини зварювальних зразків (табл.1.1).

Таблиця 1.1 - Параметри режиму РДЗ зразків зі сталі 30

| | | | | | | |
|---|---|---|-----|----|-------|-------|
| Товщина зразків для зварювання, мм | 6 | 8 | 9 | 10 | 11-15 | 16-20 |
| Діаметр електроду, d_e , мм | 4 | 4 | 4-5 | 5 | 5 | 5-6 |
| Розрахункове значення сили зварювального струму, $I_{зв}$, А | | | | | | |

Сила зварювального струму визначається в залежності від діаметра електрода (табл. 1.1) та щільності струму (табл. 1.2)

$$I_{зв} = \frac{\pi d_e^2}{4} j \quad (1)$$

де d_e – діаметр електрода, мм, (табл. 1.1)

j – допустима щільність струму, А/мм², (табл. 1.2)

Напруга дуги змінюється у порівняно вузьких межах і для конкретного процесу зварювання підбирається у відповідності до рекомендацій паспорту на дану марку електродів.

Площа поперечного перерізу металу шва (рис. 1.4) розраховується за формулою (2) з використанням особистого комп'ютера.

Таблиця 1.2 - Значення допустимої щільності струму у електроді

| Види електродних покриттів | Допустима щільність струму (А/мм ²) при d_e (мм) | | |
|----------------------------|---|-------------|-------------|
| | 3 | 4 | 5 |
| Рудно-кисле, рутилове | 14,0 - 20,0 | 11,5 - 16,0 | 10,0 - 13,5 |
| Фтористо-кальцієве | 13,0 - 18,5 | 10,0 - 14,5 | 9,0 - 12,5 |

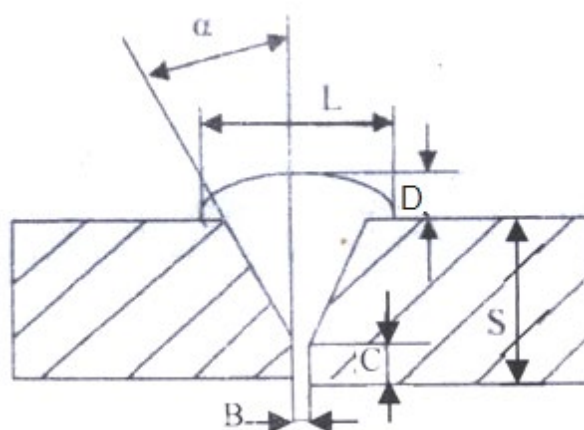


Рис. 1.4 – Розрахункова схема визначення площі поперечного перерізу металу шва (символи табл. 1.3)

$$F = SB + (S-C)^2 \cdot \operatorname{tg}\alpha + 0,75LD \quad (2)$$

Розрахункові дані заносяться в табл. 1.3

Для розрахунку значення символів, що входять у формулу (2) їх слід перевести в одну систему розмірності.

1.6. Обладнання, інструмент та зварювальні матеріали

- Пост для ручного дугового зварювання до складу якого входить джерело живлення ВДУ-504;
- комплект електродів, що мають діаметр 3-5 мм;
- зразки для зварювання з спеціальних легованих конструкційних сталей;
- штангенциркуль, металева лінійка;
- вимірювальні прилади: амперметр, вольтметр;
- особисті комп'ютери;

Таблиця 1.3 - Параметри, що характеризують геометрію поперечного перерізу металу шва

| Товщина зразків для зварювання S, мм | Висота затуплення кромки C, мм C=B | Кут розділення кромки α° | Ширина підсилення металу шва L, мм | Висота розділення кромки H, мм H=S-C | Висота підсилення металу шва D, | Розрахункова площа металу шва $F_{\text{м.ш}}$, мм ² | Площа металу шва визначена експериментально $F_{\text{м.ш}}$, мм ² |
|---|--|---|---|--|--|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 6 | 1 | 27±3° | 14 | 5 | 0,5 | | |
| 8 | 1 | 27±3° | 14 | 7 | 0,5 | | |
| 10 | 2 | 27±3° | 20 | 8 | 0,5 | | |
| 12 | 2 | 27±3° | 20 | 10 | 0,5 | | |
| 14 | 2 | 27±3° | 24 | 12 | 0,5 | | |
| 16 | 2 | 27±3° | 24 | 14 | 0,5 | | |
| 18 | 2 | 27±3° | 26 | 14 | 0,5 | | |

1.7. Техніка безпеки

Перед початком роботи всі студенти проходять інструктаж з техніки безпеки.

Роботи виконуються у зварювальній лабораторії, що відповідає вимогам навчального процесу та техніки безпеки.

Перед вмиканням джерела живлення для РДЗ потрібно перевірити наявність його заземлення та цілісність стану зварювальних проводів.

Вмикання джерела живлення виконується учбовим майстром.

При можливості несправностей у роботі джерела живлення, а також вимірювальних приладів слід повідомити викладача або учбового майстра.

При виконанні процесу зварювання необхідно використовувати особисті засоби захисту – зварювальні окуляри, щитки та спеціальний одяг. Студенти, що не приймають участі у проведенні експериментів, не повинні знаходитись у зварювальній лабораторії.

1.8. Порядок виконання роботи

- Перед проведенням лабораторної роботи кожному студенту слід вивчити матеріал конспекту лекцій, присвячений дуговому зварюванню, а також літературі [1-4]. Робота передбачає індивідуальне виконання її теоретичної та практичної частин.

- Група студентів ділиться на підгрупи, до складу яких входять 3-4 особи. Кожний студент отримує зразки для зварювання.

- Кожен студент підбирає діаметр, тип та марку електродів і розраховує за формулою (1), з використанням даних табл. 1.1 та 1.2, силу зварювального струму. Розрахункові значення заносяться до табл. 1.1.

- Розраховують за формулою (2), з використанням даних табл. 1.3, та з допомогою особистого комп'ютера площу поперечного перерізу металу шва. Розрахункові дані заносяться до таблиці 1.3.

- На установленому значенні зварювального струму відпрацьовують навички зварювання горизонтальних швів у нижньому горизонтальному положенні.

Потім, у відповідності до схеми (рис. 1.4), виконують контрольне зварювання зразків для замірів площі поперечного перерізу металу шва (див. рис. 1.4). Якість виконання зварювання контрольних зразків оцінюється викладачем та учбовим майстром.

- Зварювальні зразки охолоджують та розрізають по площині ABCD перпендикулярній зварному шву, рис. 1.5. Потім, за допомогою міліметрового паперу, штангенциркуля та металевої лінійки заміряється площа поперечного перерізу металу шва. Дані заносяться у табл. 1.3.

- На основі розрахункових та експериментальних даних, у масштабі, будується схема площі поперечного перерізу металу шва див, рис. 1.4.

- Виконується аналіз розрахункових та експериментальних даних, що характеризують площу поперечного перерізу металу шва. Робляться висновки про збіг розрахункових та експериментальних даних.

1.9. Вказівки до оформлення звіту

- У журналі записують назву та мету роботи, наводять зварювальне обладнання, матеріали та інструменти, що використовуються при її виконанні.

- З розділу «Теоретична частина» у стислому вигляді записується матеріал і формули (1) - (2) з розшифрування їх складових. За формулою (1) розраховують значення зварювального струму. Дані заносять до табл. 1.1. Приводять за формулою (2) короткий розрахунок площі поперечного перерізу металу шва. Дані заносять до табл. 1.3.

- Під заголовком «Практична частина» виконують у стислій формі опис одержаних експериментальних даних, які заносять до таблиці 1.3. і наклеюють тиражований рис. 1.4.

- Будують у масштабі на міліметровому папері, а потім наклеюють в журнал для лабораторних робіт, схему площі поперечного перерізу металу шва, одержаного розрахунковим шляхом. Аналогічно, у масштабі, будують схему, що характеризує площу поперечного перерізу металу шва, яку

отримали експериментально. Далі слід порівняти, як збігаються ці схеми та зробити висновки.

- Ретельно оформлений звіт, кожен студент пред'являє викладачеві для перевірки та підпису.

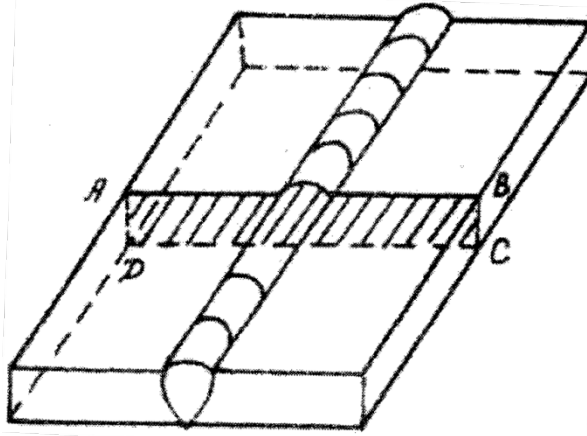


Рис. 1.5 – Схема зварювального з'єднання

1.10. Контрольні питання

1. Поясніть фізичну сутність зварювальної дуги.
2. Які джерела живлення для зварювання Ви знаєте?
3. Які вимоги ставляться до електродного покриття? Яка роль покриття при зварюванні електродами?
4. Якою повинна бути зовнішня характеристика джерела живлення при ручному дуговому зварюванні?
5. Дайте характеристику зварювальній ванні?
6. Перерахуйте параметри режиму ручного дугового зварювання?
7. Як підбирається зварювальний струм в залежності від товщини зразків, що зварюються?
8. Як підбирається сила зварювального струму в залежності від діаметру електроду?
9. Як підбирається діаметр електрода при ручному дуговому зварюванні?

10. Як розраховується площа поперечного перерізу металу шва при ручному дуговому зварюванні?

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Технология электродуговой сварки металлов и сплавов плавлением: навч. посіб. / Б. Е. Патон и др.; под ред. Б.Е. Патона. – М. Машиностроение. 1974. – С. 767.
2. Поздняков В. Д. Зварювальні технології для ремонту металевих конструкцій. /В.Д. Поздняков. – Київ: Інститут електрозварювання ім. Е. О. Патона НАН України, 2023. – 232с.
3. Довідник зварника: довідник /Биковський О. І. – Київ: вид-во «Основа». 2014. – 442с.
4. Моделювання зварювального нагріву виготовляємих з'єднань енергетичного обладнання /В. В. Дмитрик, А. В. Глушко, М. І Туренко та ін. - Харків: Вісник НТУ «ХПІ», 2018. – №4 – С.24-29.

Лабораторна робота 2

ВИЗНАЧЕННЯ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ У МЕТАЛІ ШВА ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ІЗ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ

Мета роботи: вивчення методів визначення неметалевих включень у металі зварних з'єднань.

2.1. Підготовка до лабораторної роботи

При підготовці до лабораторної роботи необхідно вивчити теоретичний матеріал, наведений в розд. 2.2, а також у списку літератури, витримувати послідовність дій при виконанні роботи; відповідно п.5, у стислій формі описати хід виконання роботи та зробити відповідні висновки.

У результаті проведення лабораторної роботи доцільно поглибити знання та засвоїти:

- мету та зміст роботи;
- роль неметалевих включень в механізмі пошкоджуваності зварних з'єднань;
- види неметалевих включень;
- металографічний метод виявлення неметалевих включень;
- розподіл неметалевих включень за їх типом;
- особливості утворення сульфідів;
- особливості утворення оксидів;
- особливості утворення силікатів;
- вплив неметалевих включень на механічні властивості зварних з'єднань

2.2. Загальні положення

У металі шва зварних з'єднань із конструкційних легованих сталей крім заліза, вуглецю та легуючих елементів завжди, в невеликій кількості, присутні сірка, кисень, водень, азот, кремній, марганець та ін. елементи деякі з них, наприклад, сірка, кисень та азот можуть входити до складу окремих фаз. Наведені елементи попадають у розплавлений метал зварювальної ванни зі зварювальних матеріалів, а окремі фази можуть утворюватися внаслідок реакцій, які відбуваються в умовах зварювання. Неметалеві включення можуть бути частками шлаку, що утворюється при зварюванні. До неметалевих включень відносять сульфіди, силікати, нітриди, фосфіди, оксиди, шпінелі (складні оксиди).

Сульфіди. Сірка в наплавленому металі зварних з'єднань може бути присутня у вигляді $(FeMn)S$. Сульфіди можуть утворювати легкоплавку евтектику $(FeMn)S - (FeMn)$, яка концентрується переважно по границях зерен. Рис. 2.1. Сульфіди $(FeMn)S$ добре піддаються поліруванню. Їх видовженість, залежить від умов термічного циклу зварювального нагрівання та охолодження.

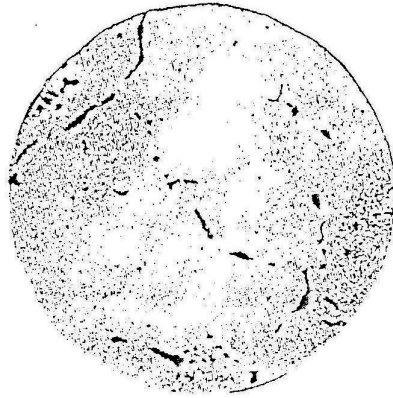


Рис. 2.1 – Наплавлений метал з вмістом вуглецю 0,4%. Нетравлений шліф. Сульфіди, які знаходяться на границях зерен. $\times 210$

Кольоровий вигляд сульфіда (FeMn)S залежить від вмісту в ньому Fe та Mn. Якщо в цьому сульфіді вміст Fe є переважним, то сам сульфід набуває світло-жовтого кольору. При відповідному збільшенні у наведеному сульфіді Mn його колір змінюється від блакитно-сірого до темно-сірого.

Оксиди. Оксиди утворюються при розкисленні розплавленого металу зварювальної ванни в процесі ручного дугового зварювання електродами з покриттям, а також зварювання в середовищі CO_2 та (в меншій мірі) $\text{CO}_2 + \text{Ar}$. При зварюванні в середовищі інертних газів кількість оксидних включень у наплавленому металі є значно меншою ніж при інших наведених процесах зварювання. Оксидні включення переважно мають кулясту форму, рис.2.2. Наприклад, у наплавленому металі може бути присутня закись заліза FeO (вюстит).

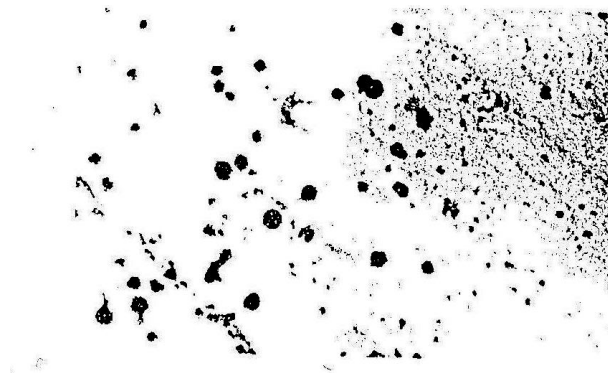


Рис. 2.2 – Оксиди у вигляді кулястих включень. $\times 2000$

У наплавленому металі зварних з'єднань із конструкційних легуваних сталей досить часто зустрічаються алюмінати $\text{FeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (марганцевашпіналь), оксид хрому, тощо.

Закис заліза FeO в наплавленому металі зустрічається тоді, коли метал зварювальної ванни є недостатньо розкисленим, а також коли розплавлений метал, внаслідок недостатнього захисту, взаємодіє з атмосферними газами. Включення FeO має вигляд глобулів сірого кольору з блідно-коричневим відтінком по краях. Оксиди SiO_2 мають вигляд кульок чорного кольору з блискучою точкою в центрі та відсвітленням в ореолі. Вони не пластичні, не піддаються поліруванню та легко викришуються. Оксиди Al_2O_3 також зустрічаються у наплавленому металі, тому що Al широко використовується як розкислювач і входить до складу обмазок багатьох типів електродів. Також зустрічаються оксиди Al_2O_3 і в основному металі деяких жаростійких сталей, наприклад 10X13CЮ. Температура плавлення Al_2O_3 складає 2050°C , що характеризує його як тугоплавке хімічне з'єднання. Твердість оксидів Al_2O_3 є досить високою і тому вони важко піддаються шліфуванню та поліруванню. На рис. 2.3 наведені видовжені оксидні включення в заготовках із сталі 15X1МФ для зварних з'єднань.

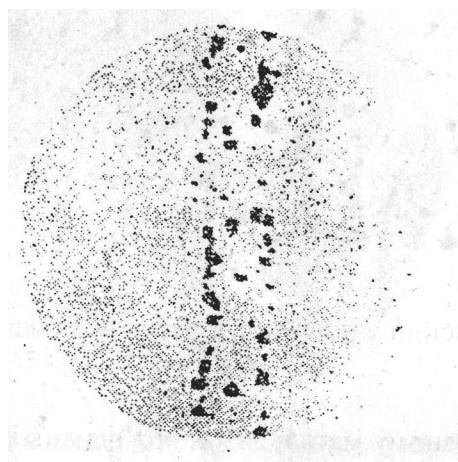


Рис.2.3 – Оксиди в вигляді витягнутих ланцюжків $\times 100$

Кількісну оцінку неметалевим включенням у наплавленому металі зварних з'єднань, що досліджуються, можна надати:

1 Підрахуванням вмісту включень у об'ємних та вагових відсотках шляхом вимірювання підсумкової площини або довжини включень на шліфу методом кількісного металографічного аналізу;

2 Порівнянням шліфа, що вивчається, з еталоном стандартної шкали, ДСТУ ISO 4967 рис. 2.4.

Металографічний метод дозволяє визначити довжину включень, а також виявити наявність у наплавленому металі великих неметалевих включень, які класифікуються як найбільш небезпечні для зварних з'єднань. Для оцінки наявності неметалевих включень у наплавленому металі користуються шкалою ДСТУ ISO 4967.

| Бал | Оксиди | | Сульфіди та силікати | | Карбіди |
|-----|--------|--------|----------------------|--------|---------|
| | мілкі | крупні | мілкі | крупні | |
| 1 | | | | | |
| 2 | | | | | |
| 3 | | | | | |
| 4 | | | | | |
| 5 | | | | | |

Рис. 2.4 – Шкала неметалевих включень в сталі. $\times 100$. ДСТУ ISO 4967

Неметалеві включення в зварних з'єднаннях із кованих заготовок визначають на зразках вирізаних впродовж волокон. Шліфи пропонується вирізати за допомогою механічної пилки. Включення на попередньо загартованих нетравлених шліфах визначають за допомогою оптичного мікроскопу при збільшенні в 100 разів. В залежності від вимог ДСТУ ISO 4967 включення оцінюють визначенням довжини неметалевого включення та балу неметалевого включення по стандартній шкалі, табл. 2.1

Таблиця 2.1 - Шкала ДСТУ ISO 4967:2015 для визначення довжини включень

| Група | Довжина або діаметр одного включення, мм | Кількість включень | Індекс |
|--------------------------|--|--------------------|--------|
| Т.В. (точкові включення) | До 0,01 | 10 | 1 |
| М.В. (мілкі включення) | Більше 0,01 до 0,05 | 2 | 1 |
| I | » 0,005»0,1 | 1 | 1 |
| II | » 0,1 » 0,2 | 1 | 2 |
| III | » 0,2 » 0,3 | 1 | 3 |
| IV | » 0,3 » 0,4 | 1 | 4 |
| V | » 0,4 » 0,5 | 1 | 5 |
| VI | » 0,5 » 0,6 | 1 | 6 |
| VII | » 0,6 » 0,7 | 1 | 7 |
| VIII | » 0,7 « 0,8 | 1 | 8 |

При виготовленні шліфів із зварних з'єднань легованих сталей доцільно використовувати електрополірування, що попереджує утворення на їх робочій поверхні наклепаного шару, який ускладнює виявлення неметалевих включень.

2.3. Прилади, обладнання, наочні посібники

Для виконання лабораторної роботи використовуються:

- комплекти готових мікрошліфів зварних з'єднань із сталей 30, 15Х2МФ, 15Х1М1Ф, 10Х18Н12Т, 15Х12МФ, 12Х1МФ;
- мікроскоп МІМ-8 – 1 шт;
- мікроскоп МІМ-7 – 1 шт;
- альбом мікроструктур – 10 шт;
- точило – 1 шт;
- верстати для шліфування та полірування – 2 шт;
- паста для полірування зразків.

2.4. Техніка безпеки

Перед початком роботи всі студенти проходять інструктаж з техніки безпеки. Робота виконується в металографічній лабораторії, що відповідає вимогам навчального процесу та техніки безпеки.

2.5. Порядок проведення роботи

2.5.1. Дослідження наявності неметалевих включень в наплавленому металі зварних з'єднань виконують на зразках, рис. 2.5

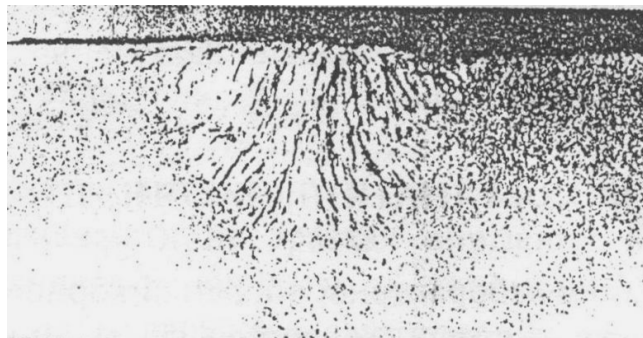


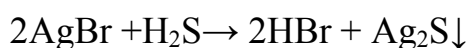
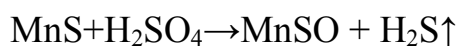
Рис. 2.5 – Макроструктура зварного з'єднання зі сталі 15Х1М1Ф. $\times 1,0$

2.5.2. Особисто кожному студентові видається зразок зварного з'єднання з наведених в п 2.3 сталей.

2.5.3. Робочу поверхню зразків піддають шліфуванню та полірують, поступово переходячи від грубих розмірів до тонких. В процесі шліфування, при зміні шліфувального паперу, зразки повертають на 90° і в такому положенні продовжують шліфування. Це дозволяє видалити риски з робочої поверхні шліфів. Шліфування дозволяє отримати чистоту поверхні, що складає близько $0,63\sqrt{\quad}$, або є більш високою. Після шліфування зразок старанно промивають у воді для того, щоб частки абразиву не попали на полірувальний круг.

2.5.4 Полірування виконують на обтягнутому сукном, фетром або шовком диску, який обертається. В процесі полірування круг змочується водою, до складу якої входять тонкі частки оксиду хрому (зелений колір) або оксиду алюмінію (білий колір). Полірування повинно забезпечити отримання дзеркальної робочої поверхні шліфа. Після полірування шліф промивають у воді або у спирті та висушують, використовуючи при цьому промокаючий фільтрувальний папір, який прикладають до дзеркальної поверхні шліфа.

2.5.5. Виявлення ліквациї сульфідів по Бауману. Попередньо фотопапір змочують протягом 10 хв. в 5-10% водяному розчині H_2SO_4 . Потім фотопапір прикладають до робочої поверхні шліфа таким чином, щоб шар його емульсії безпосередньо контактував з його поверхнею. Прикладений фотопапір витримують близько 3-5 хв., видаляючи при цьому кульки повітря. Потім його знімають з поверхні, промивають в воді, закріплюють у 25% розчині гіпосульфата, знову промивають та висушують. Включення FeS та MnS , які знаходяться на поверхні макрошліфа вступають у реакцію з сірчаною кислотою, яка залишилась на фотопапері



Внаслідок наведених реакцій на фотопапері утворюються темно-коричневі відбитки, які характеризують наявність у наплавленому металі сульфідів та їх ліквідацію. Отримані відбитки сірки порівнюють зі шкалою, рис. 2.1, та дають їм відповідну оцінку.

2.5.6. Шліф розглядають при збільшенні в 2-5 разів і всі виявлені неметалеві включення обкреслюють голкою.

2.5.7. З допомогою оптичного мікроскопу шліф розглядають у напрямку від крайньої його ділянки до центральної в 15 полях зору при діаметрі поля зору 0,8 мм і збільшенні в 100 разів. Визначення балу виявлених включень проводять шляхом їх зіставлення зі шкалою рис. 2.4.

2.5.8. В кожному полі зору підраховують число включень, а потім, при допомозі окулярмікрометра, визначають довжину кожного включення у міліметрах або у мікрометрах.

2.5.9. Користуючись таблицею по довжині та діаметру включення, визначають його групу та індекс.

2.5.10. підраховують загальну кількість однакових включень по групах на всіх 15 полях зору (поштучно). Визначене загальне число включень множать на відповідний індекс.

Наприклад: при розгляді шліфа в 15 полях зору виявлено: а) оксидних включень III групи (з індексом 4) 2 штуки. Загальний індекс складає $3 \times 2 = 6$; б) оксидних включень II групи (з індексом 2) 4 штуки. Загальний індекс складає $4 \times 2 = 8$; в) загальна оцінка оксидних включень у наплавленому металі вміщує суму всіх отриманих індексів, тобто $6 + 8 = 14$.

2.5.11. Для додаткової оцінки крупних включень підраховують суму всіх індексів включень IV – VIII груп та записують результат під загальним індексом.

2.5.12. У кожному шліфі слід порівняти найгіршу по включенням ділянку зі стандартною шкалою, рис. 2.4.

2.5.13. Кожен студент, відповідно рис. 2.5, визначає загальний бал по неметалевим включенням як середнє арифметичне найбільших балів, отриманих по кожному виду включень.

2.5.14. Виявлені неметалеві включення замальовують відповіло рис. 2.4. наводять їх характерні ознаки (оксиди, сульфідиди), описують їх форму, розподіл та колір.

2.6. Вказівки до оформлення звіту

2.6.1 У журналі для лабораторних робіт записують назву та мету роботи, наводять короткий опис її проведення відповідно розділів 2.2. і 2.5., обладнання та інструменти, які використовуються при виконанні лабораторної роботи, а також висновки.

2.6.2. Кожен студент зарисовує неметалеві включення, виявлені на своєму шліфі, наводить їх корисний опис.

2.6.3. Оформлений акуратно звіт кожен студент подає на підпис викладачеві. За матеріалом звіту, з метою закріплення студентами набутих знань та навичок, а також визначення їх рівня, задаються контрольні питання. Рівень набутих знань оцінюється викладачем по бальній системі.

2.7 Контрольні питання

2.7.1. Поясніть послідовність виготовлення шліфів для виявлення у наплавленому металі неметалевих включень.

2.7.2. Як виявляють наявність сульфідів по Бауману?

2.7.3. Поясніть особливості виявлення неметалевих включень у наплавленому металі за допомогою оптичного мікроскопа.

2.7.4. Як визначають довжину неметалевих включень?

2.7.5 Як визначають групу та індекс неметалевих включень?

2.7.6. Як підраховують загальну кількість однакових включень по групах?

2.7.7. Як визначають загальний бал по неметалевим включенням?

2.7.8. Яка роль неметалевих включень у пошкодженості зварних з'єднань?

Список літератури

- 1 Металознавство: навч. посіб. / Балік О. М., Черненко В. С., Писаренко В. М., Москаленко Ю. Н. –К: Політехніка. 2002.- 383 с.
- 2 Єфіменко Н. Г. Металознавство і термічна обробка зварних з'єднань. Підручник для студентів вищих навчальних закладів зварювальних спеціальностей /Єфіменко Н. Г., Радзивілова Н. А. –Харків. -2003. – 259 с.
- 3 Биковський О. І. Довідник зварника / Биковський О. І. – Київ: вид-во «Основа», 2014 - 442 с.

Лабораторна робота 3

ВИЗНАЧЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ТЕХНОЛОГІЇ РУЧНОГО ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ЕЛЕКТРОДОМ, ЩО ПЛАВИТЬСЯ

Мета роботи: вивчити способи експериментального визначення коефіцієнтів розплавлення, наплавлення і витрат, що характеризують використання технології ручного дугового зварювання.

3.1. Підготовка до лабораторної роботи

Спочатку необхідно засвоїти теоретичний і практичний матеріал для уявлення про механізм формування металу шва стосовно ручного дугового зварювання покритими електродами (розд. 3.2). Слід звернути увагу на залежність коефіцієнтів, що визначаються, від сили зварювального струму, напруги дуги, діаметра електроду та. інш.

Рівень засвоєння вивчаемого матеріалу слід перевірити шляхом надання відповідей на контрольні питання (розд.3.7). Більше відомостей за вивчаємою

темою можна отримати із літературних джерел, які наведені у списку літератури.

Після ознайомлення з порядком виконання лабораторної роботи (розд. 3.5) і засвоєння відповідного теоретичного і практичного матеріалу всі студенти проходять короткий інструктаж по техніці безпеки при виконанні зварювальних робіт. Потім студенти виконують практичну частину роботи.

3.2. Загальні положення

Зварюванням називають технологічний процес отримання нероз'ємних з'єднань із різних конструкційних матеріалів. Фізична суттєвість зварювання полягає в утворенні міцних зв'язків між атомами заготовок, що з'єднуються. Для отримання зварного з'єднання необхідно наблизити поверхні, що з'єднуються на відстань дії міжатомних сил зчеплення і створити необхідні для встановлення таких зв'язків умови. А саме температуру, час контакту і чистоту поверхні конструкційних матеріалів, що з'єднуються.

Джерелом теплоти при дуговому зварюванні являється електрична дуга. Дуга – це потужний стабільний електричний розряд, що горить в іонізованій атмосфері газів і парів металу, рис.3.1.

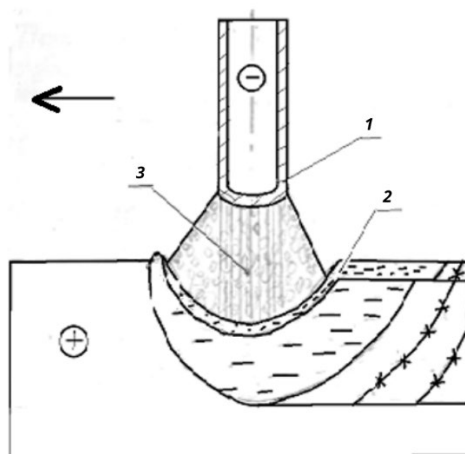


Рис.3.1 – Схема електродугового зварювання електродом, що плавиться. Зона дугового розряду: 1-катодна; 2- анодна; 3- стовп дугового розряду

Електроди для ручного дугового зварювання повинні забезпечувати отримання зварних з'єднань з високими фізико-механічними властивостями. В цьому важливий внесок надають покриття електродів. Компоненти, що входять до покриття, забезпечують : стабільне горіння дуги; надійний захист розплавленого металу від взаємодії з газами, які входять до складу атмосфери; рафінування розплавленого металу зварювальної ванни; отримання металу шва необхідного хімічного складу; утворення шлаків з визначеними фізичними властивостями.

Покриття електродів, в якому шлакоутворюючими компонентами є залізна і марганцева руди, а також кремнезем надається кислим. Марки таких електродів ЦМ-7, ОММ-5 та ін.

Покриття, шлакоутворююча основа якого є на базі карбонатів кальція або магнія і плавикового шпату, надається основним. Метал шва, отриманий при використанні таких електродів (УОНІ-13/45, АНО-7, АНО-8) представляє спокійну сталь і має високі механічні властивості.

Покриття із шлакоутворюючою основою на основі рутилу (TiO_2) називають рутиловим. Це найбільш розповсюджені електроди марок МР-3, ОЗС-4, АНО-4 та ін. Використання наведених електродів дозволяє отримати високі механічні властивості зварних з'єднань.

Температура зварювальної дуги. Див. рис.3.1, на катодній зоні складає близько $2400^{\circ}C$, на аноді – $2600^{\circ}C$, по вісі дуги становить $6000-7000^{\circ}C$. Стабільне горіння дуги, що забезпечує якісне формування металу шва, досягається при її довжині 2-5 мм. Глибина проплавлення основного металу повинна бути достатньою. При дуговому зварюванні розплавлений електродний метал переноситься із електрода на заготовку у вигляді капель. Каплі рідкого металу переносяться у вигляді струменю під дією сил тяжіння, сил поверхневого натягу, тиску газів і стискуючої дії електромагнітних сил.

Поверхневий натяг сприяє переносу металу з електрода на заготовку при наявності короткої дуги. Сила тиску газів, які утворюються при плавленні електрода також сприяє капельному переносу розплавленого

електродного металу, що важливо при поточному зварюванні. Струм, що протікає по електроду, утворює навколо рідкого металу дуги, що переносяться, магнітне силове поле, яке надає стискуючу дію на каплі рідкого металу (пінч-ефект). Електромагнітні сили сприяють переносу капель електродного металу на заготовку при всіх положеннях зварювання в просторі.

Маса розплавленого металу залежить від сили струму у дуговому розряді, часу горіння дуги і марки електроду, що враховує його хімічний склад.

$$Q_p = \alpha_p \cdot I \cdot t, \quad (3.1)$$

де Q_p – маса розплавленого металу, г; I – сила струму, А; t – час горіння дуги, с; α_p – коефіцієнт розплавлення, г/А·год.

Коефіцієнт розплавлення визначається за формулою

$$\alpha_p = \frac{Q_p \cdot 3600}{I \cdot t}, \quad (3.2)$$

Коефіцієнт розплавлення характеризує питому продуктивність процесу розплавлення електрода, залежить від щільності струму, його роду і полярності, хімічного складу електроду і його покриття та ін. Для ручного дугового зварювання коефіцієнт розплавлення складає 8-14 г/А·год.

В процесі зварювання частина електродного металу втрачається внаслідок розбризування, окислення і випаровування. Витрати враховуються з допомогою коефіцієнта втрат Ψ , який визначається за формулою

$$\Psi = \frac{Q_p - Q_H}{Q_p} \cdot 100\%, \quad (3.3)$$

де Q_H – маса наплавленого металу, що входить до складу металу шва.

Коефіцієнт витрат залежить від параметрів режиму зварювання – сили струму, довжини дуги, діаметра електроду і його покриття, а також від положення зварювання. При збільшенні сили струму витрати, переважно за рахунок розбризкування, зростають.

$$Q_H = \alpha_H \cdot I \cdot t, \quad (3.4)$$

де α_H - коефіцієнт наплавлення, який показує кількість наплавленого металу за 1 год. при силі струму 1А.

Коефіцієнт α_H визначається за формулою

$$\alpha_H = \frac{Q_H \cdot 3600}{I \cdot t}, \quad (3.5)$$

Коефіцієнти розплавлення, наплавлення і втрат пов'язані між собою наступною залежністю

$$\alpha_H = \alpha_p (1 - \Psi). \quad (3.6)$$

Коефіцієнт наплавлення залежить від коефіцієнтів розплавлення і витрат, а також діаметру електроду, типу його обмазки, сили струму, способу зварювання та ін. Для ручного дугового зварювання коефіцієнт наплавлення складає близько 6 – 12 г/А·год.

3.4. Обладнання і матеріали

Для виконання роботи задіяні:

- пост для ручного дугового зварювання;
- маски зварювальника і спецодяг;
- електроди;
- зразки для наплавлення швів;
- терези, лінійки, штангенциркуль.

3.5. Порядок виконання роботи

Після засвоєння теоретичного матеріалу студенти під керівництвом навчального майстра засвоюють практичні навички ручного дугового зварювання.

Кожному студенту дається рекомендація стосовно зварювання на заданих параметрах режиму. Також кожен студент отримує зразок з вуглецевої сталі і один електрод. Далі студенти індивідуально на терезах визначають масу зразка до наплавлення; вимірюють довжину електрода до наплавлення з допомогою лінійки; визначають масу одного сантиметра електродного дроту.

Для такого визначення з допомогою штангенциркуля вимірюється діаметр електродного дроту і розраховується маса одного сантиметра (г/см) за формулою

$$Q_{\text{пог}} = \frac{\pi d^2}{4} \cdot j, \quad (3.7)$$

де π – 3,14;

d – діаметр електродного дроту, мм;

j – щільність сталі, 7,8 г/см³.

- Кожен студент, згідно значення $I_{\text{зв}}$, виконує наплавлення на зразок безперервно на протязі 2-3 хв.

- Після наплавлення знову вимірюється довжина електроду і визначається маса наплавленого електродного металу. Таке визначення здійснюють шляхом множення різниці довжин електродів до і після наплавлення на погонну масу електродного дроту.
- На терезах визначається маса зразка після наплавлення і за різницею маси після і до наплавлення встановлюється маса наплавленого металу.
- Дані вимірювань заносять в таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 - Експериментальні данні

| Показники | Значення |
|---|----------|
| Зварювальний струм, А | |
| Довжина електроду до наплавлення, мм | |
| Довжина електроду після наплавлення, мм | |
| Маса розплавленого електродного металу, г | |
| Маса пластини до наплавлення, г | |
| Маса пластини після наплавлення, г | |
| Маса наплавленого металу, г | |

Кожен студент за показниками вимірювань (табл. 3.1) за формулами (3.2), (3.3), (3.5) визначає α_p , Ψ і α_H .

3.6. Вказівки по оформленню звіту

В зошиті для лабораторних робіт записують порядковий номер роботи, її назву, мету роботи і перелік обладнання та матеріалів, які задіяні в роботі.

Далі, виконується опис виконаної роботи, наводяться формули для визначення коефіцієнтів розплавлення електродного металу (3.2), втрат (3.3) та наплавлення (3.3) і (3.6) а також їх складові. Кожен студент наводить таблицю 3.1. з практично отриманими даними, а також показники розрахунків визначення α_p , Ψ і α_H за відповідно наведеними формулами.

Оформлення звіту завершується висновками стосовно виконаної роботи.

3.7. Контрольні питання

1. Яку роль відіграє при зварюванні покриття електродів?
2. Які компоненти входять до складу електродного покриття?
3. Що являє собою електрична дуга?
4. Які значення температури електричної дуги стосовно електродів з покриттям, на катоді, аноді і по висі дуги.
5. Як утворюється зварювальна ванна і як відбувається формування зварних швів?
6. Від яких зварювальних параметрів залежить глибина проплавлення основного металу?
7. Що спричиняє втрати розплавленого електродного металу в процесі зварювання?
8. Що характеризують коефіцієнти розплавлення і плавлення?
9. Від чого залежать показники коефіцієнтів розплавлення і наплавлення?
10. Як визначається коефіцієнт втрат розплавленого електродного металу?

Список літератури

1. Биковський О. Г. Довідник зварника /Биковський О. Г. – Київ.: «Основа», 2014. - 443с.
2. Патон Б. Е. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением.: підручник: для студ. Вищ. навч. закл. /Под ред. Б. Е. Патона. – М.: Машиностроение, 1974. – 767 с.

Лабораторна робота 4

ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОСТРУКТУРИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ МІКРОТВЕРДОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ІЗ ТЕПЛОСТІЙКОЇ ПЕРЛІТНОЇ СТАЛІ 12Х1МФ

Мета роботи:

- вивчити мікроструктуру і визначити мікротвердість зварних з'єднань зі сталі 12Х1МФ;
- засвоїти методику складання та оформлення висновку за результатами дослідження.

4.1. Загальні положення

Із теплостійкої перлітної сталі 12Х1МФ виготовляють зварні з'єднання паропроводів енергоблоків ТЕС потужністю 150, 200 і 300 МВт. З розрахунковим тиском 14 МПа і температурою 545- 565⁰С.

Хімічний склад сталі 12Х1МФ [1] (по масі) наводиться в таблиці 4.1

Таблиця 4.1 - Хімічний склад сталі 12Х1МФ

| C | Cr | Mo | V | Mn | Si | Ni | Cu | S | P |
|---------------|-------------|---------------|---------------|-------------|---------------|--------|-------|------------|--------|
| 0,08- 0,15 | 0,9- 1,2 | 0,25- 0,35 | 0,15- 0,30 | 0.4- 0,7 | 0,17- 0,37 | ≤ 0,25 | ≤ 0,2 | ≤ 0,025 | ≤ 0,03 |

Залишкове залізо

Критичні точки, ⁰С: $A_{c1} = 740 - 780$; $A_{c3} = 880 - 900$; $A_{\gamma1} = 720 - 740$;
 $A_{\gamma3} = 820 - 830$.

Технологічні дані: 1) сталь 12Х1МФ виплавляється в відкритих електродних печах та з використанням електрошлакового переплаву; 2) охолодження проводять після плавки на повітрі; 3) запропоновані режими термічної обробки труб – нормалізація від 950 – 980⁰С, відпуск на повітрі; 4)

сталь добре зварюється. Для зварювання використовують електроди ЦЛ - 20М (ручне дугове зварювання) та електродний дріт Св - 08ХМФА (дугове механізоване зварювання в середовищі 50 – 75% CO₂ + 50 – 25% Ar).

Запропонована термічна обробка забезпечує необхідні для експлуатації механічні властивості та жароміцність цієї сталі. При нормалізації елементи Мо, Сг, V легують ферит, а високий відпуск забезпечує розпад залишкового аустеніту і випадання карбідів типу M₃C (Fe, Сг, Мо)₃C та VC, внаслідок чого підвищується рівень співвідношення міцності і пластичності та ударна в'язкість. До складу вихідної (здаточної) структури повинно входити 70-90% бейніту, ферит залишкове [1]. Якщо співвідношення складових не буде відповідати приведеним вимогам, то таку структуру вважають бракованою [2,3].

Внаслідок зварювального нагрівання в зоні термічного впливу (ЗТВ) зварних з'єднань протікають відповідні структурні перетворення, які зумовлюють їх вихідну структурну неоднорідність. Слід звернути увагу на те, що від рівня структурної неоднорідності залежать властивості зварних з'єднань. Наприклад, зварні з'єднання труб із сталі 12Х1МФ можуть мати локальні м'які феритні прошарки на ділянці сплавлення зони термічного впливу рис. 4.1. Присутність таких прошарків значно знижує експлуатаційні характеристики зварних з'єднань. Структура, що має наведені феритні прошарки, вважається бракованою [1, 2].

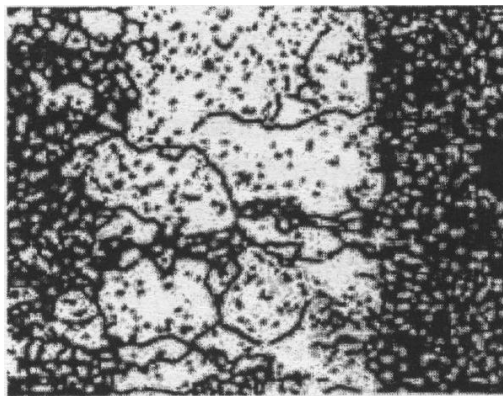


Рис. 4.1 – Структура ділянці сплавлення зони термічного впливу. ×100

На ділянці перегріву ЗТВ може утворюватись структура з дещо більшим розміром аустенітних зерен ніж структура металу основного або наплавленого, рис. 4.2. В цілому структура цієї ділянки відповідно є більш грубою.

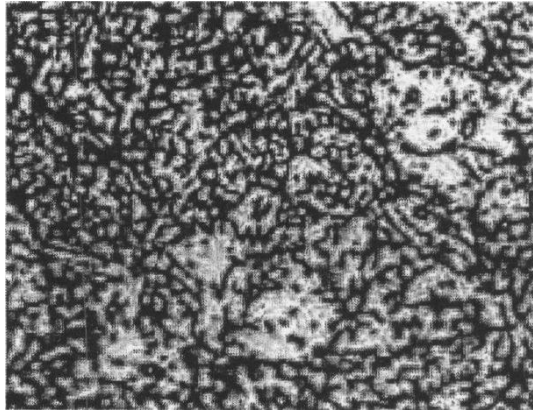


Рис. 4.2 – Структура ділянки перегріву зони термічного впливу. $\times 100$

В структурі ділянки неповної фазової перекристалізації, метал якої нагрівається в області температур A_{c1} - A_{c3} , присутні нові продукти розпаду аустеніту (грубо пластичний перліт, сорбіт чи тростит). Утворення продуктів розпаду аустеніту переважно зумовлено швидкістю охолодження після зварювального нагрівання, рис.4.3

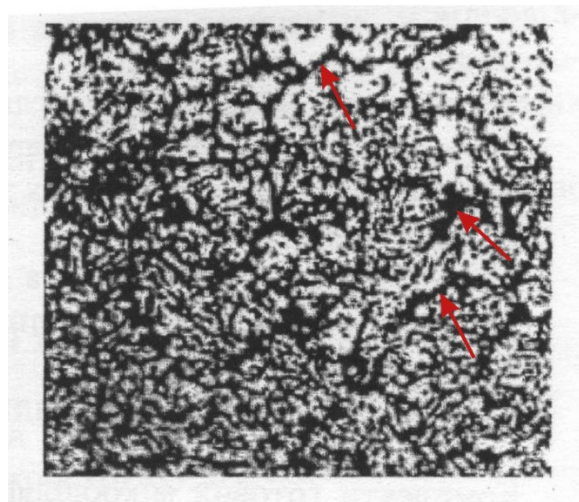


Рис. 4.3 – Структура ділянки неповної перекристалізації зони термічного впливу. Нові продукти розпаду аустеніту показані стрілками. $\times 100$

Розміри зерен на дільниці неповної перекристалізації є дещо меншими, чим зерна основного металу. Меншою є також і міцність, а пластичність тут може бути більшою, що підтверджується даними мікротвердості.

Відомо, що зварювальне нагрівання зумовлює утворення в зварних з'єднаннях залишкових напружень, структурні зміни та додаткову жорсткість. Зварювальні напруження можуть визивати крихке руйнування зварних з'єднань. Структура, що має бал зерна нижчий від 4-го [3], вважається бракованою.

При зварюванні слідє підбирати такі режими, що змогли б забезпечити одержання оптимальної вихідної структури зварних з'єднань. Під оптимальною структурою вважається така структура, що в можливо меншій мірі відрізняється від основного металу.

Експлуатаційні характеристики зварних з'єднань із даної сталі переважно визначаються їх вихідною структурою, тобто структурою, що утворюється після зварювального нагрівання і наступної термічної обробки.[4,5].

Термічна обробка зварних з'єднань забезпечує:

- зниження залишкових зварювальних напружень;
- зміцнення металу зварних з'єднань шляхом дрібнодисперсного твердіння;
- покращення структури та підвищення сумісного рівня міцності та пластичності зварних з'єднань.

4.2. Необхідне обладнання та прибори

Комплекти готових зразків мікрошліфів зварних з'єднань, різних товщин із сталі 12Х1МФ; мікроскопи МІМ - 7 - 3 шт; прилади ПМТ -3 - 2 шт; наждачна бумага зернистістю 10 – 140 мкм; мікропорошки М-7, М-5; ДСТУ 89726:2019. Методи визначення зерна – 3 екз.; альбоми типових мікроструктур – 5 екз; реактиви, табл. 4.2.

Таблиця 4.2- Реактиви для хімічного травлення зварних з'єднань із сталі 12Х1МФ

| Склад реактиву | Особливості травлення | Мета травлення |
|--|--|--|
| 4 г пікринової кислоти, 100 мл етилового спирту | Травлення зануренням або з допомогою тампону. Продовження травлення залежить від типу вихідної структури. Для виявлення контрастної структури зерен Fe_{α} рекомендується багаторазове полірування та травлення | Для виявлення вихідної мікроструктури, в т.ч. структурної неоднорідності зварних з'єднань |
| 1-5 мл азотної кислоти, 95-99 мл спирту (етилового або метилового) | Тривалість травлення від декількох секунд до 5-7 хвилин. Для посилення контрастності при виявленні границь зерен, або продуктів нового розпаду аустеніту рекомендується підігріти реактив до 35-50 ⁰ С. | Для виявлення мікроструктури та нових продуктів розпаду аустеніту, а також границь зерен в зварних з'єднаннях. |

4.3. Порядок виконання роботи

Дана робота має науково-дослідний характер.

Для виконання роботи кожному студенту індивідуально видають зразки (темплети) зварних з'єднань із сталі 12Х1МФ, що виготовлені різними способами дугового зварювання. Студенти виготовляють мікрошліфи та досліджують мікроструктуру зварних з'єднань. При цьому виконується травлення з допомогою відповідного реактиву (табл.4.2).

Після вивчення структури студенти заміряють, у відповідності до рис.4.2, мікротвердість H_{μ} і дані заносять до протоколу досліджень. Потім, за отриманими даними, будують графік мікротвердості зварних з'єднань, рис. 4.3.

Опис досліджених мікроструктур необхідно виконати по наступній схемі.

Протокол дослідження



Вид зварювання.....
Мікроструктура металу шва.....
.....
Бал зерна.....
 H_{μ}



Мікроструктура ділянки перегріву.....
.....
Бал зерна.....
Усереднені розміри ділянки перегріву, мм
.....
 H_{μ}



Мікроструктура ділянки неповної перекристалізації...
.....
Бал зерна.....
 H_{μ}
Усереднені розміри ділянки неповної перекристалізації, мм.....



Мікроструктура основного металу.....
.....
Бал зерна.....
 H_{μ}

4.4. Оформлення звіту

В звіті кожен студент повинен навести хімічний склад сталі 12Х1МФ, пояснити роль легуючих елементів, що входять в цю сталь, а також їх вплив на структурні та фазові перетворення і відповідно на механічні властивості. В протокол слід занести структуру ділянок зварного з'єднання із цієї сталі та дані її мікротвердості після відпуску. Слід також обґрунтувати область застосування зварних з'єднань із цієї сталі та відповідність дослідження зварних з'єднань експлуатаційним вимогам.

У звіті студенти приводять результати досліджень в наступному порядку.

1. Виконують ескіз зварного з'єднання та дають коротку характеристику його мікроструктури. Відповідно до рис.4.4 заміряють ширину ділянок перегріву та неповної перекристалізації ЗТВ. Дані заносять до протоколу досліджень.

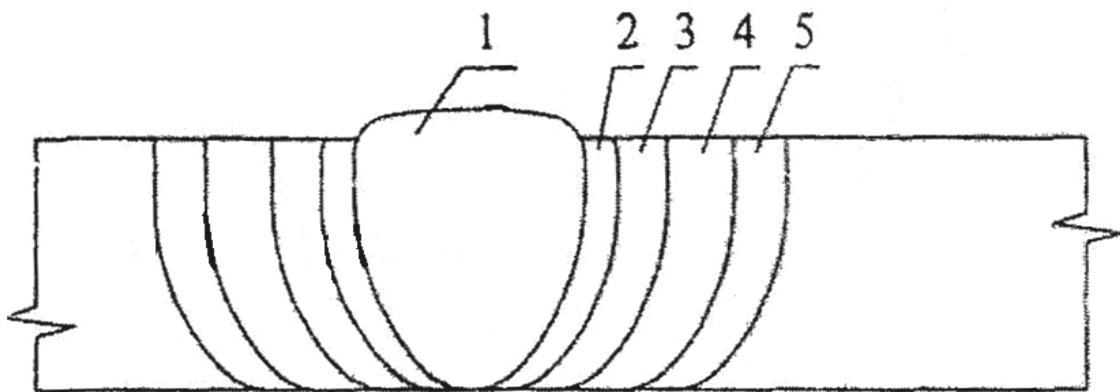


Рис.4.4 – Ескіз зварного з'єднання із сталі 12Х1МФ: 1- метал шва; 2 - ділянка сплавлення; 3 – ділянка перегріву; 4 – ділянка неповної перекристалізації; 5 –основний метал

2. На поперечному перерізі зварного з'єднання (рис. 4.4) рекомендується виконувати заміри мікротвердості по області металу шва, ділянці сплавлення, перегріву, неповної перекристалізації та основного металу. Потім слід визначити середнє значення мікротвердості та занести його до протоколу, а також використати при побудові графіку, рис.4.5.

Відповідно до замірів мікротвердості на рис 4.5 вказуються ділянки зварного з'єднання.

3. Рекомендується відповідно зарисувати у протоколі структуру ділянок зварного з'єднання та визначити бал зерна на цих ділянках відповідно ДСТУ 8972:2019.

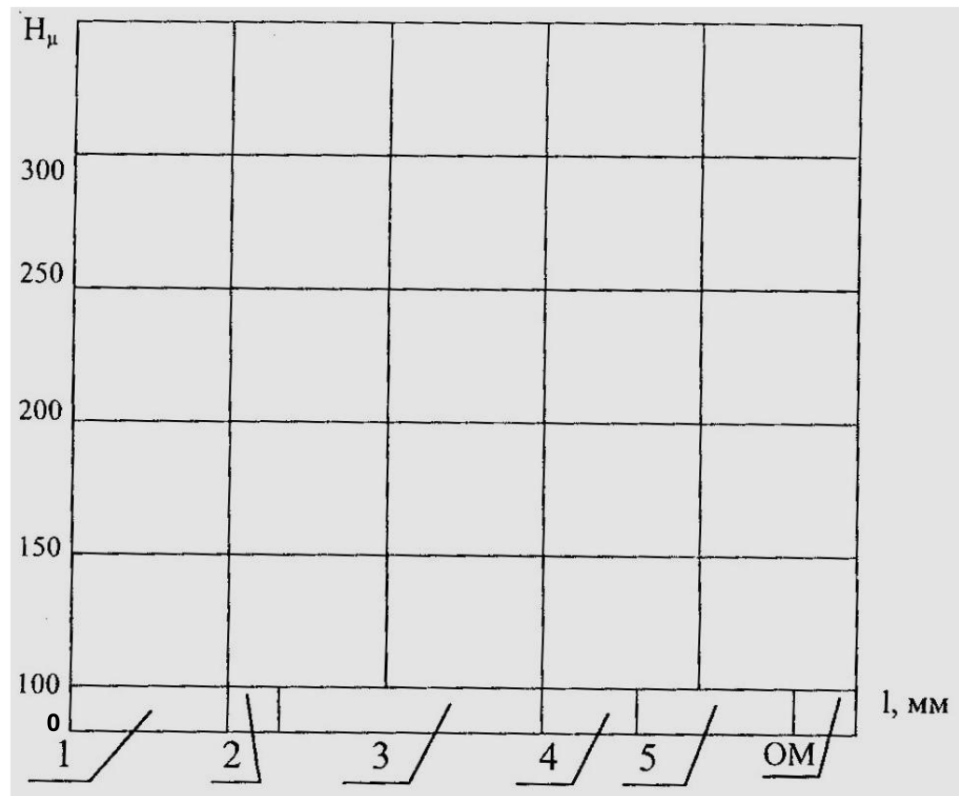


Рис. 4.5 – Мікротвердість зварного з'єднання. 1 – метал шва; 2 – ділянка сплавлення; 3 – ділянка перегріву; 4 – ділянка нормалізації; 5 – ділянка неповної перекристалізації; OM – основний метал

4. Оформлений акуратно звіт студенти подають на підпис викладачу. По матеріалу звіту задаються контрольні запитання на предмет закріплення у студентів набутих знань та навичок, а також виявлення їх рівня. Відповідно виставляються оцінки за виконану роботу.

Контрольні запитання

1. Які сталі називають перлітними?
2. Що таке жароміцність, та як жароміцність визначається?
3. Яка роль легуючих елементів Cr, Mo, таV в сталі 12X1МФ?
4. Які карбіди утворюються в сталі 12X1МФ?
5. В чому сутність визначення мікротвердості?
6. Який механізм руйнування зварних з'єднань із сталі 12X1МФ енергетичного обладнання?
7. Які фізичні умови експлуатації сталі 12X1МФ енергетичного обладнання?
8. Поясніть значення критичних точок A_{c1} , A_{c3} , A_{g1} , A_{g3} ?
9. Які структурні складові можуть входити до складу нових порцій розпаду аустеніту на ділянці неповної перекристалізації. Що визначає формування їх структури?
10. Яка структура може утворюватися на ділянці перегріву?
11. Яка вихідна структура зварних з'єднань із сталі 12X1МФ є здатною, тобто пригодною для експлуатації?
12. Чому при зварюванні утворюється структурна неоднорідність в зварних з'єднаннях?
13. Які структури зварних з'єднань із сталі 12X1МФ є бракованими?
14. Якою є залежність між структурою зварних з'єднань та їх мікротвердістю?
15. Що таке карбіди?
16. Який ферит вважають легованим?

Література

1. ДСТУ EN 10216-2:2016. Труби сталеві безшовні для роботи під тиском. Технічні умови постачання. Частина 2. Труби з нелегованих і легованих сталей з нормованими властивостями за підвищених температур (EN 10216-2: 2013, ІДТ). [На заміну ДСТУ EN 10216-2:2015; чинний від 2017-10-01]. Вид.офіц. Київ: Укр НДНЦ, 2018. 38с.
2. СОУ-Н ЕЕ 39.502:2008. Експлуатація трубопроводів теплових електростанцій. Типова інструкція.[Затв. нак. № 660 МПЕ України, 24.12.08]. Угод. Деп. ЕЕ, Держпромиднагляд. Розроб. Львів ОРГРЕС, Дон ОРГРЕС. 27с
3. ДСТУ 89726-2019. Сталі та сплави. Методи виявлення та визначення величин зерна [На заміну ГОСТ 5639-82; чинний від 2021-01-01]. Київ: Укр. НДНЦ, 2021. 30с.
4. Дмитрик В.В. Структурні зміни в металі зварних з'єднань паропроводів після тривалої експлуатації /Дмитрик В.В., Глушко А.В. // Автоматичне зварювання. 2017, №7. –С19-23.
5. Дмитрик В.В. Особливості пошкоджуваності зварних з'єднань паропроводів за механізмом повзучості / Дмитрик В.В., Барташ С.Н. // Автоматичне зварювання. 2010. №6. – С. 22-25.

Лабораторна робота 5

ДОСЛІДЖЕННЯ ВІДМАНШТЕТОВОГО ФЕРИТУ, ЯК ДЕФЕКТНОЇ СТРУКТУРИ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ

Мета роботи: Вивчення особливостей відманштетового фериту, як дефектної структури, що може утворюватися в зварних з'єднаннях із низько вуглецевих низьколегованих сталей.

5.1. Підготовка до лабораторної роботи.

При підготовці до лабораторної роботи необхідно вивчити теоретичний матеріал, наведений у списку літератури, а також у цих методичних вказівках; витримувати послідовність дій при виконанні лабораторної роботи; у стислій формі описати виконання лабораторної роботи та зробити відповідні висновки. У результаті проведення лабораторної роботи доцільно поглибити знання та засвоїти:

- мету та зміст роботи;
- перетворення в металі зварних з'єднань, які зумовлені зварювальним нагріванням;
- перетворення аустеніту при безперервному охолодженні;
- вплив легуючих елементів на аустенітне перетворення;
- ізотермічне перетворення аустеніту в легованих сталях;
- перлітне перетворення;
- мартенситне перетворення та його особливості;
- бейнітне (проміжне) перетворення;
- особливості утворення відманштетового фериту;
- структурні перетворення при відпуску загартованої сталі;
- дефекти, які виникають при термічній обробці низьковуглецевих сталей;
- дефекти, які зумовлені зварювальним нагріванням при виготовленні зварних з'єднань;
- короткочасні механічні властивості (σ_b , $\sigma_{0,2}$, δ , ψ);
- спосіб вимірювання твердості сплавів за методом Роквелла;
- спосіб вимірювання мікротвердості.

5.2. Загальні положення

На ділянках сплавлення та перегріву зони термічного впливу (ЗТВ) зварних з'єднань із низьковуглецевих низьколегованих сталей, внаслідок надмірного їх зварювального нагрівання може утворюватися надлишковий

ферит. Надлишковий ферит може бути у вигляді збільшених за розміром (2-3 бал, ДСТУ8972:2019) рівновісних феритних зерен, рис. 5.1.а або мати вигляд орієнтовано спрямованих із направленим розподілом, відманштетових зерен фериту, рис.5.1.б. Наведені структури доцільно вважати браком.

Компактні виділення великих феритних зерен утворюються переважно на границях зерен аустеніту, а відманштетові пластинки- всередині аустенітних зерен. Запорукою утворення відманштетового фериту є умова, що аустенітне зерно досить велике 2-3-й бали. Таке зерно на ділянках сплавлення та перегріву ЗТВ утворюється внаслідок надмірного зварювального нагрівання з'єднань. Доцільно нагадати, що метал наведених ділянок тривалий час знаходиться в області температур із верхньою границею T_S і нижньою близько 1150°C .

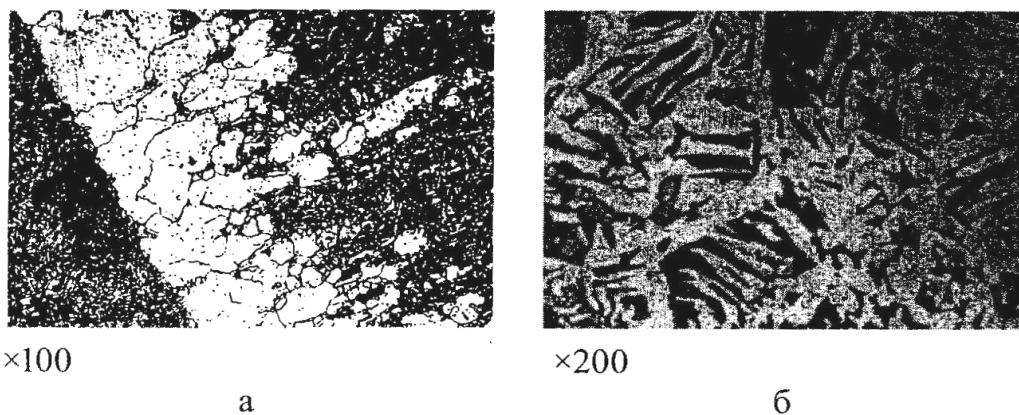


Рис.5.1 – Мікроструктура зварних з'єднань із теплостійких сталей:

а) локально згруповані феритні зерна на ділянці сплавлення ЗТВ (сталь 12Х1МФ);

б) відманштетова структура ділянки перегріву (сталь 15Х1М1Ф)

Водночас при зменшенні розміру аустенітного зерна частка відманштетового фериту також зменшується, а частка великих рівновісних зерен фериту зростає. Утворення відманштетових зерен відбувається в області температур верхня границя якої знаходиться приблизно на 50°C нижче A_{c3} , а нижня між $500-600^{\circ}\text{C}$. Відманштетова

структура утворюється в сталях, де вміст вуглецю $< 0,40\%$. Тобто кількість відманштетової структури в наведених сталях залежить від процентного вмісту вуглецю.

Утворення голчатого фериту іде за механізмом зрушення; голчаті зерна виростають так, як і при бейнітному перетворенні. Голчаті зерна фериту у відманштетовій структурі зустрічаються у вигляді паралельних груп, рис.5.1 б, які появляються на визначених площинах всередині зерен аустеніту. Існує орієнтаційний зв'язок між феритом та вихідним аустенітом. Встановлено, що ферит виділяється на площинах $\{111\}$ або $\{100\}$ аустеніту. Між суміжними кутами із голчатих зерен фериту двох груп знаходяться границі зерен, рис 5.1.

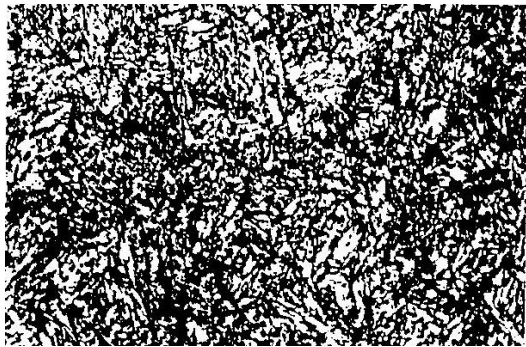


Рис.5.2 – Відманштетова структура з добре розвинутою сіткою та голками фериту. $\times 100$

Утворенню голчатої структури сприяє збагачений вуглецем аустеніт, що знаходиться між зростаючими пластинками фериту і перетворюється переважно в перліт.

Утворення відманштетового фериту кристалографічно упорядковано. Орієнтація фериту підпорядковується принципу структурної відповідності $\{111\}_A \parallel \{100\}_F$. Наведені площини відносяться до найбільш щільно упакованих площин в о.ц.к. та в г.ц.к. решітках і мають досить схожу будову. Механізм утворення та зростання відманштетової пластинки фериту викликає міграцію сходинки на її широкій грані, рис 5.3.

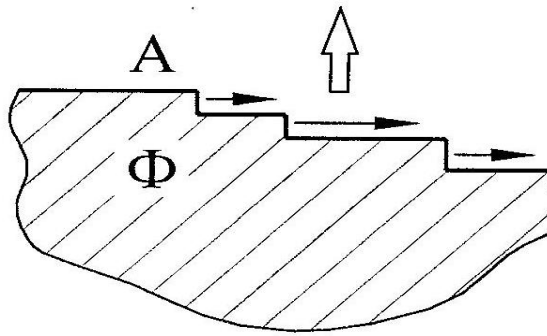


Рис. 5.3 – Схема росту феритного зерна внаслідок міграції сходинок впродовж його поверхні

Міграцію ступеньок, висота яких сягає 10^1-10^3 нм, можна відслідкувати за допомогою електронного мікроскопа. Передбачається, що широкі плоскі ділянки поверхні феритних пластинок (фасеток) є повністю, або частково когерентними та практично нерухомими границями. На відміну від пластинок, ступеньки на них характеризуються високою рухомістю та відсутністю когерентності. Саме через такі некогерентні границі атоми дифундують з аустеніту до фериту, рис.5.3. Пересування сходинок вдовж феритної пластинки, що позначено горизонтальними стрілками, демонструє збільшення товщини такої пластинки (вертикальна стрілка) на висоту самої сходинок. Рис.5.3.

Дослідження збільшення кристалів фериту шляхом руху сходинок біля границі розділу γ та α фаз дозволяє виявити важливу особливість легування фериту, а також утворення та розподіл дрібно дисперсних карбідних фаз. рис. 5.4.

Важливо, щоб дуже дисперсні карбіди MC та M_2C рівномірно розподілялися по тілу та по границях феритних зерен. Наприклад, карбіди VC мають розміри по довжині ≤ 10 нм і їх можна віднести до наноматеріалів. Відстань між розташованими в структурі зварних з'єднань карбідами VC може складати від 10 до 50 нм. Дуже важливим є саме рівномірний розподіл таких карбідів у структурі зварних з'єднань, що

зумовлює значне підвищення їх фізико-хімічних та механічних властивостей.

Карбідні фази досліджують за допомогою електронного мікроскопа при відповідному збільшенні.

При формуванні структури у вигляді феритно-карбідної суміші, на нерухомій когерентній площині на границі розподілу γ/α зароджуються карбіди, які зростають під час міграції ступеньки навколо границі фасетки. Водночас, на самій сходинці, внаслідок її швидкого руху, карбіди виділитися не встигають, рис.5.4.

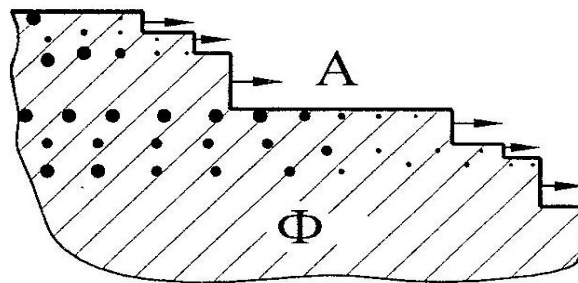


Рис.5.4 – Схема утворення та зростання міжфазових виділень карбідів [2]

При створенні кожної наступної сходинки утворюються нові ланцюжки дисперсних карбідних частинок. Відстань між ланками відрізняється і дорівнює відповідно висоті сходинок.

Міжфазними виділеннями називають ланцюжки карбідних частинок, що утворюються за час формування фериту. В наслідок дуже дрібної дисперсності виділень, вони суттєво зміцнюють ферит. Крім того, міжфазні виділення характеризуються значно меншим рівнем коагуляції при довготривалій експлуатації зварних з'єднань в умовах повзучості, в порівнянні з частинками карбідів, що виділилися з мартенситу при їх післязварювальному відпуску. Відмінність пояснюється тим, що у фериті

щільність дислокацій та субмеж, що зумовлюють дифузію значно менша, ніж у відпущеній сталі.

Стійкість дисперсних частинок карбідів I-ї групи до коагуляції, що відбувається при довготривалій експлуатації, в умовах повзучості зварних з'єднань із теплотривких та жароміцних сталей, наприклад 15X1M1Ф, 10X9B2МБР, 10X16H16B2МБР, є високою.

Така стійкість карбідів є дуже важливою фізичною властивістю теплотривких та жароміцних сталей стосовно їхнього використання в атомній та тепловій енергетиці.

5.3. Прилади, обладнання, наочні посібники.

Для виконання лабораторної роботи використовуються:

- комплекти готових мікрошліфів зварних з'єднань із сталей: 10X9МФБ, 15X2МФ, 15X1М1Ф, 10X18H12Т;
- мікроскоп МІМ-8 – 1 шт;
- мікроскоп МІМ-7 -3 шт;
- альбоми мікроструктур – 11 шт;
- муфельні печі – 4 шт;
- прилад для вимірювання мікротвердості ПМТ-3 – 1 шт;
- точило -1 шт;
- верстати для шліфування та полірування -2 шт;
- бачки з маслом та водою;
- 4%-ний розчин азотної кислоти в спирті;
- Щипці.

5.4. Техніка безпеки

Перед початком роботи всі студенти проходять інструктаж з техніки безпеки. Робота виконується в металографічній лабораторії, що відповідає вимогам навчального процесу та техніки безпеки. При проведенні термічної обробки муфельні печі перед завантаженням у них зразків необхідно

вимкнути, а після завантаження – знову ввімкнути. Зразки необхідно брати щипцями, використовуючи при цьому захисні рукавиці.

5.5. Порядок виконання роботи

а) Дослідження структури та властивостей виконують на зразках, рис 5.5.

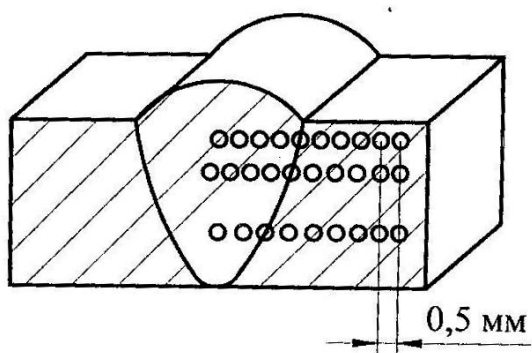


Рис.5.5 – Схема зразка зварних з'єднань для дослідження структури та вимірювань твердості. Робоча поверхня заштрихована. ○ – місця вимірювань твердості

б) Особисто кожному студенту видається зразок зварного з'єднання з наведених в п.5.3 сталей.

в) Для вивчення структури мікрошліфи, рис 5.5, травлять 4%-ним розчином азотної кислоти в спирті.

г) На кожному зі зразків зварних з'єднань, за допомогою оптичного мікроскопу на ділянках сплавлення та перегріву ЗТВ досліджують мікроструктури відманштетового або перегрітого фериту та дають їй короткі характеристики.

д) Робочу поверхню зразків зачищають шліфувальним папером, а потім за допомогою ПМТ-3 виміряють на ній мікротвердість. Результати вимірювань заносять до таблиці 5.1.

е) На мікрошліфах зварних з'єднань аналізується мікроструктура зварних з'єднань. Потім мікроструктуру замальовують, відповідно рис. 5.6. записують склад та особливості структури кожної зі сталей, як це наведено на рис. 5.6.

Таблиця 5.1 – Результати вимірювань

| Марка сталі зварних з'єднань | Коротка характеристика структури | Мікротвердість, Нц |
|------------------------------|----------------------------------|--------------------|
| | | |

Марка сталі _____

Вміст вуглецю в сталі, % _____

Вміст легуючих елементів у сталі, % _____

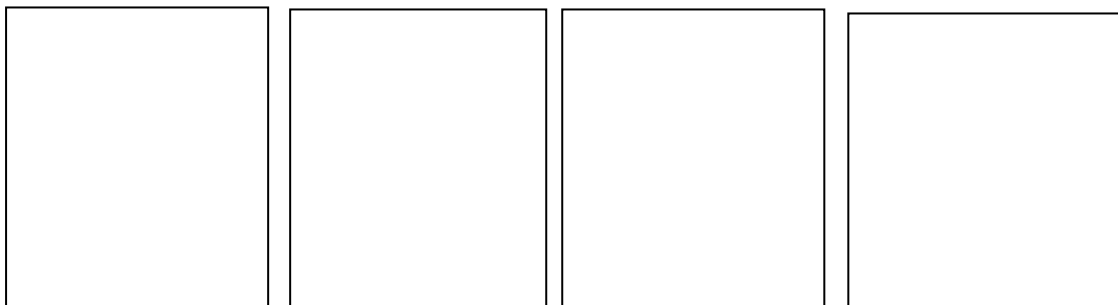
Структура зварного з'єднання:

металу шва _____

ділянки сплавлення _____

ділянки перегріву _____

основного металу _____



а)

б)

в)

г)

Рис.5.6 – Структура зварного з'єднання зі сталі _____

а) структура металу шва; б) структура ділянки сплавлення;

в) структура ділянки перегріву; г) структура основного металу.

5.6. Вказівки до оформлення звіту

- 1) У журналі для лабораторних робіт записують назву та мету роботи, а також наводять її стислий матеріал, в т.ч. опис структури зварних з'єднань, обладнання та інструменти, які використовувалися при її виконанні.
- 2) Кожен студент зарисовує мікроструктуру зварних з'єднань (рис. 5.6), наводить її короткий опис та заносить в таблицю відповідні дані по визначенню мікротвердості.
- 3) Кожен студент будує графік мікротвердості зварних з'єднань.
- 4) Оформлений акуратно звіт кожен студент подає на підпис викладачеві. За матеріалом звіту задаються контрольні питання з метою закріплення студентами набутих знань та навичок, а також визначення рівня їх засвоєння. Відповідно виставляються оцінки за виконану роботу.

5.7. Контрольні питання

- 1) Чому при зварюванні сталей, що містять вуглецю менше 0,40%, на ділянках сплавлення та перегріву ЗТВ може утворюватися відманштетовий ферит?
- 2) Чому на ділянках сплавлення та перегріву ЗТВ можуть утворюватися локально згруповані великі рівновісні феритні зерна, (рис 5.1).
- 3) Поясніть особливості, що характеризують відмінність утворення відманштетового фериту та великих локально згрупованих феритних зерен на ділянках сплавлення та перегріву ЗТВ.
- 4) Дайте характеристику ділянці сплавлення ЗТВ.
- 5) Дайте характеристику ділянці перегріву ЗТВ.
- 6) Дайте характеристику фериту та наведіть особливості його легування.

- 7) Поясніть сутність $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$ перетворення, що характерно для зварювального циклу при отриманні зварних з'єднань із вуглецевих та низьколегованих сталей.
- 8) Як впливають легуючі елементи на $\alpha \rightarrow \gamma$ та $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворення в умовах зварювального нагрівання?
- 9) Поясніть умови утворення карбідних фаз I та II груп у зварних з'єднаннях.
- 10) У чому відмінність карбідів I-ї та II-ї груп. Наведіть коротку характеристику цих карбідів.
- 11) Поясніть сутність мартенситного перетворення.
- 12) Поясніть сутність бейнітного (проміжного) перетворення.
- 13) Дайте коротку характеристику механічним властивостям ($\sigma_B, \sigma_{0,2}, \psi, \delta$).
- 14) Наведіть особливості вимірювання твердості за методом Роквелла.
- 15) Поясніть сутність методу визначення мікротвердості.

Список літератури

1. Єфіменко М. Г. Металознавство і термічна обробка зварних з'єднань. /Єфіменко М. Г., Радзивілова Н. О. – Харків, 2003. – 488 с.
2. Металознавство /Бялік О. М., Черненко В. С., Писаренко В. М., Москаленко Ю. Н. – Київ.: Політехніка, 2002. – 383с.
3. Дмитрик В. В. Структурні зміни в металі зварних з'єднань тривало експлуатованих паропроводів /Дмитрик В. В., Глушко А. В., Іглін С. П. // Автоматичне зварювання, 2020. №2. – С.1-4.
4. Єфіменко М. Г. Металографія зварних з'єднань : навчальний посібник, МОНУ, НТУ «ХП». /Єфіменко М. Г., Погрібний М. А., Радзивілова Н. О. - Харків: НТУ «ХП», 2016. 119с.

Лабораторна робота 6

ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОСТРУКТУРИ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ІЗ СПЕЦІАЛЬНИХ СТАЛЕЙ

Мета роботи: набути навички визначення структурно-фазового стану зварних з'єднань із спеціальних сталей і величини зерна в їх структурі.

6.1. Підготовка до лабораторної роботи

При підготовці до лабораторної роботи необхідно:

- вивчити теоретичні матеріал, який наведено в даних методичних вказівках, а також у списку літератури;
- витримувати послідовність при виконанні роботи, п.6.5;
- описати виконання роботи і зробити відповідні висновки.

В результаті проведення лабораторної роботи доцільно поглибити знання шляхом засвоєння наступного матеріалу:

- структурно-фазові перетворення в металі зварних з'єднань, які відбуваються під впливом зварювального нагрівання;
- будову зони термічного впливу зварних з'єднань;
- дефекти, які можуть утворюватися в зварних з'єднаннях при їх виготовленні.

6.2. Загальні положення

Мікроскопічний аналіз металу зварних з'єднань передбачає дослідження їх будови (структури) шляхом використання оптичного або електронного мікроскопів. Між макроструктурою і мікроструктурою, а також властивостями металу існує визначена залежність. Мікроаналіз дозволяє визначити форму і розміри окремих зерен і фаз, а також їх зміст, розташування, наявність неметалевих включень і мікродифектів, та структур, які відносять до браковочних. Мікроаналіз також забезпечує визначення

розмірів зерен на ділянках зони термічного впливу зварних з'єднань, а також в металі шва і в основному металі. При проведенні мікроаналізу визначають тип структури (ферит, аустеніт, перліт, мартенсит та ін.), вимірюють мікротвердість. Дослідження мікроструктури надає можливість визначити залежність формування структури в отриманих зварних з'єднаннях від зварювального нагрівання. Загалом зварювальне нагрівання забезпечує формування структури металу шва і ділянок зони термічного впливу (ЗТВ).

Зона термічного впливу – область основного металу в якій під впливом зварювального нагрівання відбуваються структурні перетворення. До складу ЗТВ входять ділянки, що мають однотипну структуру. Розміри ділянок рис.6.1. і їх структура залежать від виду зварювання, параметрів режиму зварювання, а також від хімічного складу сталей, що зварюються.

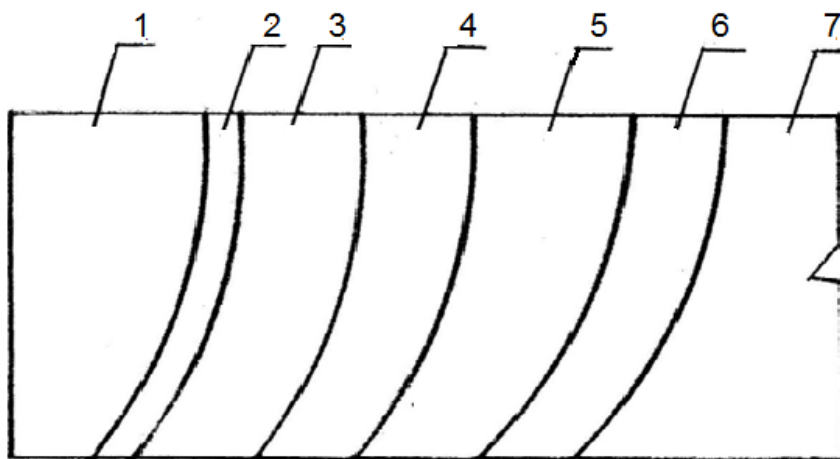


Рис.6.1. – Схема будови зони термічного впливу зразка, виготовленого дуговим зварюванням: 1 – метал шва; 2 – ділянка сплавлення; 3 – перегріву; 4 - нормалізації; 5 – неповної перекристалізації; 6 – рекристалізації і відпуску; 7 – основний метал

Розглянемо структуру зварного з'єднання зі сталі 20Х3НМФА. Середня температура рідкого металу зварювальної ванни для дугового зварювання на середніх режимах складає $1770 \pm 50^{\circ}\text{C}$. Структура металу шва троститно-

сорбітна. Демонструється фото. Безпосередньо до металу шва прилягає ділянка сплавлення, яка зазнає зварювальне нагрівання в області температур $T_S - T_L$. Ширина ділянки сплавлення 0,10 – 0,20 мм. На ділянці сплавлення можуть формуватися крупні феритні або перлітні зерна (бал 3-5, ДСТУ 8272:2019), а також ланцюжки із таких зерен. Утворення крупних феритних і перлітних зерен відбувається при зварюванні на підвищених режимах. Доцільно при зварюванні отримувати плавний перехід між основним металом і металом шва, що забезпечується при зварюванні на оптимальних параметрах режиму і правильному підборі і використанні зварювальних матеріалів.

На ділянці перегріву, яка підлягає зварювальному нагріванню в область температур обмежену $T_S - 1150^{\circ}\text{C}$ (приблизно) формується переважно структура із середніх за величиною зерен (6-8 балів), які мають округлу форму. За типом структури ділянки можна віднести до сорбітної. Ширина наведеної ділянки складає близько 1,8–2,2 мм, (демонструється фото).

Ділянка нормалізації зазнає зварювального нагрівання в область температур 1150°C (близько) – A_{c3} , ширина ділянки складає приблизно 1,2 – 1,5 мм. На зазначеній ділянці формується дрібнозерниста троститна структура, (демонструється фото).

Ділянка неповної перекристалізації підлягає зварювальному нагріванню в область температур обмежену $A_{c1} - A_{c3}$. В структурі ділянки, як її складові, формуються нові продукти розпаду аустеніту у вигляді глобуляризованого перліту, або глобуляризованого сорбіту, чи глобуляризованого троститу. Формування наведених структур забезпечується відповідним зварювальним нагріванням. Ширина зазначеної ділянки складає близько 1,6 – 2,3 мм, (демонструється фото).

Структура основного металу (сталь 20Х3МВФА) складає бейніт відпуску. (Демонструється фото).

Для попередження утворень холодних тріщин леговані сталі зварюють з попереднім і супутнім підігрівом, а також після зварювання витримують

відповідну швидкість охолодження. Відразу після зварювання отримані з'єднання піддають відпуску.

Сталі аустенітного класу (08X16H9M2, 45X14H14B2M, 10X18H12T), а також сталі феритного класу (08X17T, 08X18T1, 12X25T) та ін. при зварюванні не зазнають поліморфних перетворень і тому на ділянці сплавлення можна спостерігати наявність крупних зерен, що надається можливим при зварюванні на підвищених параметрах режиму. Післязварювальний відпуск не змінює величину зерен, усуває зварювальні напруження і надає дисперсійну міцність сталям.

Визначення величини зерна в сталях проводять згідно положень ДСТУ. В наведених положеннях даються рекомендації стосовно визначення середнього діаметра зерна.

6.3. Прилади, обладнання, наочні посібники

Для виконання лабораторної роботи використовують:

- комплект готових мікрошліфів зварних з'єднань із легованих сталей 25X2HMФА, 20X3MBФА, 10X18H12T, 10X9MФБ;
- мікроскоп МІМ – 8 – 1 шт;
- альбоми мікроструктур – 7 шт;
- ДСТУ 8972:2019 – 4 шт;
- Фотографії мікроструктур для проведення кількісного металографічного аналізу – 14 шт.

6.4. Техніка безпеки

Перед початком роботи всі студенти проходять інструктаж з техніки безпеки. Робота виконується в лабораторії кафедри зварювання, яка відповідає вимогам навчального процесу і техніки безпеки. При проведенні термічної обробки зразки зварних з'єднань необхідно брати щипцями, використовуючи при цьому захисні рукавиці.

6.5. Порядок виконання роботи

Дослідження макро- і мікроструктур металу зварних з'єднань із легованих сталей виконується на заздалегідь підготовлених шліфах.

6.5.1. На мікрошліфах, отриманих дуговим зварюванням визначають наявність тріщин, пор, подрізів, несплавлень між валиками, несплавлень по стінкам зазору, а також дефекти форми шва у вигляді нерівномірного підсилення, бугристості і т.п.

Виявлені дефекти зарисовують і наводять їх короткий опис.

6.5.2. Виконують дослідження мікроструктури ділянок ЗТВ, а також металу шва і основного металу зварних з'єднань зі сталей 20Х3МВФА, 25Х2НМФА, 10Х9МФБ і 10Х18Н12Т. згідно досліджень описують наведені структури і наводять у звіті їх рисунки.



Вид зварювання _____

Параметри режиму зварювання:

- струм, А _____

- напруга, В _____

- швидкість зварювання, м/год _____

Мікроструктура металу шва _____

6.5.3. Результати визначення розміру зерна заносять у таблицю 6.1

Таблиця 6.1- Результати визначення розміру зерна

| Номер січних | Довжина січних, ℓ , мм | $\sum \ell$, мм | $\sum L = \frac{\sum \ell}{3\delta}$ | Число пересічень, n_i | $\sum n_i$ | $d_{ум} = \frac{\sum L}{\sum n_i}$ | Розмір зерна, бали |
|--------------|-----------------------------|------------------|--------------------------------------|-------------------------|------------|------------------------------------|--------------------|
| 1 | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | |

6.6. Контрольні питання

- Як визначається величина зерен?
- Чому наявність крупнозернистої структури в ЗТВ не рекомендується?
- В чому відмінність структур перліту, сорбіту, троститу, бейніту і мартенситу?
- Чому зварювання на підвищених параметрах режиму забезпечує отримання крупнозернистої структури в металі зварних з'єднань?
- Наведіть можливі дефекти в зварних з'єднаннях і особливості їх утворення.

Список літератури

1. Металознавство /Бялік О. М., Черненко В. С., Писаренко В. М., Москаленко Ю. Н., - К.: Політехніка, 2002. – 283 с.
2. Биковський О. Г. Довідник зварника /Биковський О.Г. – Київ.: «Основа», 2014. – 442с.
3. Єфіменко М. Г. Металознавство і термічна обробка зварних з'єднань: підручник /М. Г. Єфіменко, Н. О. Радзивілова . – Харків: 2003.- 274с.
4. V. V. Dmytryk. Recrystallization of the metal of welding joints of steam tracks / V. V. Dmytryk, A. V. Glushko, A. K. Tsaryk // Питання атомної науки і техніки. 2019, №5 (123). – с.49-52.

Лабораторна робота 7

ВИВЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ АЛЮМІНІЮ І ЙОГО СПЛАВІВ

Мета роботи: Набути знання стосовно технології зварювання алюмінію і його сплавів.

7.1. Підготовка до лабораторної роботи

Виконання теоретичної і практичної частин роботи базується на знанні розділу присвяченого зварюванню алюмінію і його сплавів дисципліни «Зварювання спеціальних матеріалів». Перед проведенням роботи необхідно вивчити теоретичний матеріал стосовно зварювання алюмінію і його сплавів, які широко використовуються у промисловості.

Виконання роботи розраховано на 4- години навчального часу. На протязі перших 2-х годин засвоюється теоретичний матеріал стосовно алюмінію і його сплавів, а також теоретичний матеріал стосовно зварювання алюмінію і його сплавів. На протязі наступних 2-х годин проводиться інструктаж з техніки безпеки, вивчення обладнання для зварювання алюмінію та його сплавів і засвоєння відповідних навичок. Далі студенти виконують оформлення звіту, наводять висновки і проводиться співбесіда викладача з кожним студентом особисто. Таким чином виявляється рівень засвоєння навчального матеріалу. Відповідно виставляються оцінки.

7.2. Загальні положення

Зварювання алюмінію і його сплавів ускладнюються із-за утворення на їх поверхні міцної, щільної, тугоплавкої плівки Al_2O_3 , що має температуру плавлення близько $2073^{\circ}C$. Перед зварюванням з поверхні заготовок наведена плівка видаляється. При наявності плівки на поверхні заготовок процес зварювання не проводять. Саме тому з робочої поверхні заготовок, а також з

електродного дроту плівку видаляють. Очищення від плівки проводять хімічним і механічним засобами. При використанні хімічного засобу заготовки спочатку обробляють органічними розчинниками. Наприклад бензином або ацетоном. Потім дріт і заготовку обробляють у лужному розчиннику, промивають у гарячій і холодній воді, освітлюють у розчинах кислот, знову промивають і висушують. В монтажних умовах з поверхні заготовок оксидну плівку видаляють металевою щіткою, що має дріт з діаметром менше 0,1 мм.

Для виготовлення зварних з'єднань широко використовують деформовані термічно незміцнені сплави алюмінію з марганцем АМц і з магнієм. Наприклад АМг3, АМг5, АМг6. В процесі автоматичного зварювання під флюсом залишки невидаленої плівки руйнуються під дією флюсу і електричного струму. Наявність зворотної полярності струму (ефект катодного розпилення) руйнує оксидну плівку. При механізованому зварюванні алюмінієвих сплавів використовують хлористі і фтористі флюси лужних елементів (NaCl, KCl, LiF та ін). Флюси захищають розплавлений метал від дії повітря, розкисляють розплавлений метал, забезпечують необхідне формування і якісні характеристики металу шва.

Флюси при зварюванні алюмінієвих сплавів у розплавленому стані мають велику електричну провідність. І тому зварювання алюмінієвих сплавів ведуть не під флюсами, а по флюсу наполовину відкритою дугою. Для зварювання сплавів АМц (алюміній з марганцем) використовують флюс АН-А1, а для алюміній-магнієвих сплавів використовують флюс марки АН-А4. Електродний дріт також вибирають в залежності від марки зварюємих сплавів: для алюмінію марки АО використовують дріт марки АД1. Для сплавів АМц використовують дріт Св-АМц, а для сплавів типу АМг- Св-АМг5.

Зварювання алюмінію і його сплавів ведуть на постійному струмі зворотної полярності. Переважно алюміній і його сплави зварюють в середовищі аргону або гелію, рис. 7.1.

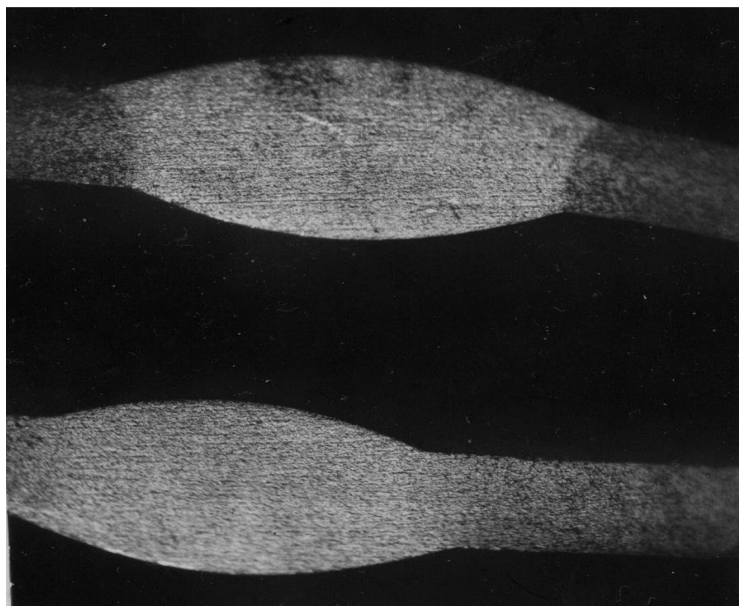


Рис.7.1 –Макроструктура зварного з'єднання алюмінієвого сплаву АМг6. $\times 1,0$

Листи металу, товщиною 0,5-10 мм зварюють вольфрамовим електродом, який не плавиться, з присадковим дротом. А ті листи, що мають товщину понад 10 мм, рекомендується зварювати з підігрівом до 400⁰С. В табл. 7.1. наводяться режими зварювання алюмінієвих сплавів.

Таблиця 7.1.- Режими автоматичного зварювання по флюсу стикових алюмінієвих сплавів

| Товщина зразка, мм | Діаметр електродного дроту, мм | Струм, А | Напруга дуги, В | Швидкість зварювання, м/год | Ширина шару флюсу, мм | Товщина шару флюсу, мм |
|--------------------|--------------------------------|----------|-----------------|-----------------------------|-----------------------|------------------------|
| 6 | 1,2-1,4 | 170-180 | 28-30 | 20-25 | 24-26 | 8-10 |
| 10 | 1,6-1,8 | 220-250 | 32-34 | 20-22 | 26-28 | 8-10 |
| 12 | 1,6-1,8 | 320-340 | 32-34 | 16-18 | 30-32 | 10-12 |
| 16 | 2,5-2,7 | 350-370 | 38-40 | 16-18 | 32-34 | 10-12 |

7.3. Прилади, обладнання, наочні посібники

Для виконання лабораторної роботи використовують:

- Джерело живлення – УДГ 501;
- Напівавтомат – ПШВ-3
- Зварювальні маски, рукавиці, щипці і та ін.;
- Зразки зі сплаву АМг6, розмір – 100x150x8- 10 мм
- Штангенциркуль, металева лінійка;
- Вимірювальні прилади (амперметр, вольтметр).

7.4. Техніка безпеки

Перед початком роботи всі студенти проходять інструктаж з техніки безпеки. Робота виконується в зварювальній лабораторії, яка відповідає вимогам навчального процесу та техніки безпеки.

Перед вмиканням джерела живлення для зварювання сплавів із алюмінію перевіряється наявність його заземлення і щільність стану зварювальних проводів.

Вмикання джерела живлення виконує учбовий майстер. При виконанні процесу зварювання студенти використовують особисті засоби захисту: щитки, спецодяг і зварювальні окуляри. Студенти, що не приймають участь у проведенні експериментів, не повинні знаходитися у зварювальній лабораторії.

7.5. Порядок виконання роботи

7.5.1. Перед проведенням лабораторної роботи кожен студент повинен вивчити матеріал стосовно зварювання алюмінію та його сплавів [1-3]. Робота передбачає індивідуальне виконання її теоретичної і практичної частин з усвідомленням матеріалу наведеного у відповідній літературі.

7.5.2. Група студентів ділиться на підгрупи, до складу яких входить 3 особи. Кожен студент отримує зразок для зварювання.

7.5.3. Під керівництвом учбового майстра кожен студент відпрацьовує навички зварювання горизонтальних швів у нижньому положенні. Якість зварювання контрольних зразків оцінюється викладачем і учбовим майстром.

7.6. Вказівки до оформлення звіту

7.6.1. В журналі для лабораторних робіт записують назву та мету даної роботи, вказують зварювальне обладнання, матеріали та інструменти задіяні при її виконанні.

7.6.2. Під заголовком «теоретична частина» в стислому вигляді записується матеріал п.7.2.

7.6.3. Під заголовком «Практична частина» наводять стислий опис одержаних експериментальних даних. Приводять рисунок отриманого зварного з'єднання.

7.6.4. Ретельно оформлений звіт кожен студент пред'являє викладачеві для перевірки. За матеріалом роботи проводиться індивідуальна співбесіда викладача зі студентами. Згідно засвоєння матеріалу роботи виставляються оцінки.

Контрольні питання

- Наведіть особливості зварювання алюмінію та алюмінієвих сплавів.
- Наведіть механічні і фізичні властивості алюмінію і його сплавів.
- Яка роль флюсів при дуговому зварюванні алюмінію і його сплавів?
- Чому з поверхні алюмінієвих сплавів потрібно вилучити оксидну плівку?
- Наведіть технологію зварювання алюмінієвих сплавів в середовищі аргону або гелію.
- Наведіть технологію зварювання алюмінієвих сплавів з використанням флюсів.
- Наведіть дефекти, що можуть утворюватися при зварюванні алюмінієвих сплавів.

Список літератури

1. Гуревич С. М. Довідник по зварюванню кольорових металів – Київ: – Наукова думка.-1990. -510с.
2. Дяченко С. С. Матеріалознавство /С. С. Дяченко, І. В. Дощечкіна, А. О. Мовлян, Е. І. Плішаков – Харків: ХНАДУ. – 2007. -421с.
3. Биковський О. Г. Довідник зварника /Биковський О. Г. – Київ: «Основа». 2014. -442с.

Лабораторна робота 8

ВИВЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ МІДІ ТА ЇЇ СПЛАВІВ

Мета роботи: Набути знання стосовно технології зварювання міді і її сплавів

8.1. Підготовка до лабораторної роботи

Виконання роботи ґрунтується на набутих знаннях стосовно структури і властивостей міді і її сплавів, що є відповідною основою для вивчення технології зварювання міді і її сплавів. Перед проведенням роботи необхідно вивчити теоретичний матеріал стосовно зварювання міді і її сплавів, що широко використовується у ряді галузей промисловості.

Загалом лабораторна робота розрахована на 2 години учбового часу. При виконанні роботи засвоюється теоретичний матеріал, пов'язаний зі зварюванням міді і її сплавів. Проводиться інструктаж з техніки безпеки, ознайомлення з обладнанням для зварювання міді і її сплавів та засвоюються відповідні навички зварювання. Оформляється звіт і проводиться з кожним студентом співбесіда стосовно засвоєння матеріалу роботи.

8.2. Загальні положення

Мідь характеризується високими фізичними властивостями, а саме пластичністю, тепло і електропровідністю та стійкістю до атмосферної

корозії. Наприклад пластичність міді $\delta = 50...60\%$, відносно низька межа міцності ($\sigma_b = 200...400$ МПа) може, шляхом холодного деформування, підвищуватися до $400...450$ МПа. Із міді виготовляють провідники, деталі теплообмінних апаратів, холодильників, вакуумних агрегатів і та ін.

Мідь кристалізується в кубічну гранецентровану решітку. Ряд елементів Zn, Sn, Al та ін. розчиняються в міді і утворюють тверді розчини заміщення. Сплави, що утворилися мають підвищену міцність, а також інші ніж мідь механічні і фізичні властивості.

При зварюванні міді і її сплавів ураховують їх специфічні властивості: високу теплопровідність і високу рідкотекучість розплавленого металу ванни зварних з'єднань із міді і її сплавів характеризується високим ступенем взаємодії з киснем і воднем. Внаслідок високої теплопровідності міді і її сплавів для зварювання плавленням використовують джерела нагрівання, що мають велику теплову потужність. Дугове зварювання проводять на підвищеному струмі електродами що мають відносно великий діаметр. Високі тепло- і температуропровідність сприяють збільшеним швидкостям охолодження металу шва і біляшовної зони та малому перебуванню зварювальної ванни в рідкому стані. Наведені особливості негативно впливають на формування шва і викликають утруднення при металургійній обробці ванни. Гарному формуванню шва сприяє попередній підігрів, що забезпечує більш рівномірне розподілення теплоти в зварювальній ванні. Попередній і супутній підігрів сприяє недопущенню дефектів (підрізів, напливів, тріщин, пористості), покращує умови кристалізації зварного шва, знижує внутрішні напруження і усуває схильність металу шва до утворення тріщин. Вироби, товщина яких є більшою за 10-15 мм, підігрівають. Температура підігріву міді складає $250-300^{\circ}\text{C}$, латуні $300-350^{\circ}\text{C}$; бронзи $500-600^{\circ}\text{C}$. При зварюванні необхідно надійно захистити метал шва від кисню і водню.

В ремонтних роботах і при разовому виготовленні виробів використовують газове зварювання міді ацетилено-кисневим полум'ям. Присадковим матеріалом слугують мідні прутки з невеликими добавками олова, цинку, що покращує рідкотекучість. Також, як розкислювачі, використовують кремній і фосфор. До складу флюсів, які використовують при зварюванні, входить бура ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$), борна кислота (H_3BO_3) і борний ангідрид (B_2O_3). Після зварювання надається швидке охолодження отриманих з'єднань у воді і прокатка або проковка швів у холодному стані. Прокаткою усувають крихкість, яку надає крупнозерниста структура і сітка закисів міді по границях кристалів.

В промисловості використовують електродугове зварювання міді електродами, що мають покриття. Зварювання проводять на постійному струмі зворотної полярності. При багат шаровому зварюванні міді, яка має товщину більше 10-12 мм (3-6 шарів) використовують електроди діаметром 6-8 мм і зварювальний струм до 500А. Заготівки з міді товщиною до 4 мм зварюють без розділки крайок, а заготівки товщиною до 100 мм з одностороннім розділенням крайок при куті схилу крайок до $60-70^\circ$. Зварювання виконують в нижньому горизонтальному положенні.

Латуні (сплави міді з цинком, де цинку до 50%) зварюють шляхом використання автоматів і напівавтоматів під флюсом АН-20, ФЦ-10, а також під спеціально розробленим для сплавів із латуні флюсом МАТИ-53. Для зварювання латуні використовують зварювальні дроти Бр.КМц3-1, Бр.ОЦ4-3, а також ЛК80-3. Латуні, що мають товщину близько 20 мм, зварюють швом з двох сторін. За один прохід зварюють латуні товщина яких є меншою за 12 мм, табл. 8.1. При товщині металу 14 мм і більше виконують V – образне або X – образне розділення крайок заготовок для зварювання.

Таблиця 8.1 – Режим автоматичного зварювання латуні під флюсом АН-20
дротом Бр.ОЦ4-3

| Товщина заготовки, мм | Діаметр електроду, мм | Струм, А | Напруга дуги, В | Швидкість зварювання м/год | Примітка |
|-----------------------|-----------------------|----------|-----------------|----------------------------|-------------------------|
| 3 | 1,5 | 160-180 | 24-26 | 20 | Одностороннє зварювання |
| 8 | 1,5 | 360-380 | 26-28 | 20 | Одностороннє зварювання |
| 12 | 2,0 | 450-470 | 30-32 | 25 | Одностороннє зварювання |
| 18 | 3,0 | 650-700 | 32-34 | 30 | Підварочний шов |

Мідь і її сплави зварюють в азоті, а також в інертних газах, аргоні і гелії електродами, які плавляться. Також мідь і її сплави зварюють вольфрамовими електродами. В аргоні, з використанням вольфрамових електродів, зварюють заготовки, що мають товщину до 4-6 мм, а в гелії до 6-8 мм. Зварювання вольфрамовим електродом ведуть на постійному струмі прямої полярності.

Алюмінієві бронзи марок БрАМц9-2, БрАЖ9-4, БрАЖМц10-3-1,5 зварюють під флюсом АН-20, використовуючи дріт БрАМц9-2 діаметром 5 мм. Висота шару флюсу при зварюванні не повинна перевищувати 25-30 мм, що необхідно для кращого газовилучення.

Олов'яні бронзи рекомендується зварювати з відповідно збільшеною швидкістю, щоб не допустити перегріву основного металу.

8.3. Прилади, обладнання, наочні посібники

Для виконання лабораторної роботи використовують:

- джерело живлення УДГ-501-1;
- обладнання для ручного дугового зварювання;
- зварювальні маски, рукавиці, щипці і та ін.;

- зразки з міді і латуні, розмір 50×100×5-7 мм;
- штангенциркуль, металева лінійка;
- вимірювальні прилади (амперметр, вольтметр).

8.4. Техніка безпеки

Перед початком роботи всі студенти проходять інструктаж з техніки безпеки. Робота виконується в зварювальній лабораторії, яка відповідає вимогам навчального процесу та техніки безпеки.

Перед виконанням джерела живлення для зварювання міді і її сплавів перевіряється на наявність його заземлення.

Джерело живлення вмикає учбовий майстер. При зварюванні студенти використовують засоби захисту: щитки, спецодяг, рукавиці, окуляри для зварювання. Студенти, які не приймають участь у проведенні експериментів, не повинні знаходитись в зварювальній лабораторії.

8.5. Порядок виконання роботи

1. Перед проведенням лабораторної роботи кожен студент повинен вивчити матеріал стосовно зварювання міді та її сплавів [1-3]. Робота передбачає індивідуальне виконання її теоретичної та практичної частин і засвоєння матеріалу наведеного у відповідній літературі.

2. Група студентів ділиться на підгрупи, до складу яких входить 2 особи. Кожен студент отримує зразок із міді або латуні для зварювання.

3. Під керівництвом учбового майстра кожен студент набуває навички зварювання горизонтальних швів у нижньому положенні. Якість зварювання оцінюється учбовим майстром і викладачем.

8.6. Вказівки до оформлення звіту

1. В журналі для лабораторних робіт записують назву та мету даної роботи, вказують зварювальне обладнання, матеріали та інструменти задіяні при її виконанні.
2. Під заголовком «Теоретична частина» у стислому вигляді записується матеріал п.8.2.
3. Під заголовком «Практична частина» наводять стислий опис одержаних експериментальних даних. Приводять рисунок отриманого зварного з'єднання.
4. Ретельно оформлений звіт кожен студент пред'являє викладачеві для перевірки. За матеріалом роботи викладач проводить індивідуальну співбесіду зі студентом і оцінює рівень засвоєння матеріалу роботи.

8.7. Контрольні питання

1. Наведіть особливості зварювання міді і її сплавів.
2. Наведіть фізичні і механічні властивості міді і її сплавів
3. Чому для зварювання міді і її сплавів використовують флюси?
4. Наведіть технологію зварювання міді і її сплавів у інертних захисних газах.
5. Які особливості утворення дефектів при зварюванні міді і її сплавів.

Список літератури

1. Гуревич С. М. Довідник по зварюванню кольорових металів. / Гуревич С. М – Київ: – Наукова думка. – 1990. -510с.
2. Дяченко С. С. Матеріалознавство. / С. С. Дяченко, І. В. Дощечкіна, А. О. Мовлян, Е. І. Плішаков. – Харків: ХНАДУ. -2007. – 421с.
3. Биковський О. Г. Довідник зварювальника./ Биковський О. Г. –Київ.: «Основа», 2014. – 424с.

Зміст

| | |
|--|----|
| Лабораторна робота 1. Розрахунок зварювального струму та визначення площі поперечного перерізу металу шва при ручному дуговому зварюванні..... | 4 |
| Лабораторна робота 2. Визначення неметалевих включень у металі шва зварних з'єднань із конструкційних сталей..... | 15 |
| Лабораторна робота 3. Визначення технологічних особливостей ручного дугового зварювання електродом, що плавиться..... | 25 |
| Лабораторна робота 4. Дослідження мікроструктури та визначення мікротвердості зварних з'єднань із теплостійкої перлітної сталі 12Х1МФ..... | 33 |
| Лабораторна робота 5. Дослідження відманштетового фериту, як дефектної структури зварних з'єднань..... | 42 |
| Лабораторна робота 6. Дослідження мікроструктури зварних з'єднань із спеціальних сталей..... | 53 |
| Лабораторна робота 7. Вивчення технології зварювання алюмінію і його сплавів..... | 59 |
| Лабораторна робота 8. Вивчення технології зварювання міді та її сплавів.... | 64 |

Навчальне видання

КУРС

«ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МЕТОДИ У ЗВАРЮВАННІ»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

Укладачі: Дмитрик Віталій Володимирович
Погрібний Микола Андрійович
Касьяненко Ігор Вікторович

Кафедра «Зварювання»

Підп. До друку Формат 60x84 1/16

Усл. меч. Л2,1 тираж 50 екз. План 2024р., поз /

Видавничий центр НТУ «ХП»,

вул. Кирпичова,2, м, Харків, 61002

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 5478 від 21. 08. 2017 р.

Електронна версія