

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ
КАФЕДРА "ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ МАШИН"

ТЕОРІЯ ЗВАРЮВАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання практичних робіт
для студентів спеціальності
132 «Матеріалознавство»

ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ
КАФЕДРА "ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ МАШИН"

ТЕОРІЯ ЗВАРЮВАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання практичних робіт
для студентів спеціальності
132 «Матеріалознавство»

Затверджено на засіданні кафедри
"Експлуатація та ремонт машин"
Протокол № 12 від 15.05.2019 р.

Теорія зварювальних процесів. Методичні вказівки до виконання практичних занять з дисципліни /Укл.: к.т.н. доц. М.В. Красота, к.т.н., доц. І.Ф. Василенко, к.т.н., доц. І.В. Шепеленко.– Кропивницький: ЦНТУ, 2019.– 46 с.

Рецензент : к.т.н., доц. С.І. Маркович

©Теорія зварювальних процесів
Укладачі: М.В. Красота, І.Ф. Василенко, І.В. Шепеленко, 2019.

Зміст

	Стор.
<i>Практичне заняття №1</i> <i>Вивчення структури зварного шва.....</i>	5
<i>Практичне заняття №2</i> <i>Дефекти зварних з'єднань.....</i>	13
<i>Практичне заняття №3</i> <i>Визначення основних теплових характеристик електродугового зварювання.....</i>	21
<i>Практичне заняття №4</i> <i>Дослідження процесу нагрівання й розплавлення електрода.....</i>	25
<i>Практичне заняття №5</i> <i>Дослідження дугового розряду на змінному струмі.....</i>	30
<i>Практичне заняття №6</i> <i>Дослідження перенесення електродного металу при дуговому зварюванні.....</i>	32
<i>Лабораторна робота №7</i> <i>Легування зварних швів.....</i>	35
<i>Лабораторна робота №8</i> <i>Дослідження пористості зварних швів.....</i>	39

Практичне заняття № 1

Вивчення структури зварного шва

1.1 Мета роботи

Ознайомлення з фізичними основами зварювання, вивчення будови й мікроструктури зварного шва, сформованого при електродуговому зварюванні вуглецевих сталей.

1.2 Загальні відомості про зварювання

Зварюванням називається технологічний процес утворення нероз'ємних з'єднань за рахунок сил взаємодії атомів (молекул) контактуючих поверхонь деталей, що з'єднуються.

Міцні атомно-молекулярні зв'язки між деталями, що з'єднуються, виникають при їхньому зближенні на відстані, близькій до міжатомних. Подібне зближення атомів контактуючих поверхонь можливе при наданні їм додаткової енергії (енергії активації) шляхом нагрівання (термічна активація) або пружно-пластичної деформації (механічна активація). У першому випадку утворення міжатомних зв'язків відбувається в рідкій фазі, у другому - у твердому стані. Залежно від цього всі способи зварювання підрозділяють на два основних види: зварювання плавленням і зварювання тиском (пластичним деформуванням). Інші методи є їх різновидами або комбінацією.

При *зварюванні плавленням* формування з'єднання (зварного шва) здійснюється за рахунок місцевого сплавлення деталей, що з'єднуються, без додавання тиску. Розплавляються або кромки деталей, що зварюються, (основний метал), або додатковий присадочний чи електродний метал. Після кристалізації загальної зварювальної ванни утворюється зварювальний шов, що має литу структуру.

Розплавлення основного й присадного матеріалів може здійснюватися за рахунок енергії: дугового розряду (*електродугове зварювання*); теплової енергії, яка виділяється струмом, що проходить через шлакову ванну – флюс (електрошлакове зварювання); потоку швидких електронів (*електронно-променеве зварювання*); плазмового потоку (*плазмове зварювання*); потужного лазерного променя (*лазерне зварювання*); екзотермічних реакцій горіння газів (*газове зварювання*) або порошкової горючої суміші (*термітне зварювання*).

Зварювання плавленням є основним видом зварювання: на його частку на даний час доводиться близько 70% всіх зварювальних робіт.

При *зварюванні тиском* зближення атомів у контактуючих поверхнях відбувається в результаті пружно-пластичної деформації шарів, у процесі якої в поверхневих шарах виробів, що зварюються, вирівнюються мікронерівності, руйнуються окисні плівки, здійснюється взаємодія атомів з утворенням металевих зв'язків. Зварювання тиском може виконуватися без попереднього нагрівання виробів, що з'єднуються - механічне зварювання

(зварювання тертям, холодне зварювання, зварювання вибухом, ультразвукове зварювання) і з попереднім нагріванням до пластичного стану або до оплавлення - термомеханічне (*контактне, дифузійне, газопресове*).

1.3 Електродугове зварювання.

Умови формування зварного шва

Дугове зварювання займає домінуюче ($\geq 60\%$) положення у виробництві зварних з'єднань. Зварювальною дугою називається потужний електричний розряд між електродами, що перебувають в атмосфері іонізованих газів і пари. Дугове зварювання виконується неплавкими та плавкими металевими електродами. У першому випадку дуга збуджується між основним металом і вольфрамовим (рідше вугільним) електродом.

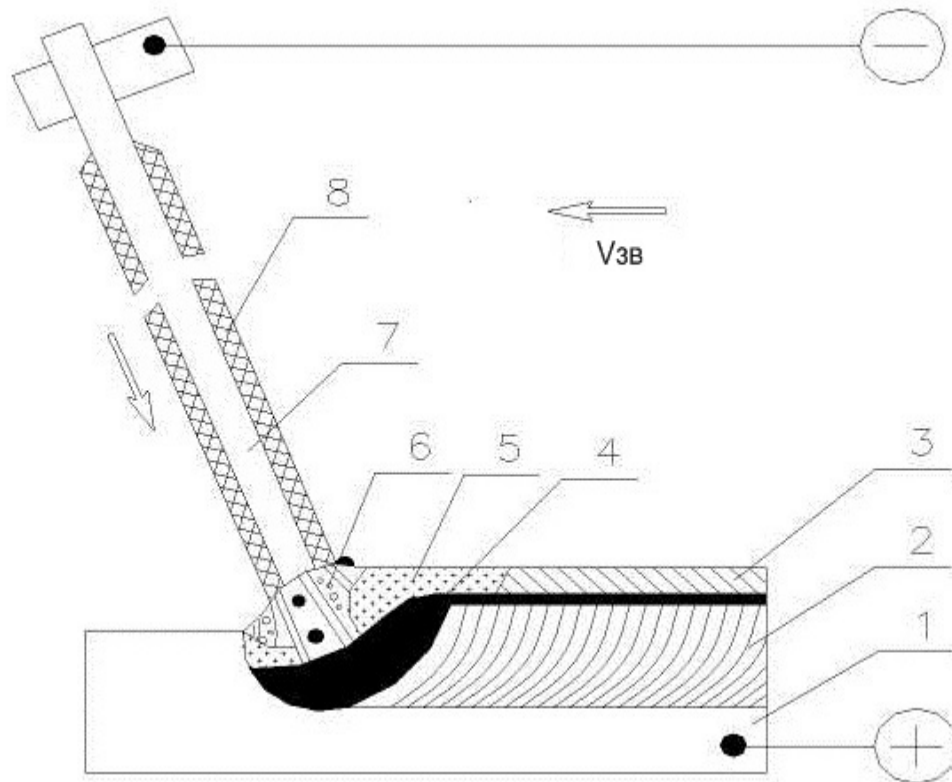
Для заповнення оброблених кромek звичайно застосовується присадний матеріал у вигляді металевого стрижня, що подається зварником у дугу. При ручному дуговому зварюванні металевим плавким електродом (рис. 1.1) дуга горить між основним металом і електродом, що служить присадним матеріалом. Як електрод застосовується стрижень із дроту, близький за хімічним складом до матеріалу, що зварюється.

Для зниження окислювання розплавленого металу на електроди наносять спеціальні покриття, що забезпечують утворення шлаків або газу, які захищають зону зварювання від впливу повітря; легування металу шва корисними компонентами; поліпшення стабільності горіння дуги шляхом використання елементів з низьким потенціалом іонізації (наприклад, калію); розкислення наплавленого металу шляхом додавання в покриття таких елементів, як Mn, Si, Al, Ti. Процес зварювання металевим електродом відкритою дугою після виникнення дугового розряду схематично показаний на рис. 1.1.

Спочатку виконують коротке замикання електрода 7 на виріб 1, у результаті чого в місці контакту відбувається сильне нагрівання кінця електрода й дотичної з ним ділянки виробу. Відведення електрода від виробу обриває шийку контакту й викликає емісію електронів з його торця. Взаємодія електронів з молекулами газів приводить до іонізації останніх, газ стає електропровідним, що приводить до запалювання дугового розряду.

Для надійного запалювання дуги електрод варто відводити від виробу на 3-5 мм.

В області стовпа електричної дуги температура сягає $\sim 6000^{\circ}\text{C}$. Електрод і кромки металу починають плавитися, утворюючи зварювальну ванну 4. Разом зі стрижнем плавиться й обмазка електрода 8, створюючи газову захисну атмосферу 6 навколо дуги й рідку ванну 5 на поверхні розплавленого металу. Віддалення зварювальної дуги приводить до охолодження й кристалізації металу зварювальної ванни 4; розплавлене покриття спливає на поверхню й, застигаючи, утворює на поверхні шва шлакову тверду кірку 3.



1 - виріб, 2 - зварний шов, 3 - шлакова кірка, 4 - зварювальна ванна, 5 - рідкі шлаки, 6 - захисна атмосфера, 7 - електрод, 8 - обмазка електрода.

Рисунок 1.1 – Схема зварювання металевим електродом відкритою дугою

1.4 Структура зварних з'єднань

1.4.1 Кристалізація металу шва

При зварюванні плавленням кромки елементів, що з'єднуються, і додатковий метал переходять у рідкий стан. Якщо ж додатковий метал відсутній, то плавиться тільки основний метал.

Плавлення відбувається в зоні зварювання – плавильному просторі. Розплавлені основний і додатковий метали, зливаючись, утворюють спільну зварювальну ванну, що перебуває в стані безперервного руху й перемішування. Границями ванни служать оплавлені ділянки основного металу й шва, що утворився раніше. У процесі зварювання джерело теплоти переміщується уздовж кромки, що з'єднуються, а разом з ним рухаються плавильний простір і зварювальна ванна. При дуговому зварюванні плавильний простір можна умовно розділити на дві області: головну, де горить дуга й відбувається плавлення основного й додаткового металів, і хвостову, де розташовується зварювальна ванна й починається її кристалізація (рис. 1.1).

Як і при звичайному затвердінні виливків, перехід металу зварювальної ванни з рідкого у твердий стан називають первинною кристалізацією.

Як і у випадку кристалізації зливки, характерним структурним елементом зварювальних швів є дендрити - деревоподібні кристали зі

стовбурами й гілками. Ріст кристалів найбільше активно йде в напрямку, перпендикулярному поверхні тепловідведення. Тому процес первинної кристалізації звичайно закінчується формуванням стовпчастих кристалів.

Структуру шва, сформовану в результаті первинної кристалізації, називають первинною. При затвердінні металу в ньому розвиваються дифузійні процеси, що намагаються вирівняти хімічний склад різних ділянок кристалітів, що утворилися. Однак через значні швидкості охолодження металу й повільного протікання процесів дифузії у твердих розчинах не відбувається повного вирівнювання хімічного складу в металі шва. Це й визначає наявність у мікроструктурі шва хімічних неоднорідностей по окремих зонах литого металу (зональна ліквіація), що має істотний вплив на його властивості.

Первинна кристалізація зварювальної ванни починається від частково оплавлених зерен основного металу або стовпчастих кристалітів (при багатопрхідному зварюванні), що є готовими центрами кристалізації. Умовну поверхню розділу між зернами основного металу й кристалітами шва називають *границею шва або границею сплавлення* (рис. 1.2). Як відзначалося вище, мікроструктура металу шва при зварюванні плавленням має стовпчасту будову. Стовпчасті кристали мають порівняно великі розміри (0,3-3 мм) і легко помітні за допомогою металографії. При одношаровому зварюванні й порівняно малому часі існування зварювальної ванни (малий обсяг ванни, підвищене швидкість зварювання) стовпчасті кристали можуть прорости до зустрічі в області центральної лінії шва, не змінюючи свого напрямку.

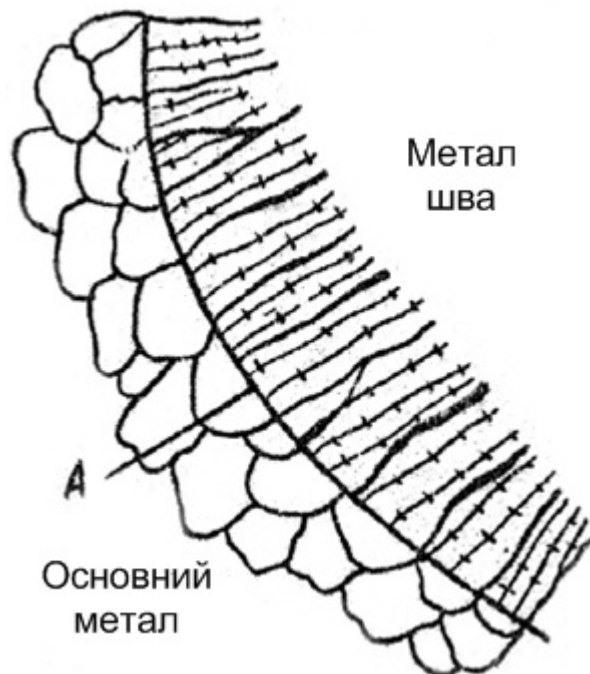


Рисунок 1.2 – Границя сплавлення А

При великій ванні й повільній її кристалізації в центральній частині шва утворюється невелика зона рівноважних кристалів, що виникли в умовах природної кристалізації.

При багатопрохідному (багатошаровому) зварюванню ріст кристалітів наступного шару починається, як відзначалося вище, від частково оплавлених кристалітів попереднього шару. Напрямки кристалітів окремих шарів, як правило, не збігаються. При багатошаровому зварюванні швидкість охолодження кожного із шарів звичайно більша швидкості охолодження ванни при одношаровому зварюванні металу такої ж товщини. Тому кристалічна будова окремих шарів у цілому виявляється більш дрібною і щільною із менш вираженою ліквіацією домішок по зонах.

Для металів і сплавів, що піддаються при охолодженні поліморфним перетворенням, первинна структура зберігається до температури поліморфного перетворення. Для сплавів на основі заліза поліморфне перетворення проявляється в переході $\alpha - Fe \rightarrow \gamma - Fe$. Перехід металу шва у твердому стані з одного поліморфного стану в інший називають *вторинною кристалізацією*.

При вторинній кристалізації зародки нових зерен утворюються на границях старих. Число цих зародків і швидкість їхнього росту залежить від швидкості нагрівання й охолодження, ступеня перегріву й переохолодження. Це дозволяє впливати на розміри зерен металу у зварному з'єднанні. Якщо метал після зварювання піддати вторинній кристалізації, то порушується несприятлива дендритна будова й виникає нова, більш дрібнозерниста структура.

1.4.2 Будова зони термічного впливу

Теплота, що виділяється зварювальним джерелом нагрівання, поширюється на прилягаючі до шва ділянки основного металу. При нагріванні й наступному охолодженні в цих ділянках змінюється структура й властивості металу. Дільниця основного металу, що піддається в процесі зварювання нагріванню до температур, при яких відбуваються структурні зміни, називають *зоною термічного впливу*. Поряд з тепловим впливом основний метал пришовної зони, як правило, піддається також пластичній деформації під дією термічних напружень, викликаних нерівномірним нагріванням. Температура нагрівання різних ділянок зони термічного впливу перебуває в межах від температури плавлення (поблизу шва) до початкової температури основного металу. Будова й розміри зони термічного впливу залежать від хімічного складу й теплофізичних характеристик металу, що зварюється, а також від температурного режиму (термічного циклу) зварювання.

Розглянемо будову зони теплового впливу на прикладі маловуглецевої сталі (рис. 1.3). Відповідно до діаграми стану Fe-Fe₃C (рис. 1.3, праворуч), зона термічного впливу складається із шести характерних ділянок.

Перша ділянка (*ділянка неповного розплавлення*) безпосередньо примикає до металу шва (*наплавленого металу*). Ця ділянка формується із двофазного (рідина - тверде тіло) стану, і, подібно наплавленому металу, має дендритну будову. Саме тут і відбувається зварювання. Ділянка має невелику

ширину й за хімічним складом і структурою відрізняється від сусідньої ділянки 2 основного металу.

Сукупність першої ділянки пришовної зони й приграничної ділянки металу шва називають **зоною сплавлення або перехідною зоною**. Властивості цієї зони в ряді випадків впливають на працездатність зварних конструкцій, тому що при динамічних навантаженнях тут найчастіше утворюються тріщини.

Друга ділянка пришовної зони, що одержала назву **ділянки перегрівання** 2 (ділянка крупного зерна), включає метал, нагрітий від температури $\sim 1200^{\circ}\text{C}$ до температури плавлення. Метал на цій ділянці піддається поліморфному перетворенню $\alpha - \text{Fe} \rightarrow \gamma - \text{Fe}$.

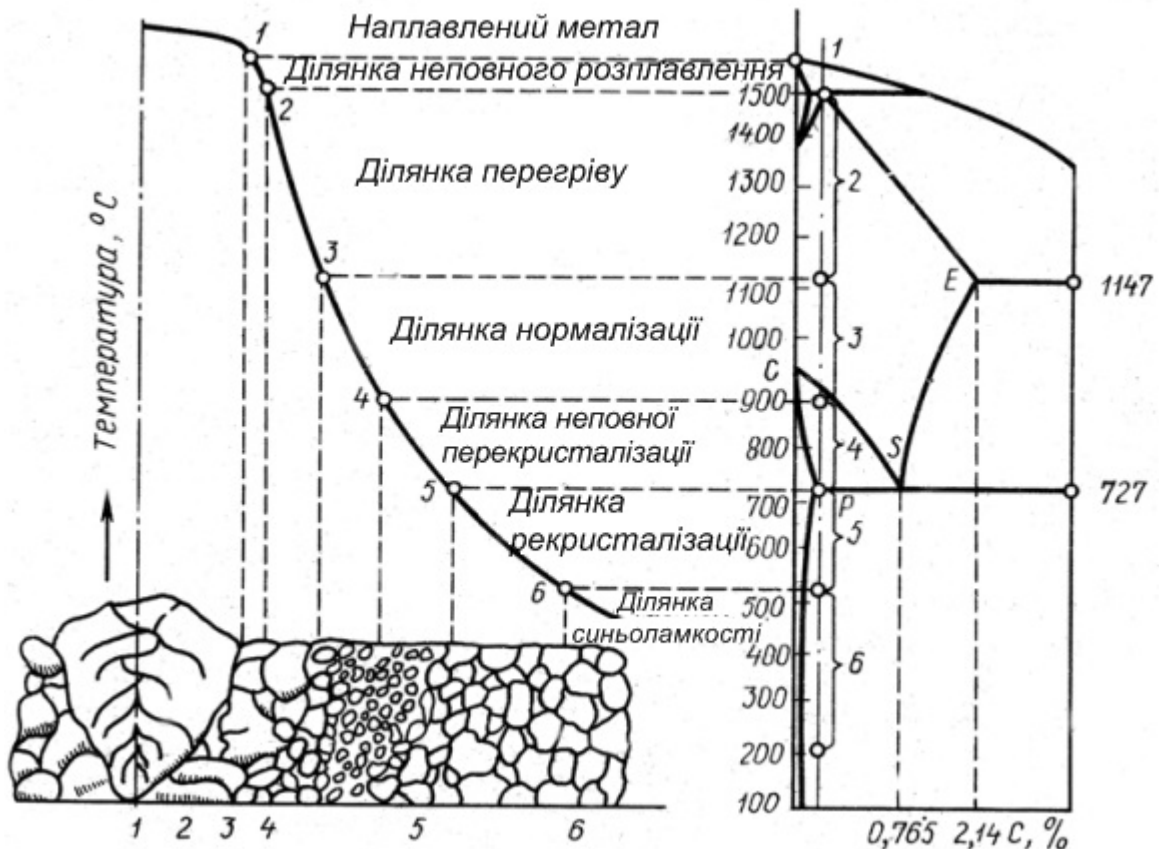


Рисунок 1.3 – Зміна мікроструктури металу в зоні термічного впливу при зварюванні низьковуглецевої сталі

При значному перегріванні відносно точки A_{c3} відбувається ріст аустенітного зерна. Звичайно метал на другій ділянці пришовної зони має гірші властивості, чим основний метал. Завдання вибору раціональної технології зварювання зводиться в першу чергу до забезпечення найменшого погіршення властивостей металу на цій ділянці.

Третя ділянка пришовної зони одержала назву **ділянки перекристалізації (нормалізації)**. Вона включає метал, що набув в процесі нагрівання вище A_{c3} повністю аустенітну структуру, а при помірному охолодженні дрібнокристалічну будову. Ця ділянка має високі механічні властивості.

Четверта ділянка пришовної зони, що одержала назву *ділянки неповної перекристалізації*, включає метал, нагрітий до температури, при якій починається перетворення $\alpha - Fe \rightarrow \gamma - Fe$ (727°C), до температури $\sim 880^{\circ}\text{C}$ (між точками A_{c1} і A_{c3}). Метал на цій ділянці піддається тільки частковій перекристалізації.

Тому тут поряд із зернами основного металу, що не змінилися в процесі зварювання (феррит), присутні зерна, що утворилися при перекристалізації (перліт).

На п'ятій ділянці основної зони, іменованій *ділянкою рекристалізації*, метал нагрівається до 727°C . Тут відбувається перекристалізація роздроблених при пластичному деформуванні зерен основного металу й деяке розміщення його в порівнянні з вихідним станом. Структура цієї зони мало відрізняється від структури основного металу.

Крім того, у зону термічного впливу входить *ділянка синьоломкості б*. При температурі $200\text{--}500^{\circ}\text{C}$ відбувається процес старіння – закріплення атомами занурення дислокацій, що викликають зменшення їхньої рухливості й підвищення крихкості.

У випадку багатопрохідних швів пришовна зона розташовується не тільки в основному металі, але й у металі шва. При цьому її будова в межах шва значно відрізняється від будови в основному металі. Як правило, у межах перших трьох ділянок спостерігається утворення дрібнозернистих структур, що мають підвищену пластичність. При цьому зона крупного зерна відсутня.

1.5. Устаткування, прилади, матеріали

1. Набір зразків зварних з'єднань, виготовлених з вуглецевих сталей (сталь 20, сталь 45).
2. Шліфувально-полірувальний верстат.
3. Набір шліфувальних паперів.
4. Набір полірувальних паст і емульсій.
5. Реактив для травлення вуглецевих сталей (2-5% розчин HNO_3 в етиловому спирті).
6. Металографічний мікроскоп МІМ-7.
7. Твердомір ТК-2.
8. Мікроскоп ПМБ-2.

1.6. Порядок виконання роботи

1. Виготовити поперечні мікрошліфи зварних з'єднань.
2. Здійснити травлення мікрошліфів.
3. Вивчити макроструктуру зварного шва й замалювати її загальну будову.
4. Вивчити мікроструктуру литого металу й зони термічного впливу, виявити й замалювати її характерні ділянки, визначити розміри цих ділянок.

5. Виміряти твердість у литому металі й різних ділянках зони термічного впливу й побудувати залежність твердості від відстані до осі симетрії зварного шва.

1.7 Зміст звіту

Звіт повинен включати:

- 1) мету роботи;
- 2) коротку класифікацію видів і методів зварювання;
- 3) схему зварювання металевим електродом відкритої дуги (рис. 1.1) і опис процесу зварювання;
- 4) опис кристалічної будови металу шва (рис. 1.2);
- 5) аналіз будови зони термічного впливу на основі діаграми стану Fe – Fe₃C (рис. 1.3);
- 6) зображення (рисунок) структури литого металу й різних ділянок зони термічного впливу, виявлених при травленні шліфа, з зазначенням їхніх назв, структурних тридцятимільйонних і характерних розмірів;
- 7) залежність твердості зварного з'єднання від відстані до осі симетрії шва;
- 8) аналіз даної залежності на основі будови й умов формування зони термічного впливу.

1.8 Контрольні питання

1. Привести класифікацію видів і способів зварювання.
2. Описати процес зварювання металевим електродом відкритої дуги.
3. Описати умови кристалізації зварювальної ванни й кристалічної будови металу шва.
4. Користуючись діаграмою стану Fe – Fe₃C (рис. 1.3) пояснити будову зони термічного впливу у зварному з'єднанні.
5. Пояснити вплив умов формування зони термічного впливу на твердість різних ділянок цієї зони.

1.9 Література

1. Алаи С.И., Григорьев П.М., Ростовцев А.Н. Технология конструкционных материалов. Под ред. Ростовцева А.Н. М.: Просвещение. 1986, 304 с.
2. Технология металлов и материаловедение. Кнорозов Б.В., Усова Л.Ф., Третьяков А.В. и др. Под ред. Усовой Л.Ф. М.: Металлургия. 1987, 800 с.
3. Материаловедение и технология металлов. Учебн. для студентов машиностроительных спец. вузов. Г.П. Фетисов, М.Г. Карпман, В.М. Матюнин и др. Под ред. Г.П. Фетисова. М.: Высш. шк., 2000, 638 с.
4. Материаловедение. Учебник для вузов. Арзамасов Б.Н., Макарова В.И., Мухин Г.Г. и др. Под общей ред. Арзамасова Б.Н. 3-е изд., стереотип., М.: Изд-во МГПУ им. Н.Э. Баумана, 2002, 648 с.

Практичне заняття № 2

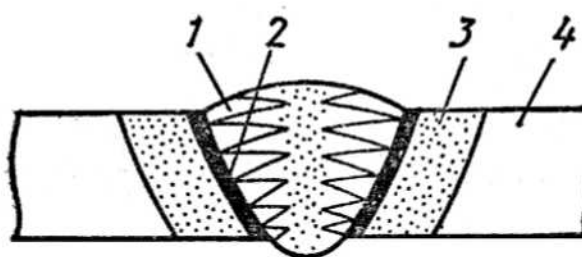
Дефекти зварних з'єднань

2.1 Мета роботи

Вивчення макробудови, хімічних і структурних неоднорідностей зварних з'єднань методами макроаналізу.

2.2 Загальна характеристика й види зварних з'єднань

Зварним з'єднанням називається нероз'ємне з'єднання, виконане зварюванням. При зварюванні плавленням у зварному з'єднанні (рис. 2.1) формуються різні ділянки, нагріті до різних температур, які відрізняються з цієї причини фізичними, хімічними й механічними властивостями.



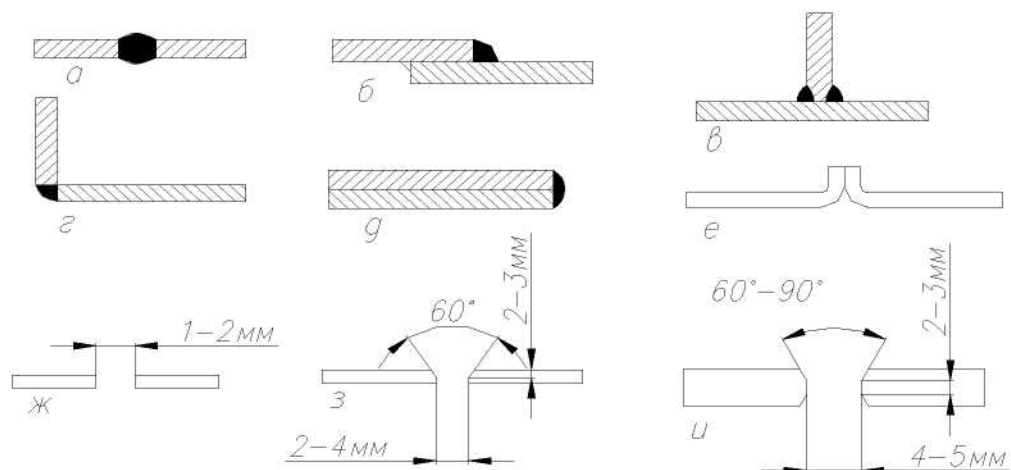
1 - зварний шов; 2 - зона сплавлення; 3- зона термічного впливу; 4- основний метал

Рисунок 2.1 – Зварне з'єднання:.

Метал, що розплавився й кристалізувався утворює *зварний шов 1* з литою структурою; метал, що частково оплавився утворює *зону сплавлення 2*. Ділянки металу, що примикають до неї, нагріті до температури вище $\sim 1000^{\circ}\text{C}$, у яких протікають структурні перетворення й виникають залишкові напруження, утворюють *зону термічного впливу 3*. Далі знаходиться *основний метал 4*, структура й властивості якого в процесі зварювання не змінюються.

Взаємне розташування елементів, що з'єднуються, визначає тип зварного з'єднання. При ручному дуговому зварюванні найчастіше застосовують такі зварні з'єднання (рис. 2.2): *встик (а)*, *внапуск (б)*, *таврові (в)*, *кутові (г)* і *бічні (д)*.

З'єднання *встик* є переважним серед інших у силу своєї економічності й кращої працездатності. При стиковому з'єднанні зварюються кромки, що попередньо обробляються. При зварюванні тонких виробів кромки загинають для посилення шва (рис. 2.2, е, г). При товщині металу до 8 мм зварювання виконують без обробки кромки при зазорі до 2 мм (рис 2.2, ж) Метал товщиною 8-15 мм зварюють із однією V-подібною обробкою кромки (рис 2.2, з); товщиною 15-20 мм із двома X-подібною обробкою кромки (рис. 2.2, і); більше 20 мм - з U-подібною однією або двома обробкою кромки.



а - встик; б- внапуск; в - таврові; г - кутові; д - бічні; е, ж, з, і - підготовка кромки шва (е-і)
 Рисунок 2.2 – Типи зварних з'єднань (а-д) і підготовка кромки шва (е-і)

На процес зварювання і якість зварного шва сильно впливають забруднення поверхні металів оксидами, жирними плівками та ін. Тому перед зварюванням виконують підготовку поверхонь, що зварюються. Крім усунення забруднень поверхні металу вживаються заходи для зменшення забруднень у процесі зварювання, у першу чергу окислами. Для цієї мети використовують *флюси, шлаки, вакуум, захисні гази*.

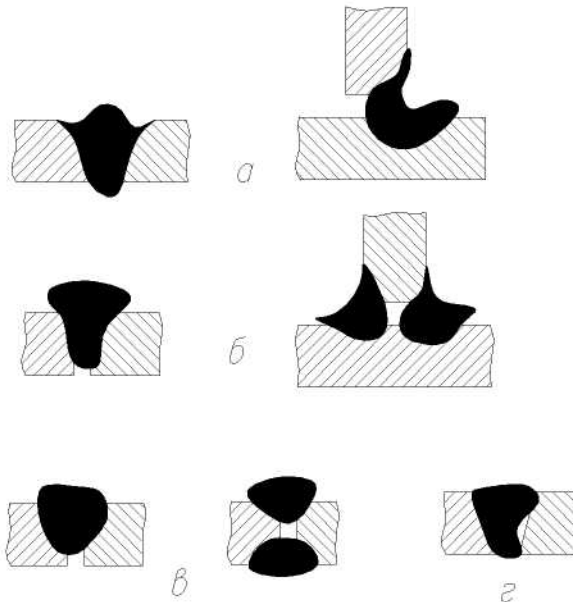
Зварне з'єднання повинне бути таким же міцним, як і основний метал, і не поступати йому при всіх видах навантажень (статичних, ударних, циклічних). *Рівномірність* зварного з'єднання визначається відсутністю внутрішніх і зовнішніх дефектів, а так само структурою й властивостями металу шва й зони термічного впливу.

2.3 Дефекти зварних з'єднань

У процесі зварювання в металі шва й у зоні термічного впливу можуть виникати різні дефекти, які знижують міцність з'єднання, приводять до негерметичності швів і зниженню експлуатаційної надійності виробу.

По розташуванню у зварному з'єднанні дефекти поділяються на *зовнішні й внутрішні*. До зовнішніх відносяться *підрізи, напливи, зовнішні тріщини й газові пори*. Ці дефекти, як правило, можуть бути виявлені при зовнішньому огляді.

Підріз являє собою поглиблення (канавку) на основному металі уздовж лінії сплавлення зварного шва з основним металом (рис.2. 3, а). Звичайне утворення підрізу пов'язане з формуванням великої зварювальної ванни за рахунок великого зварювального струму.



а - підріз; б - наплив; в - непровар по товщині; г - непровар по кромці шва.

Рисунок 2.3 – Дефекти при зварюванні плавленням

Наплив - це натікання металу шва на поверхню основного металу або раніше виконаного валика без сплавлення з ним (рис. 2.3, б).

Непровар - місцеве несплавлення внаслідок неповного розплавлювання кромek деталей, що зварюються, (рис. 2.3, в, г). Місце непровару в більшості випадків заповнене шлаком, що завдяки легкоплавкості й рідкоплинності, заповнює порожнини, що утворюються при непроварі.

При дуговому зварюванні утворення непровару пов'язане з недостатнім зварювальним струмом.

Непровар є одним з найнебезпечніших дефектів. Це пов'язане з тим, що при навантаженні непровар є концентратором напружень. Напруження, що виникають у цьому місці, можуть у кілька разів перевищувати середні напруження у виробі. Це приводить до руйнування виробу при навантаженнях, значно менших, ніж розрахункові.

Крім того, непровар часто супроводжується появою тріщин, що важко виявляються, у металі шва. Непровари обов'язково усувають *підварюванням* дефектних ділянок.

Тріщини - часткове місцеве руйнування (розрив) у зварному шві й/або в пришовній зоні. При зварюванні тріщини можуть утворюватися в процесі кристалізації (*гарячі тріщини*) і в процесі фазових і структурних перетворень у твердому стані (*холодні й інші види тріщин*).

Механізм утворення *гарячих тріщин* полягає в наступному. Розплавлений метал шва після видалення джерела нагрівання починає охолоджуватися. При температурі нижче ліквідусу в розплаві починають з'являтися кристали.

По мірі подальшого охолодження об'єм, що займається кристалітами, збільшується, а самі кристаліти поєднуються в каркас, розділений рідкими прошарками. У такому стані циркуляція рідини між кристалітами ускладнена. Це приводить до зниження деформаційної здатності системи й

небезпеки її ламкого руйнування за рахунок усадочних кристалізаційних напружень. Руйнуванню сприяє утворення на границях кристалітів виділень (сегрегацій) легкоплавких фаз (сульфідів, фосфідів, оксидів), що послабляють зв'язки між зростаючими зернами. Схильність до утворення гарячих тріщин тим вища, чим ширший температурний інтервал кристалізації й чим нижча металургійна якість сталі. Вуглець розширює інтервал кристалізації й підсилює схильність сталі до утворення гарячих тріщин.

Холодні тріщини утворюються при охолодженні зварного шва нижче 200-300°C переважно в зоні термічного впливу. Процес їхнього утворення має, як правило, уповільнений характер, що робить їх особливо небезпечними. Причиною утворення холодних тріщин є внутрішні напруження, що виникають при структурних перетвореннях (особливо мартенситному) у результаті місцевого загартування сталі. У низьковуглецевих сталях, де об'ємний ефект мартенситного перетворення малий, холодні тріщини зустрічаються рідко. З ростом вмісту вуглецю фазові напруження збільшуються, що сприяє появі холодних тріщин.

У вуглецевих сталях холодні тріщини є найпоширенішим дефектом. Для оцінки схильності легованих сталей до утворення холодних тріщин використовують значення вуглецевого еквівалента

$$C_{\text{екв}} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14} + \frac{Cu}{13} + \frac{P}{2},$$

де символи легуючих елементів позначають їх масові частки в даній марці сталі, а числа - їхні коефіцієнти активності.

Схильність до утворення гарячих і холодних тріщин визначає *зварюваність металу* - здатність одержання зварного з'єднання, рівномірного з основним металом. Вуглець і всі основні легуючі елементи негативно впливають на зварюваність.

Низьку схильність до утворення холодних тріщин (високу зварюваність) мають сталі, у яких $C_{\text{екв}} \leq 0,45\%$, тобто що мають до $\sim 0,25\%$ C. У цю групу входять вуглецеві сталі Ст1 - Ст4, 05, 08, 10, 15, 20, 25, а так само низьколеговані сталі 09Г2(Д), 14Г2, 17ГС і ін., що застосовуються для виготовлення різних металоконструкцій.

Пори - округлі або витягнуті порожнини, заповнені газом. Вони можуть бути мікроскопічними й великими (до 4-6 мм). Пори утворюються у швах або на границі сплавлення з основним металом. Схильність до утворення пор залежить від концентрації газу у зварювальній ванні, розчинності його у твердому або рідкому металі при температурі кристалізації, швидкості кристалізації металу, коефіцієнта дифузії газу в рідкому й твердому металах.

Газовиділення пов'язане з хімічними реакціями в розплавленому металі, наприклад: $FeO + C \leftrightarrow Fe + CO^{\uparrow}$. Через нерозчинність у залізі CO у процесі реакції виділяється у вигляді пузирчиків. Зниження розчинності газів у міру охолодження зварювальної ванни також є причиною утворення пористості.

При зварюванні будівельних сталей основна причина утворення пор - погане розкислення зварювальної ванни.

Неметалеві включення - це дефекти у вигляді сторонніх частинок у металі шва. Розрізняють *шлакові, флюсові, окисні* й інші неметалеві включення.

Шлакові включення утворюються в результаті поганого очищення кромки деталей, що зварюються, а також через недостатньо повне видалення шлаків при багатошаровому зварюванні.

При зварюванні плавленням основний метал і електрод плавляться, утворюючи рідку ванну. У результаті рідкофазного перемішування компонентів і наступної кристалізації формується лита структура шва, хімічний склад якої відрізняється від складу основного металу. Розглянемо можливі види хімічної неоднорідності металу шва (*ліквації*). Як і при кристалізації зливка в ливарній формі, можна виділити три види ліквациї: *зональну, дендритну і гравітаційну* (по щільності). *Зональна ліквация* може спостерігатися в об'ємі шва. По мірі кристалізації шва у напрямку від границі сплавлення до центра метал буде збагачуватися різними домішками, тому хімічний склад литої структури по перерізу буде неоднаковий. Наприклад, при зварюванні сталі в центральній частині шва може збільшуватися концентрація вуглецю й шкідливих домішок - сірки й фосфору. Крім зональної ліквациї в структурі шва може спостерігатися *дендритна ліквация* - неоднорідність хімічного складу по перерізу зерна (дендрита). Центр зерна буде збагачений більш тугоплавкими елементами, а міждендритний простір, що твердне в останню чергу, буде містити найбільшу кількість легкоплавких домішок.

При зварюванні металів плавленням, що сильно відрізняються по густині, можлива *гравітаційна ліквация*. Верхня частина шва буде збагачена більш легкими компонентами, а нижня більше важкими.

2.4 Вивчення дефектів зварних з'єднань методами макроскопічного аналізу (макроаналізу)

2.4.1 Загальна характеристика макроаналізу

Макроаналіз полягає у визначенні макроструктури металів і сплавів неозброєним оком або за допомогою лупи при невеликому (20-30 разів) збільшенні. На відміну від *мікроаналізу* макроаналіз не дозволяє досліджувати мікроструктуру металу. *Макроаналіз* використовується для контролю якості металевих деталей, виготовлених методами відливання, обробки тиском, зварювання, різання, термообробки. Макроаналіз дозволяє визначити *вид зламу (в'язкий, ламкий і ін.)*; порушення суцільності металу (*усадовчу рихлість, газові пухирчики, тріщини й ін.*); *дендритну й волокнисту будову*; *хімічні неоднорідності* литого металу (*ліквацию сірки, фосфору й інших елементів*).

Для проведення макроаналізу з досліджуваної частини деталі виготовляють зразок, що піддають шліфуванню й травленню спеціальними реактивами. Такий зразок називають *макрошліфом*. На шліфованій поверхні не повинно бути забруднень, слідів масла тощо.

Для макротравлення використовують більш сильні реактиви в порівнянні з мікротравленням. Результати макроаналізу можна зафіксувати, зробивши фотознімок макроструктури при збільшенні від 0,5 до 20 разів.

2.4.2 Макроаналіз зварних з'єднань

Макроаналіз дозволяє визначити форму, розміри й дендритну будову зварного шва, наявність у шві й основному металі різних дефектів: непроварів, тріщин, шлакових включень, газових пор, лікваций вуглецю й шкідливих домішок (P і S), усадочних рихлень.

Для виявлення макробудови зварних з'єднань із низько- і середньовуглецевих сталей частіше всього використовують методи поверхневого травлення (*реактив Гейна й метод Баумана*).

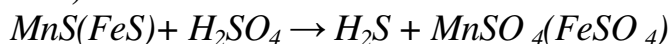
Реактив Гейна має такий склад: 85 гр. хлорної міді CuCl_2 , 53 гр. хлориду амонію NH_4Cl на 1000 мл води. Макрошліф протирають спиртом і занурюють шліфованою поверхнею на 30-60 секунд у реактив; при цьому відбувається обмінна реакція, за якою залізо витісняє мідь із водяного розчину. Мідь осідає на поверхні шліфа. На ділянках, у яких обмінна реакція не розвивається повністю, і тому недостатньо захищених міддю (пори, тріщини, непровари, неметалеві включення), відбувається травлення. Після травлення макрошліф виймають із розчину, знімають ватою під струменем води шар міді й просушують, обдуваючи грушею, щоб захистити шліф від швидкого окислювання на повітрі.

Даний метод виявляє пори в місці стику в наплавленому металі, а також ділянки, збагачені вуглецем, сіркою й фосфором. Ділянки сталі з різним змістом цих елементів травляться неоднаково. У ділянках, збагачених вуглецем і фосфором, мідь виділяється менш інтенсивно й менше захищає поверхню металу від дії хлористих солей реактиву, що травлять. У результаті ці ділянки фарбуються в більш темний колір. Кращі результати дає макроаналіз сталі, що містить до 0,6% С. У сталі з більшим вмістом вуглецю осад міді погано змивається з макрошліфа.

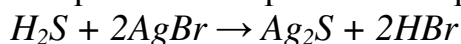
Реактив Гейна виявляє одночасно й ліквацию сірки, оскільки характер розподілу сірки, фосфору й вуглецю в сталі практично однаковий.

Для визначення ліквации сірки у зварному шві використовують *метод фотовідбитків (метод Баумана)*. Бромсрібний фотопапір на світлі змочують або витримують 5-10 хвилин в 5% водяному розчині сірчаної кислоти й злегка просушують між аркушами фільтрувального паперу для видалення зайвого розчину. Після цього на приготовлений макрошліф укладають фотопапір і обережно, не допускаючи його зсування, пропрасовують гумовим валиком або рукою (у гумовій рукавичці) для видалення між папером і макрошліфом пухирчиків повітря (пухирчики залишають білі плями й маскують результати аналізу). Фотопапір витримують на макрошліфі 3-15 хв.

Сірчані включення (FeS , MnS), наявні в наплавленому металі на його поверхні, реагують із сірчаною кислотою, що залишилася на фотопапері (що пропитала її):



Сірководень, що утворюється безпосередньо в зонах свого виділення впливає на кристалики бромистого срібла фотоемulsії:



Темні ділянки сірчистого срібла, що утворюються на фотопапері, показують форму й характер розподілу сульфідів у зварному шві й зоні термічного впливу. Знятий з макрошліфа фотопапір промивають під струменем води, фіксують 20-30 хвилин у розчині гіпосульфїта, потім промивають 10 хвилин у воді й просушують. Якщо у зварному шві міститься підвищена кількість фосфору, то в ділянках із значною його ліквациєю фосфор бере участь у реакції із бромистим сріблом і утворює фосфїди срібла темного кольору.

2.5 Устаткування, матеріали й інструменти

1. Макрошліфи зварного шва, приготовлені для мікроаналїзу.
2. Реактиви для поверхневого травлення: реактив Гейна (85 г $CuCl_2$ + 53 г NH_4Cl на 1000 мл води); 5% розчин H_2SO_4 ; тіосульфат натрію (безводний гіпосульфїт), спирт.
3. Фотопапір бромсрібний.
4. Лупи зі збільшенням $\times 4$; $\times 5$; $\times 10$. Мікроскоп бінокулярний зі збільшенням від $\times 0,4$ до $\times 80$ з окулярами.
5. Фотоапарат; проявник і закрїплювач для фотозйомки.
6. Атлас макроструктур зварних швів.

2.6 Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися із загальною характеристикою, видами й дефектами зварних з'єднань, а також з методами їх вивчення за допомогою макроаналїзу.
2. Приготувати макрошліфи зварних з'єднань.
3. Приготувати реактив для поверхневого травлення (реактив Гейна).
4. Використовуючи реактив Гейна, лупу або мікроскоп вивчити макроструктуру зварного з'єднання:

- виявити й замалювати макробудову зварного з'єднання із зазначенням зразкових розмірів і структури зони литого металла (дендрити) і зони термічного впливу;
 - указати на отриманому зображенні характерні дефекти (пори, непровари, тріщини й ін.) і визначити площу, що займається дефектами;
 - виявити й замалювати ліквацию фосфору у зварному з'єднанні.
5. Використовуючи метод Баумана (метод фотовідбитків), виявити й замалювати ліквацию сірки у зварному з'єднанні.

УВАГА! При приготуванні 5% водяного розчину H_2SO_4 необхідно дотримувати правил безпеки: не можна вливати воду в сірчану кислоту, а потрібно обов'язково підливати потроху кислоту у воду, перемішуючи при

цьому рідину, обережно працювати з розчином сірчаної кислоти щоб уникнути опіків і ушкодження одягу; працювати тільки в закритих окулярах.

6. Проаналізувати результати вивчення макроструктури й зробити висновки щодо якості зварного з'єднання.

2.7 Складання звіту

Звіт повинен містити:

1. Мету роботи й опис основних видів дефектів зварних з'єднань при зварюванні плавленням
2. Методи приготування макрошліфів і виявлення макроструктури зварних з'єднань
3. Зображення макроструктури зварних з'єднань з указанням типів дефектів
4. Аналіз отриманих результатів і висновки відносно якості зварних з'єднань.

2.8 Контрольні питання

1. Загальна характеристика зварних з'єднань
2. Основні види дефектів зварних з'єднань і причини їхнього виникнення
3. Методи вивчення макробудови й дефектів зварних з'єднань за допомогою макроаналізу
4. Поняття ліквації, види ліквації, методи визначення ліквації фосфору й сірки у зварних з'єднаннях.

2.9 Література

1. Алаи С.И., Григорьев П.М., Ростовцев А.Н. Технология конструкционных материалов. Под ред. Ростовцева А.Н. М.: Просвещение. 1986, 304 с.
2. Технология металлов и материаловедение. Кнорозов Б.В., Усова Л.Ф., Третьяков А.В. и др. Под ред. Усовой Л.Ф. М.: Металлургия. 1987, 800 с.
3. Материаловедение и технология металлов. Учебн. для студентов машиностроительных спец. вузов. Г.П. Фетисов, М.Г. Карпман, В.М. Матюнин и др. Под ред. Г.П. Фетисова. М.: Высш. шк., 2000, 638 с.
4. Материаловедение. Учебник для вузов. Арзамасов Б.Н., Макарова В.И., Мухин Г.Г. и др. Под общей ред. Арзамасова Б.Н. 3-е изд., стереотип., М.: Изд-во МГПУ им. Н.Э. Баумана, 2002, 648 с.
5. Геллер Ю.А., Рахштадт А.Г. Материаловедение. М.: «Металлургия», 1983, 384 с.
6. Атлас макро- и микроструктур сварных соединений. Малевский Ю.Б. и др. Москва-Киев, 1961, 120 с.

Практичне заняття № 3

Визначення основних теплових характеристик електродугового зварювання

3.1 Мета роботи: вивчення основних теплових характеристик процесу електродугового зварювання - теплової потужності дуги, ефективного, термічного й повного ККД.

3.2 Теоретична частина

Кількість тепла, що виділяється дугою за одиницю часу, називається *повною тепловою потужністю дуги* q , Вт. Вона визначається за заміряними у процесі зварювання зварювальному струму I_c і напрузі на дузі u :

$$q = I \cdot u \quad (3.1)$$

Частина виділеного тепла даремно витрачається на нагрівання навколишньої атмосфери шляхом конвекції й випромінювання, тоді як інша частина ефективно витрачається на нагрівання виробу.

Кількість тепла, що передається виробу дугою за одиницю часу, називається *ефективною тепловою потужністю* q_u , Вт. Вона оцінюється ефективним ККД η_u , що являє собою відношення ефективної теплової потужності до повної теплової потужності дуги, тобто

$$\eta_u = \frac{q_u}{q} \quad (3.2)$$

Однак на проплавлення основного металу витрачається тільки частина ефективної теплової потужності. Ця величина оцінюється термічним ККД η_t , що являє собою відношення теплової потужності, затрачуваної на проплавлення q_{np} до ефективної теплової потужності дуги:

$$\eta_t = \frac{q_{np}}{q_u} \quad (3.3)$$

Тепло, що витрачається дугою на проплавлення металу за одиницю часу, або теплову потужність, затрачувану дугою на проплавлення, можна підрахувати, знаючи об'єм проплавленого за одиницю часу металу. $V = F_{np} \cdot V_{cv}$ і теплоємність одиниці обсягу металу, що відповідає температурі плавлення $S'_{nl} = S_{nl} \cdot \gamma$:

$$q_{np} = F_{np} \cdot V_{cv} \cdot S'_{nl} \quad (3.4)$$

де F_{np} - площа проплавлення основного металу, см^2 ;

S'_{nl} - теплоємність розплавленого металу, для маловуглецевої сталі $S'_{nl} = 10400 \text{ Дж/см}^3$;

V_{cv} - швидкість зварювання, см/с .

Розрахунок термічного ККД може бути виконаний за допомогою номограми М.М. Рикаліна (рис. 3.1). Для цього необхідно обчислити безрозмірний критерій ε за формулою

$$\varepsilon = \frac{q_u \cdot V_{св}}{a^2 \cdot S_{нл}^n} \quad (3.5)$$

де a - коефіцієнт температуропровідності, для низьковуглецевої сталі $a = 0,08 \text{ см}^2/\text{с}$.

Повний тепловий ККД η_{np} характеризує повну ефективність процесу проплавлення металу дугою, він дорівнює добутку ефективного й термічного ККД, тобто

$$\eta_{np} = \eta_u \cdot \eta_t = \frac{q_u}{q} \cdot \frac{q_{np}}{q_u} = \frac{q_{np}}{q} \quad (3.6)$$

Отже, повний тепловий ККД дорівнює відношенню теплової потужності, що витрачається на проплавлення, до повної теплової потужності дуги.

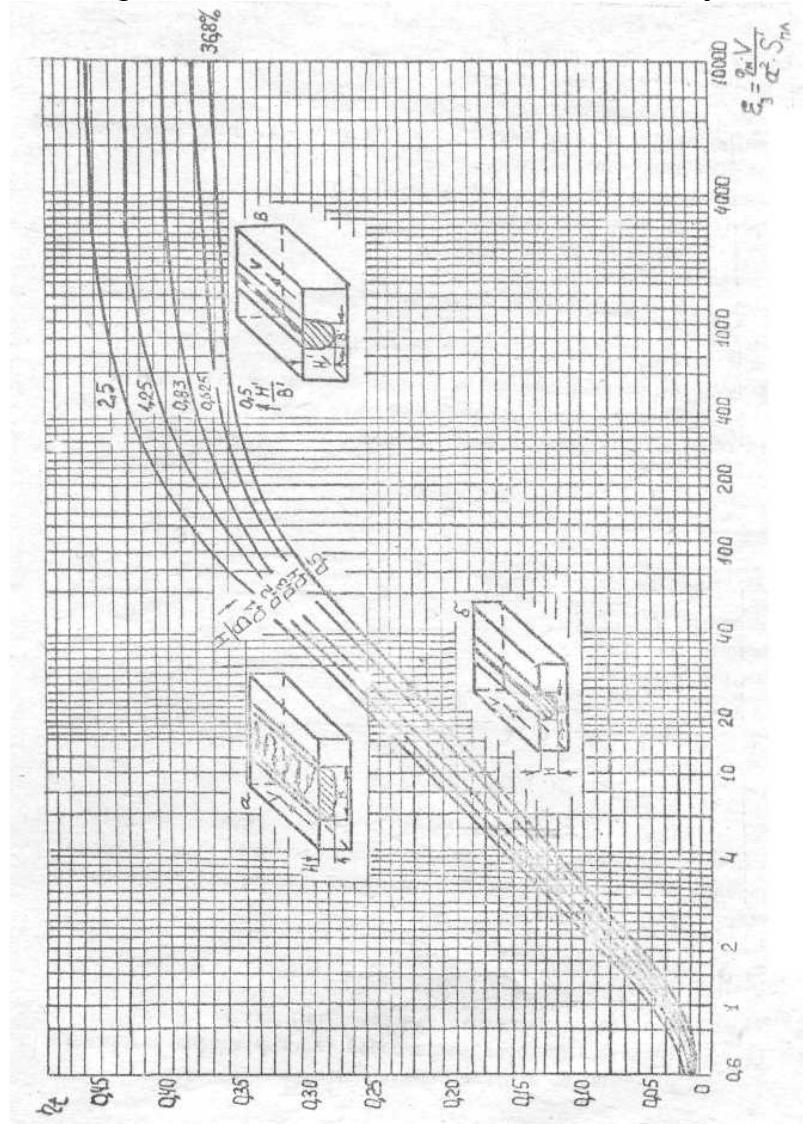


Рисунок 3.1 – Графік для розрахункового визначення термічного ККД при наплавленні на масивне тіло ($H/B = 0,1...2,5$)

3.3 Розрахункова частина

Розрахунок повної теплової потужності дуги здійснюється за формулою (3.1) Підрахунок ефективної теплової потужності дуги може бути проведений по рівнянню теплового балансу й тоді після деяких перетворень буде отримана формула

$$q_u = \frac{Q_k + Q_\Delta + Q_n}{\tau_r - \frac{\alpha}{c\gamma\delta \cdot (\tau_r^2 \cdot 2\tau_r \cdot \tau_n)}} \quad (3.7)$$

де Q_k - теплота, що поглинається калориметром, Дж;

Q_Δ - теплота, що представляє собою різницю в тепломісткості пластини до й після досліду, Дж;

Q_n - теплота, що втрачається на пароутворення при зануренні зразка в калориметр, Дж;

τ_r - час горіння дуги, с;

α - коефіцієнт повної поверхневої тепловіддачі пластини, рівний 0,004 Дж/(см²·с·К);

$c\gamma$ - об'ємна теплоємність металу пластини, для маловуглецевої сталі $c\gamma = 5,42$ Дж/(см³·°C);

δ - товщина пластини, см;

τ_n - час перенесення пластини в калориметр, с.

Окремі складові у формулі (3.7) визначаються в такий спосіб:

$$Q_k = G_B \cdot C_B (T_m - T_0) + \left[G_{kc} \cdot C_{kc} + \left(G_l \cdot C_l + \frac{2}{3} G_{CT} \cdot C_{CT} \right) \right] \cdot (T_m - T_0) \quad (3.8)$$

$$Q_\Pi = G_{\PiЛ} \cdot C_{\PiЛ} \cdot (T_m - T_{вз}) \quad (3.9)$$

Q_Π - визначається залежно від струму за даними табл. 3.3

де G_B , G_{kc} , G_l , G_{ct} - відповідно маса вода в калориметрі, калориметричної посудини, лопати мішалки й стрижня мішалки, г (табл. 3.1);

C_B , C_{kc} , C_{CT} - їх питомі масові теплоємності, Дж/(г·К) (табл. 3.2);

T_0 , T_m - температура води до й після досліду, К;

$G_{\PiЛ}$ - маса пластини після наплавлення, г;

$C_{\PiЛ}$ - питома масова теплоємності пластини, Дж/(г·К) (табл.

3.2);

$T_{вз}$ - температура пластини до досліду, рівна температурі повітря, К.

Після визначення ефективної теплової потужності дуги обчислюється ефективний ККД процесу нагрівання дугою виробу по формулі (3.7). Дані розрахунку зіставляються з аналогічними літературними даними [1...3].

Таблиця 3.1 – Дані калориметра

Об'єм води, л	10
Маса калориметричної посудини, г	2846
Маса мішалки, г	
лопати	11
стрижня	135
Водяний еквівалент калориметра, Дж/К	1256

Таблиця 3.2 – Значення питомої масової теплоємності деяких металів

Метал	C, кал/(г·К)
Мідь	0,421
Латунь	0,396
Сталь маловуглецева	0,688

Таблиця 3.3 – Вплив зварювального струму на втрати теплоти на пароутворення

I_{CB} , А	100	200	400	600	1000	1500
$Q_{п}$, Дж	1670	2500	3330	4170	5000	6250

Теплова потужність, що витрачається дугою на проплавлення металу, визначається по формулі (3.4), а потім розраховується величина термічного ККД (3.3) і повного ККД процесу проплавлення (3.6).

Для порівняння величина термічного ККД визначається за номограмою М.М. Рикаліна (рис. 3.1), для цього попередньо розраховується безрозмірний критерій ε (3.5).

3.4 Зміст звіту

- 1) Мета роботи.
- 2) Методика виконання роботи.
- 3) Результати розрахунків.
- 4) Аналіз отриманих результатів.
- 5) Висновки.

3.5 Контрольні питання

1. Що таке повна теплова потужність дуги?
2. Що таке ефективна теплова потужність нагрівання виробу дугою?
3. Що називається ефективним ККД процесу нагрівання виробу дугою?
4. Як визначається потужність дуги, що витрачається на проплавлення основного металу?

5. Що таке термічний ККД, як він визначається?
6. Як впливають параметри режиму зварювання на величину термічного ККД?
7. Що називається повним тепловим ККД процесу проплавлення метал, дугою?
8. Назвіть основні геометричні параметри зварного шва.

3.6 Список рекомендованої літератури

1. Багрянский К.В., Добротина З.А., Хренов К.К. Теорія зварювальних процесів: Підручник. - Київ: Вища шк., 1976. - 423 с.
2. Теоретические основы сварки /В.В.Фролов, В.А.Винокуров, В.Н.Волченко и др.; Под ред. В.В.Фролова. - М.: Высш. шк., 1989. -559 с.
3. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. - М.:Машгиз, 1951. - 296 с.

Практичне заняття №4

Дослідження процесу нагрівання й розплавлення електрода

4.1 Мета роботи: дослідження зміни температури по довжині електрода від дії струму, що протікає, і тепла дуги, а також вивчення нерівномірності плавлення електрода.

4.2 Теоретична частина

Нагрівання електрода в процесі зварювання обумовлене двома основними факторами:

теплом електричної дуги, що діє на прилягаючу до торця ділянку довжиною не більше 5-10 мм;

теплом, що виникає в повному об'ємі електродного стрижня в результаті опору електрода струму, що протікає (рис. 4.1),

Оскільки нагрівання електрода дугою поширюється тільки на невелику довжину, при розгляді процесу нагрівання всього електрода вплив дуги можна не враховувати.

Розрахунок нагрівання електрода струмом в інтервалі температур від 0 до 800 °С можна приблизно робити на підставі наступних залежностей [1]:

$$\frac{D_1 + T}{T_{np} - T} = \frac{D_1 + T_0}{T_{np} - T_0} \cdot C^{n\tau} \quad (4.1)$$

$$T_{np} = md_1 \cdot j^2 + T_0 \quad (4.2)$$

$$n = \frac{A}{md_1} \cdot \left(\frac{T_{np}}{D_1} - 1 \right) \quad (4.3)$$

де A, D_1, m – дослідні величини, вибираються з табл. 4.1;

T - температура нагрівання електрода, °С;

T_{np} – гранична температура, що отримується при нескінченно тривалому протіканні даного струму по електроду, °С;

T_0 – початкова температура електрода (звичайно дорівнює температурі навколишнього середовища), °С;

τ - час протікання струму, після закінчення якого визначається температура, с;

j - густина струму, А/мм² ;

d_1 – діаметр електродного стрижня, мм.

Розрахунок нагрівання електрода теплом дуги можна зробити на підставі теорії поширення тепла, задавшись розрахунковою схемою. Електрод у цьому випадку розглядається як напівнескінченний стрижень, що нагрівається плоским, рухливим, постійно діючим джерелом живлення. Розподіл температури T поблизу торця електрода задовільно описується рівнянням граничного стану процесу нагрівання стрижня рухомим плоским джерелом. Оскільки електрод постійно подається в дугу, то нагрівання його буде відповідати гілці температурної кривої, розташованої поперед дуги, що рухається, тобто $X > 0$.

Для цих умов справедливий вираз

$$T_{(x)} = (T_K - T_m) \cdot e^{\frac{-W_x}{a}} \quad (4.4)$$

де T_T – температура підігріву електродного стрижня струмом, °С;

T_K – температура торця електрода, що нагрівається дугою, умовно вважається рівній середній температурі крапель, °С;

a – коефіцієнт температуропровідності, для сталі маловуглецевої $a = 0,06 \text{ см}^2 / \text{з}$;

W – швидкість плавлення електрода, см/с;

X – відстань від торця електрода ділянки, що нагрівається дугою, см.

Тепло, що вводиться дугою в електрод, становить частину загального тепла дуги й витрачається на підвищення теплоємності електрода від початкової температури до середньої температури крапель. На початку горіння дуги, коли електродний стрижень ще холодний, швидкість плавлення його завжди нижча, ніж до кінця процесу, коли він нагрівається струмом, що протікає по ньому.

Продуктивність розплавлення електрода оцінюється коефіцієнтом розплавлення α_P , що являє собою кількість електродного металу, що розплавляється, яка припадає на 1 А зварювального струму за одиницю часу, г/А·год,

$$\alpha_P = 3600 \frac{q_P}{I} \quad (4.5)$$

де q_P – кількість електродного металу, що розплавляється, в одиницю часу, г/с;

I - зварювальний струм, А.

Таблиця 4.1 – Чисельні значення, коефіцієнтів, що використовуються при розрахунку, температури електрода

Дріт	Покриття	Рід струму	$A, \frac{\text{мм}^2 \cdot ^\circ\text{C}}{\text{А}^2, \text{с}}$	$D_1, ^\circ\text{C}$	$m, \frac{\text{мм}^2 \cdot ^\circ\text{C}}{\text{А}^2}$
Маловуглецева	Крейдове	Постійний	0,031	240	2,65
		Змінний	0,037	300	2,65
Св-08	УОНИ-13 і ін.	Постійний	0,024	200	2,5
		Змінний	0,027	240	2,5

Мінливість α_p у процесі нагрівання одного електрода оцінюється коефіцієнтом нерівномірності, що являє собою відношення продуктивності розплавлення наприкінці горіння електрода q_{\max} до початкової продуктивності q_0 :

$$K_H = \frac{q_{\max}}{q_0}$$

Для забезпечення рівномірності розмірів валика величина K_H не повинна перевищувати 1,3.

4.3 Розрахункова частина

Розрахунок температур нагрівання електродного стрижня теплом від протікання струму здійснюється в такій послідовності:

- 1) вибираються з табл. 1 постійні A , D_1 , m ;
- 2) визначається густина струму по формулі, $\text{А}/\text{мм}^2$,

$$j = \frac{4I}{\pi d_1^2}$$

де I - зварювальний струм; А;
 d_1 - діаметр стрижня електрода, мм;

- 3) T_{np} береться з виразу (2);
- 4) визначається n з рівняння (3);
- 5) підраховуються безрозмірні критерії процесу:

$$K_1 = \frac{T_{np}}{D_1} \quad K_2 = n \cdot \tau$$

де τ - час протікання струму, після закінчення якого визначається температура, с.

Обчислення температури стрижня T виконується за відомим значенням K_1 і K_2 , з використанням номограми рис. 4.1.

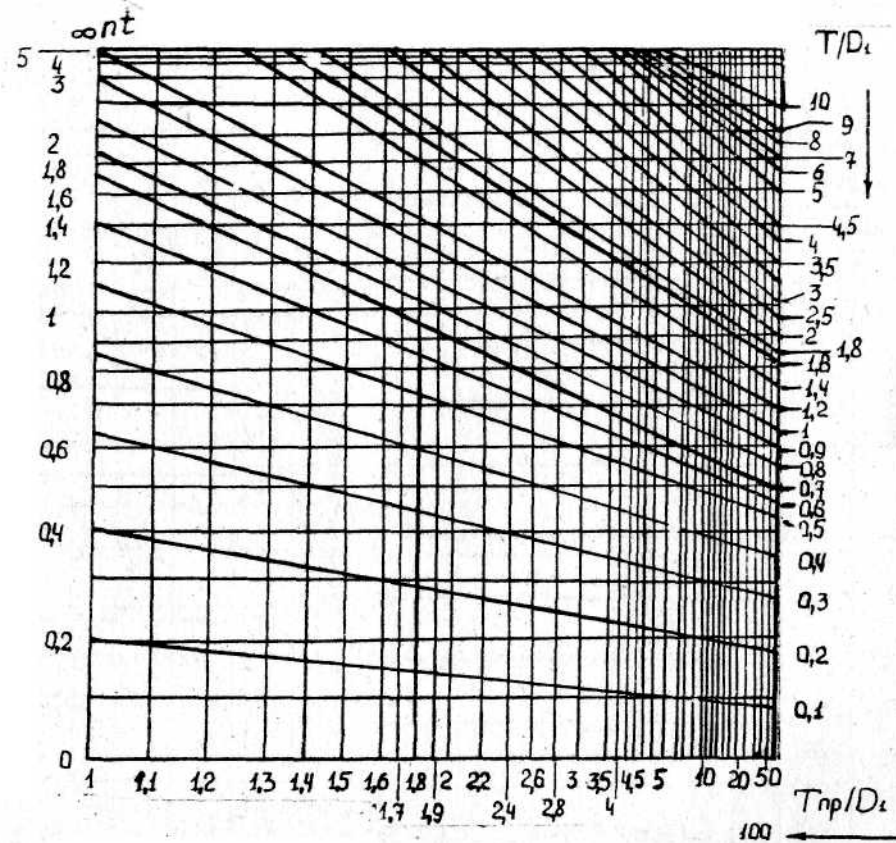


Рисунок 4.1 – Номограма для розрахунку нагрівання сталевих електродів струмом

Визначається відношення $\frac{T}{D_1} = K_3$

звідки $T = K_3 \cdot D_1$

Результати обчислень зводяться в табл. 4.2.

Нагрівання електрода теплом дуги здійснюється за виразом (4.4), для чого задаємося значенням температури T_T .

Результати обчислень зводимо в табл. 4.3.

Таблиця 4.2 – Результати обчислень

Показник	$K_2 = n \cdot \tau$	$K_1 = \frac{T_{np}}{D_1}$	T, °C розрахункова
15			
30			
45			
60			
75			
90			
105			
120			
135			
150			

Таблиця 4.3 – Результати обчислень

Показник	$\frac{W}{a}$	$\frac{-W_x}{e a}$	T, °C
0,1			
0,2			
0,3			
0,4			
0,5			
0,8			
1,0			

Коефіцієнт нерівномірності розплавлення електрода визначається з виразу:

$$K_H = \frac{T_K - T_0}{T_K - T_T}$$

4.4 Контрольні питання

1. Якими джерелами тепла нагрівається електрод при зварюванні?
2. Як розподіляються температури по довжині електрода?
3. Як здійснюється розрахунок нагрівання електрода струмом, що протікає, наближеним методом?
4. Як здійснюється розрахунок нагрівання електрода теплом дуги?
5. Що таке миттєва продуктивність розплавлення електрода?
6. Що таке α_p ?
7. Чим викликана нерівномірність розплавлення електрода при зварюванні?

4.5 Література

1. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. - М.: Машгиз, 1951. - 296 с.
2. Багрянский К.В., Добротина З.А., Хренов К.К. Теория сварочных процессов: Учебник. - Киев: Выща. шк., 1976. - 423 с.
3. Петров Г.Л., Тумарев А.С. Теория сварочных процессов: Учебник. - М.: Высш. шк., 1977. - 392 с.
4. Теория сварочных процессов: Учебник / В.Н. Волченко, В.М. Ямпольский, В.А. Винокуров и др.; Под ред. В.В. Фролова. - М.; Высш. шк., 1988. - 559 с.

Практичне заняття № 5

Дослідження дугового розряду на змінному струмі

5.1. Мета роботи

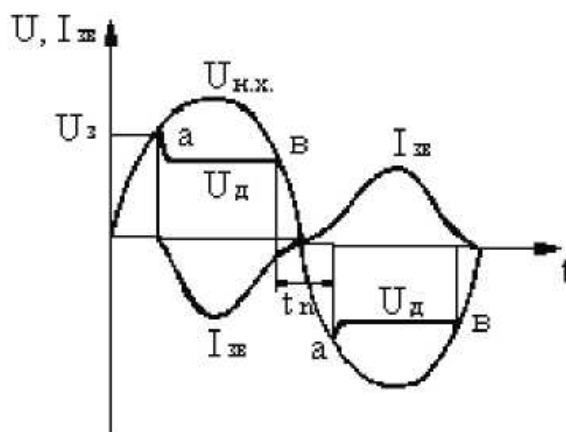
5.1.1 Дослідити особливості дугового розряду на змінному струмі за осцилограмами зварювального струму та напруги.

5.1.2 Дослідити вплив матеріалу електродів на величину вентильного ефекту.

5.2. Короткі теоретичні відомості

Дуговий розряд на змінному струмі відрізняється від розряду на постійному струмі тим, що зміна знаку напруги на електродах кожного півперіоду приводить до переривання розряду з наступним збудженням, але вже з протилежним напрямом струму. Умовою існування дугового розряду є перевищення напруги холостого ходу $U_{н.х.}$ над значенням напруги дуги $U_{д.}$ Через те, що напруга змінного струму як правило змінюється за синусоїдою, при деяких її значеннях $U_{н.х.}$ стає меншою за $U_{д.}$, що спричиняє переривання дугового розряду. Його відновлення відбувається в наступному півперіоді в момент, коли $U_{н.х.}$ стає більшою за $U_{д.}$ (рис. 5.1).

Тривалість перерв в існуванні дуги за інших рівних умов залежить від параметрів зварювального кола - $U_{н.х.}$ зварювального трансформатора (зменшується при її збільшенні), а також виду та величини опорів (зменшується при наявності в колі реактивних опорів). Також вона звичайно зростає із зменшенням часу існування залишкової термоелектронної емісії, збільшенням швидкості розкладання плазми стовпа, збільшенням довжини дуги та погіршенням динамічних властивостей джерела живлення.



$U_з$ - напруга запалювання дуги; $U_д$ - напруга на дузі; $U_{н.х.}$ - напруга неробочого ходу; $I_{зв}$ - зварювальний струм.

Рисунок 5.1 – Криві струму і напруги в колі з активним опором (схематичне зображення);

Повторне збудження дуги полегшується залишковими термоелектронною емісією та йонізацією дугових газів (сприяє зниженню ефективного потенціалу йонізації) та підвищення температури плавлення електрода. Якщо йонізація недостатня, то в кожному півперіоді існує пік запалювання (т. *a*), коли $U_з > U_д$. Дуговий розряд існує до певного значення напруги $U_{н.х.}$ (т. *b*), після чого дуга гасне. Таким чином, у всіх випадках існує деякий проміжок часу, протягом якого відсутній дуговий розряд - і в малоіндукційному колі час горіння може становити (60-70)% від півперіоду.

Умови існування дугового розряду в різні півперіоди будуть неоднакові. Це зумовлюється: - різницею в значеннях роботи виходу електронів з катоду, - різницею температур плавлення і, особливо, - кипіння електродів; - неоднаковою формою і розмірами електродів та - умовами тепловідведення від них тощо. Можна говорити, що в двох сусідніх півперіодах існують різні дуги із асиметричними струмами та напругами. Такий "вентильний ефект" погіршує стабільність дугового процесу, формування швів, чистоту поверхні, характеристики міцності з'єднання. Для його зменшення у зварювальне коло включають конденсатори, акумулятори та інші пристрої.

5.3. Методика виконання роботи

Особливості дуги змінного струму звичайно досліджують за допомогою осцилограм.

При аналізі осцилограм зварювального струму та напруги дуги для пар електродів: графіт-графіт; графіт-сталь; графіт-алюміній; вольфрам-сталь; вольфрам-алюміній; товстопокритий сталевий електрод-сталь, потрібно знайти час горіння дуги. Слід також визначити величину зміщення кривих

струму та напруги відносно нейтральної осі. При зварюванні сталевим електродом потрібно визначити місця замикань та піки запалювання дуги.

5.4. Контрольні питання

1. Поясніть особливості горіння дуги на змінному струмі.
2. Що являє собою пік запалювання?
3. Що являє собою вентильний ефект?
4. Які фактори впливають на величину вентильного ефекту?
5. Правила техніки безпеки при виконанні роботи.

Практичне заняття №6

Дослідження перенесення електродного металу при дуговому зварюванні

6.1. Мета роботи

- 6.1.1. Дослідити характер осцилограм зварювального струму та напруги на дузі при зварюванні плавким електродом в дузі постійного струму.
- 6.1.2. Засвоїти методику дослідження перенесення електродного металу за осцилограмами струму та напруги.
- 6.1.3. Дослідити вплив складу дугових газів та параметрів режиму газоелектричного зварювання на характер перенесення та розмір електродних крапель.
- 6.1.4. Дослідити вплив складу захисних газів на втрати металу за рахунок розбризкування та вигорання.

6.2. Короткі теоретичні відомості

При дуговому зварюванні електродом, що плавиться, основна частина розплавленого електродного металу переноситься на деталь у вигляді крапель та у вигляді пари, яка потрапляє у зварювальну ванну і разом з розплавленим основним металом у процесі кристалізації утворює зварний шов, наплавлений валик чи шар.

Існують дві форми крапельного перенесення, які визначаються способом та режимом зварювання - без закорочення дугового проміжку та із його закороченням. Значною мірою залежать від характеру перенесення електродного металу втрати на розбризкування та вигорання, які складають незначну кількість від загальної маси електродного металу (кілька відсотків).

Такі параметри, як час існування, розміри та температура крапель та траєкторія руху в міжелектродному проміжку істотно впливають на зварювальний процес і, зокрема, на ефективність фізико-хімічної взаємодії

розплавленого металу з газовим середовищем і шлаковою фазою. Ці параметри визначаються спільною дією на розплавлений метал багатьох сил, які виникають під час зварювання. Основні з них описані нижче.

Сила ваги P_B завжди спрямована до центру Землі. Її величина залежить від маси краплі:

$$P_B = m_{кр} \cdot g, \quad (6.1)$$

де $m_{кр}$ - маса краплі; g - прискорення вільного падіння.

Сила ваги сприяє відриванню краплі від електроду при зварюванні в нижньому положенні і намагається утримати її на торці електроду при виконанні стельових швів.

$$P_{мн} \approx d_{ел} \cdot \sigma_{мн}, \quad (6.2)$$

Сила міжфазового натягу $P_{мн}$ визначається величиною міжфазового натягу та діаметром електроду:

При відсутності закорочення дугового проміжку вона спрямована в бік електрода і намагається утримати краплю на його торці, а при закороченні із зварювальною ванною - намагається відірвати краплю від електрода. Величина міжфазового натягу визначається хімічним складом електродних крапель та оточуючого їх середовища (газу чи шлаку), температурою, наявністю поверхнево-активних речовин і елементів, які істотно його зменшують.

Електромагнітні сили P_{er} виникають при протіканні струму через провідник внаслідок, так званого, "пінч-ефекту". Якщо провідник має постійний переріз, то вони діють в радіальному напрямку до нього, стискаючи його, і визначаються за формулою:

$$P_{er} = C \cdot I^2, \quad (6.3)$$

де I — зварювальний струм; $C = 5 \cdot 10^3$ Дж/А.

Якщо провідник змінного перерізу, то крім радіальної сили P_{er} виникає ще й аксіальна P_{ea} , яка спрямована завжди по осі в напрямку більшого перерізу і рівна:

$$P_{ea} = C \cdot I^2 \cdot \ln \left(\frac{F_2}{F_1} \right), \quad (6.4)$$

де F_2 і F_1 - площі перерізів провідника.

Зважаючи на те, що зварювальний струм протікає не по всій поверхні краплі, а лише через активну пляму, то напрямок дії та величина аксіальної сили будуть визначатися співвідношенням площ перерізу електрода і активної плями на поверхні електродної краплі. Площа останньої залежить від: сили зварювального струму (в певних межах зростає із її збільшенням), теплофізичних властивостей дугових газів (їхня теплоємність і теплопровідність впливає на переріз стовпа дуги, отже - і на розмір плями),

природи плями (катодна - більша ніж анодна), розмірів і властивостей деталі й електродів.

Реактивні сили P_p виникають переважно при випаровуванні металу з поверхні краплі і спрямовані перпендикулярно до поверхні випаровування. Їх величина пропорційна масі речовини dm , яка випаровується з поверхні ds за одиницю часу dt , та швидкості струменю пари V_p :

$$P_p = \frac{dm}{ds \cdot dt} \cdot V_p \cdot \quad (6.5)$$

Оскільки інтенсивність випаровування зростає з підвищенням температури на поверхні краплі, то приймаємо, що величина P_p пропорційна квадрату густини струму в активній плямі.

Найвища температура є в місці знаходження активної плями. Тому при її переміщенні реактивні сили теж змінюватимуть напрямок дії, що може викликати відхилення крапель відносно осі електрода, як наслідок - розбризкування.

Розбризкування відбувається при перенесенні рідкого електродного металу із закороченням дугового проміжку через вибухоподібне руйнування "перемички" між краплею та електродом у момент закорочення. Його можна зменшити зниженням величини та швидкості наростання струму закорочення введенням у зварювальне коло додаткових індуктивних та активних опорів.

При перенесенні металу без закорочення дугового проміжку в основному розбризкування спричиняється реактивними силами.

Найважливіший параметр перенесення металу в дузі - це розмір електродних крапель. Він впливає на: стабільність дугового розряду, розбризкування та вигорання розплавленого металу, інтенсивність та повноту протікання фізико-хімічних процесів в електродних краплях, формування зварних швів чи наплавлених валиків. Переважно, кращі значення цих показників отримують при дрібнокрапельному процесі.

6.3. Методика виконання роботи

Дослідження утворення, відривання та перенесення крапель у зварювальну ванну ускладнюється дуже сильною яскравістю дуги та короткочасністю процесу. Найдосконалішим методом такого дослідження є швидкісна кінозйомка, яка проте пов'язана із значними технічними труднощами та великою трудомісткістю.

Певне уявлення про перенесення електродного металу дає метод зняття осцилограм напруги дуги та зварювального струму, що особливо доцільно для дослідження перенесення із закороченням дуги. З осцилограм можна визначити струм закорочення, швидкість його наростання, а крім того, розрахувати середню масу краплі.

Розміри електродних крапель можна визначити безпосередньо шляхом наплавлення на масивний мідний диск, що швидко обертається та охолоджується водою.

6.4. Контрольні питання

- 4.1. Охарактеризуйте вплив сил міжфазового натягу на перенесення металу.
- 4.2. Вплив електромагнітних сил "пінч-ефекту" на перенесення металу.
- 4.3. Вплив реактивних сил на перенесення металу.
- 4.4. Основні причини розбризкування та вигорання металу при зварюванні.
- 4.5. Охарактеризуйте методи дослідження перенесення металу в дузі.
- 4.6. Як з осцилограми струму та напруги визначають середню масу крапель?

6.5. Вимоги до оформлення звітів з практичного заняття

У звіті з практичного заняття потрібно вказати мету роботи, коротко описати методiku та порядок її виконання, навести одержані результати. Найважливішою частиною звіту є аналіз одержаних результатів та висновки. Експериментальні дані доцільно оформити у вигляді таблиць та графіків. Висновки роботи повинні відповідати меті.

Практичне заняття №7 *Легування зварних швів*

7.1. Мета роботи

- 7.1.1 Дослідити вплив складу електродного покриття на легування зварних швів.
- 7.1.2 Дослідити вплив складу флюсів на легування зварних швів та наплавлених валиків.
- 7.1.3 Дослідити вплив складу захисних газів на коефіцієнт переходу легувальних елементів із зварювального дроту в наплавлений метал.

7.2. Короткі теоретичні відомості до роботи

Залежно від методу зварювання легування зварних швів та наплавлених валиків може здійснюватись по-різному: через електродний і присадний дріт при зварюванні в середовищі захисних газів; через електродний дріт та його покриття при ручному дуговому зварюванні; через флюс та дріт при зварюванні під шаром флюсу. Окрім того, у всіх випадках легування може відбуватись і через основний метал:

$$e_{шв} = e_{о.м.} \cdot a + e_{др} (1 - a) \eta_{др}, \quad (7.1)$$

де $e_{шв}$ - вміст елемента у шві;

$e_{о.м.}$ - вміст елемента в основному металі;

$e_{др}$ - вміст елемента у дроті;

a - частка, яку складає основний метал у шві;

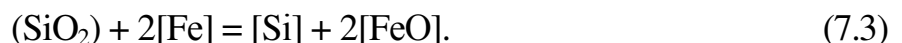
$(1 - a)$ - частка наплавленого металу у шві;

$\eta_{др}$ - коефіцієнт переходу елемента з дроту у наплавлений метал.

Наплавлений метал утворюється за рахунок електродного та присадного дротів, які після розплавлення та фізико-хімічної взаємодії в реакційній зоні потрапляють у зварювальну ванну. За своїм хімічним складом наплавлений метал відрізняється від електродного і присадного втратами окремих хімічних елементів, в першу чергу - за рахунок їх окиснення та випаровування. Ступінь таких втрат якраз і характеризує коефіцієнт переходу елементів із дроту в наплавлений метал. Цей коефіцієнт, як правило, менший за одиницю і на його величину впливає ряд факторів. Так, із збільшенням концентрації кисню в реакційній зоні коефіцієнт зменшується, а при малій спорідненості елементів до кисню величина його зростає. Підвищує коефіцієнт переходу наявність у реакційній зоні інших елементів з більш високою спорідненістю до кисню. Чим нижча температура випаровування елемента, тим більші його втрати і, відповідно, менший коефіцієнт.

При зварюванні і наплавленні під флюсом високого ступеню легування швів та наплавлених валиків можна досягнути, використовуючи керамічні флюси, які містять легувальні елементи у вільному стані або у вигляді феросплавів. У цьому випадку коефіцієнти переходу легувальних елементів із флюсу в наплавлений метал, як правило, вищі, ніж із дроту при зварюванні в середовищі окисних газів, чи ручному дуговому.

Можливості легування через плавлені флюси, порівняно з керамічними, значно менші, тому що в більшості випадків вони є сумішшю оксидів та солей. У цьому випадку легування може здійснюватись переважно марганцем і кремнієм за рахунок протікання таких відновних реакцій:



Ці ендотермічні реакції можуть відбуватись тільки при досить високих температурах - в електродній краплі та у високотемпературній частині зварювальної ванни. При цьому ступінь відновлення марганцю і кремнію залежить від складу шлаку, зокрема - концентрації в ньому оксидів цих елементів, і в загальному випадку визначається таким чином:

$$[\text{Si}] = \frac{(\text{SiO}_2)}{K_C [\text{FeO}]^2}, \quad [\text{Mn}] = \frac{(\text{MnO})}{K_C [\text{FeO}]}, \quad (7.4)$$

де K_C - константи рівноваги відповідних реакцій.

Як видно з залежностей (7.4), концентрація відновлених кремнію і марганцю з їх оксидів прямо пропорційно залежить від вмісту останніх у

шлаку. Вплив концентрації кисню у металі зварювальної ванни протилежний - чим його більше, тим гірше відновлюються ці елементи.

У хвостовій частині ванни, де температура істотно нижча, напрям протікання реакцій змінюється на протилежний - марганець і кремній стають розкислювачами заліза. При цьому певна кількість марганцю і кремнію залишається у зварному шві чи наплавленому валику, легуючи їх.

Розрахувати вміст легувальних елементів у шві чи наплавленому валику при зварюванні під шаром флюсу можна за формулою:

$$e_{шв} = e_{о.м.} \cdot a + e_{др} \cdot (1-a)\eta_{др} + \Delta s, \quad (7.5)$$

де Δs - кількість легуючого елемента, яка переходить у зварний шов чи наплавлений валик із флюсу. Вона залежить від складу флюсу, і певною мірою - від режиму зварювання. Теоретично розрахувати цю кількість легуючого елемента досить важко, і звичайно її знаходять експериментальним шляхом. Коефіцієнт переходу легувальних елементів з дроту $\eta_{др}$ при такому зварюванні в основному визначається складом зварювального шлаку.

При ручному дуговому зварюванні електродами з покриттям легування здійснюється хімічними елементами, що знаходяться в покритті у вільному стані, або входять до складу феросплавів. Легування може здійснюватись і через електродний стрижень. Такий спосіб застосовується переважно при зварюванні легованих сталей та сплавів. У загальному випадку зварювання електродами з покриттям вміст легуючих елементів у зварних швах чи наплавлених валиках розраховується за формулою:

$$e_{шв} = e_{о.м.} \cdot a + (1-a) \cdot (e_{ст} \cdot \eta_{др} + e_{п} \cdot g_0 \cdot \eta_n) + \Delta s, \quad (7.6)$$

де a — частка основного металу в зварному шві чи наплавленому валику; $e_{ст}$ - вміст елемента в електродному стрижні; $\eta_{др}$ - коефіцієнт переходу хімічного елемента з електродного стрижня в наплавлений метал; e_n - вміст елемента у покритті в частках від ваги покриття; g_0 - вага покриття в частках від ваги електродного стрижня; η_n - коефіцієнт переходу хімічного елемента з покриття в наплавлений метал.

На величину коефіцієнтів переходу легувальних елементів з електродного покриття та стрижня в наплавлений метал впливають ті самі фактори, що і у випадку зварювання в середовищі газів. Окрім того, на них також впливають хімічний склад і властивості шлаку, що утворюється при плавленні електродного покриття. Зокрема, чим більша концентрація оксидів легувального елемента в покритті, тим вищі величини цих коефіцієнтів, за інших рівних умов. Важливе значення мають і окислювальні властивості шлаку.

У зв'язку з тим, що багато факторів одночасно та неоднозначно впливають на перехід легувальних елементів з електродного покриття та

стрижня в наплавлений метал, величину коефіцієнтів переходу елементів важко розрахувати теоретично, і тому їх, як правило, визначають експериментально.

7.3. Методика виконання роботи

Для дослідження процесів легування наплавляють валики на пластини з низьковуглецевої сталі. При ручному дуговому зварюванні використовують електроди з різним вмістом легувальних елементів у покритті. При цьому наплавлення валиків здійснюють при нормальній та підвищеній довжинах зварювальної дуги. Для наплавлення під флюсом використовуються керамічні і плавлені флюси різного хімічного складу. У випадку газоелектричного зварювання для наплавлення валиків використовують захисні гази та суміші різної окислювальної здатності.

Для кожної марки електродів визначають відносну вагу покриття g_0 . У зв'язку з цим потрібно знати масу покриття та електродного стрижня покритої частини електроду. Після наплавлення валиків та ретельного зачищення їхньої поверхні металевою щіткою за допомогою стилоскопу виконують якісний і кількісний аналізи основного і електродного металів, а також наплавлених валиків. Виходячи з результатів спектрального аналізу та визначення частки основного і наплавленого металів у валиках, обраховують коефіцієнти переходу легувальних елементів у наплавлений метал.

7.4. Контрольні питання

1. Фактори, що впливають на перехід легувальних елементів з електродного дроту в наплавлений метал при дуговому зварюванні в газовому середовищі.
2. Легування наплавлених валиків при зварюванні під керамічним флюсом.
3. Легування наплавлених валиків при зварюванні під плавленим флюсом.
4. Легування наплавлених валиків при зварюванні електродами з покриттям.
5. Фактори, що впливають на перехід легувальних елементів в наплавлений метал при електродуговому зварюванні електродами з покриттям.
6. Методика експериментального визначення величини коефіцієнтів переходу легувальних елементів із флюсу в наплавлений валик.

Практичне заняття № 8

Дослідження пористості зварних швів

8.1. Мета роботи

8.1.1 Дослідити вплив ступеню вологості флюсу та режиму зварювання на пористість валиків при автоматичному зварюванні під флюсом.

8.1.2. Дослідити вплив складу захисних газів та їх витрат на пористість наплавлених валиків при газоелектричному зварюванні.

8.1.3. Вивчити вплив складу електродного покриття та режиму ручного дугового зварювання на стійкість швів до утворення пор.

8.2. Короткі теоретичні відомості до роботи

Пористість – це один із основних дефектів зварних швів. Утворення пор пов'язане з умовами насичення розплавленого металу газами та їхнього наступного виділення в процесі кристалізації зварювальної ванни. Пори – це пухирчики газів, які не встигли виділитися на поверхню зварювальної ванни до закінчення процесу її кристалізації. Ймовірність виникнення пористості залежить від інтенсивності протікання процесів зародження, розвитку та виділення пухирців на поверхню ванни.

Зародження пор. Умовою зародження газових пор є пересиченість металу газом у будь-якій локальній ділянці ванни. Це відноситься до газів, які розчиняються у розплавленому металі. У зв'язку з тим, що виникнення пор пов'язане з деформацією металевого розплаву, вони будуть зароджуватися там, де роботи на це витратиться найменше. Умова зародження газового пухирця сферичної форми в гомогенному розплаві може бути записана таким чином

$$P_{\Gamma} \geq P_{атм} + P_{Me+Шл} + \frac{2 \cdot \sigma}{r_{кр}}, \quad (8.1)$$

де: P_{Γ} — сума парціальних тисків газів, що виділяються із зварювальної ванни; $P_{атм}$ - атмосферний тиск; $P_{Me+Шл}$ - тиск металу і шлаку, що знаходяться над порою; σ - поверхневий натяг розплавленого металу на границі з газом; $r_{кр}$ - радіус пухирця критичного розміру.

Внаслідок невеликих розмірів зварювальної ванни величина тиску $P_{Me+Шл}$ є незначною у порівнянні з барометричним та тиском поверхневої плівки металу і тому ним звичайно нехтують.

З наведеної залежності видно, що ймовірність виникнення газових пор у гомогенній частині зварювальної ванни дуже мала. Пори переважно виникають на міжфазових границях, які можуть бути в зварювальній ванні. У цьому випадку робота їх утворення визначається різницею між кінцевою та початковою потенціальними енергіями тиску газу та рідини, а також затратою енергії проти дії сил поверхневого натягу рідини, а також адгезії між розплавом та поверхнею фази, де виникають пори;

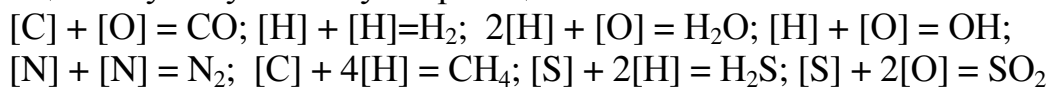
$$A = -(P_G - P_{Pлi}) \cdot V + \sigma \cdot F \cdot \left[1 - \frac{F_{ad}}{F} (1 - \cos \theta) \right], \quad (8.2)$$

де: P_G - тиск газу в середині пухирця; $P_{Pлi}$ - тиск рідини; V - об'єм пухирця; a - поверхневий натяг розплавленого металу на границі з газовою порою; F - поверхня пухирця; F_{ad} - поверхня дії сил адгезії; θ - крайовий кут змочування між розплавом та поверхнею фази, на якій виникає зародок пори.

З формули (8.2) видно, що найменші витрати роботи на зародження газового пухирця будуть у тих місцях, де відношення F_{ad}/F буде найбільшим.

На величину роботи істотно впливає також $\cos \theta$, тобто здатність міжфазової поверхні, на якій утворюється пора, змочуватись розплавом. Чим краща змочуваність (більший $\cos \theta$), тим більша робота зародження пори.

Сумарний парціальний тиск газів, які можуть виділитися з ванни внаслідок протікання можливих реакцій в умовах рівноваги, так званий, прихований чи потенціальний тиск газів, у першому наближенні, можна визначити шляхом термодинамічного аналізу реакцій утворення нерозчинних у металі газів. Для цього потрібно знати хімічний склад металу зварювальної ванни та вміст у ньому газів. У сталевій зварювальній ванні це можуть бути наступні реакції:



Найімовірнішими з них, з термодинамічної точки зору, є реакції утворення оксиду вуглецю та молекулярних водню і азоту. Інтенсивність зародження газових зародків I знаходиться у експоненційній залежності від величини роботи їхнього утворення A , зростаючи із зменшенням останньої:

$$I = B \cdot e^{\left(\frac{-A}{K \cdot T}\right)}. \quad (8.3)$$

Пороутворення значною мірою залежить і від критичного розміру газового пухирця $r_{кр}$:

$$r_{кр} = f\left(\frac{\sigma \cdot \cos \theta}{K_1}\right), \quad (8.3)$$

де K_1 - ступінь пересичення металу газами.

Чим меншою є величина $r_{кр}$, тим більшою є імовірність утворення газових пор, при інших рівних умовах. Проаналізуємо, на яких саме міжфазових поверхнях у сталевій зварювальній ванні робота зародження газових пухирців буде найменшою, тобто ймовірність пороутворення - найбільшою.

Ступінь пересичення воднем і азотом найвища у місцях протікання процесу кристалізації ванни на поверхні первинних кристалітів. Інтенсивність утворення оксиду вуглецю у зварювальній ванні зростає з підвищенням температури і, в зв'язку з цим, кращі умови для протікання цієї реакції будуть на інших міжфазних поверхнях: "Метал"- "шлак"; "Метал"- "неметалеve включення".

Відношення F_{ad}/F є найбільшим при зародженні пор між первинними кристалітами. Змочування розплавом твердих фаз залежить від їхньої природи і є найкращим у первинних кристалітів. Таким чином, аналіз умов зародження газових зародків показує, що вони можуть виникати у ванні на будь-якій з між-фазових границь залежно від конкретних умов зварювання. Але у більшості випадків при зварювання вуглецевих сталей кращі умови для зародження пор існують на міжфазній поверхні "Розплавлений метал"- "первинні кристаліти".

Швидкість росту газових пор, у першу чергу, визначається ступенем пересичення розплавленого металу газами, а також швидкістю їхньої дифузії у металі. Впливають також і інші фактори. Зокрема, якщо у металі багато кисню, то цей поверхнево активний елемент, може адсорбуватись на поверхні газового зародка, сповільнюючи його розвиток зниженням поверхневого натягу і блокуванням від розчинених у металі газів. Пори, за рахунок дифузії до них газів, поступово збільшуються. Вони залишаються на міжфазній поверхні доки не досягнуть розміру, достатнього для відривання від неї і спливання у розплаві.

Швидкість випливання газових пор із металу зварювальної ванни V на її поверхню можна визначити за формулою Стокса:

$$v = \frac{2}{9} \cdot \frac{r^2(\gamma_M - \gamma_G) \cdot g}{\eta}, \quad (8.4)$$

де r - радіус сферичної пори; γ_M - густина рідкого металу; γ_G - густина газу; g - прискорення сили тяжіння; η - в'язкість металу ванни.

Як видно з формули (8.5), окрім розміру пори швидкість її випливання залежить і від в'язкості металу. Вона помітно зростає при зниженні температури, але зменшується з підвищенням ступеня його окислення.

Аналіз факторів, які впливають на зародження і розвиток газових пор, свідчить про те, що причини їхнього утворення у зварних швах і наплавлених валиках та шарах можуть бути різними в залежності від методу, виду та способу і параметрів режиму зварювального процесу, хімічних складів основного і зварювальних матеріалів.

Пористість від азоту може виникати при ненадійному захисті реакційної зони від повітря, а саме: при великій довжині стовпа дуги; при недостатніх витратах захисного газу; у випадку зварювання кореневих швів; при зварюванні електродами на дуже великих струмах. Водень може потрапити у зварювальну ванну при наявності іржі на основному металі та зварювальному дроті; вологості захисних газів, електродного покриття та зварювальних країв; забрудненні основного та зварювальних матеріалів різними органічними речовинами. Слід мати на увазі, що у випадку пересичення зварювальної ванни газами пористість може зменшуватись внаслідок інтенсивного їх виділення ще до початку первинної кристалізації. Цій, так званій, дегазації зварювальної ванни може сприяти протікання хімічної реакції $C/O=CO$ при високих температурах, коли разом з пузирцями оксиду вуглецю будуть виділятися також азот і водень.

Пористість від окису вуглецю може мати місце у тому випадку, коли реакція його утворення має місце у зварювальній ванні при низьких температурах, близьких до первинної кристалізації, що утруднює виділення газових пузирців на поверхню розплавленого металу.

Попередження утворення пористості у зварних швах. Способи попередження утворення пор у зварних швах і наплавлених валиках можна умовно поділити на металургійні та технологічні. До металургійних відносять такі способи, які змінюють фізико-хімічні умови протікання зварювальних процесів. Технологічні способи базуються на регулюванні енергетичних характеристик процесів, а також на використанні заходів, що відносно мало впливають на фізико-хімічні умови, які мають місце у реакційній зоні зварювання.

Уникнути пористості від азоту металургійними способами можна різними шляхами: обмеженням його концентрації у розплавленому металі до величини, меншої за розчинність у твердому; підвищенням розчинності азоту у останньому; зв'язуванням азоту у стійкі нітриди. Зменшення концентрації азоту у розплаві може досягатися газовим або шлаковим захистом реакційної зони від повітря, та обмеженням його вмісту в основному металі та зварювальному дроті. Інші металургійні способи запобігання пористості швів та наплавлених валиків передбачають легування металу шва елементами, які підвищують розчинність азоту у твердому металі та утворюють стійкі нітриди. До металургійних способів належить також сприяння дегазації пересиченого газами розплаву через його кипіння, та інтенсивне протікання реакції окиснення вуглецю.

Металургійні способи попередження пористості від водню переважно базуються на зниженні його концентрації у ванні під час її кристалізації. Це досягається: обмеженням доступу водню та водяної пари в реакційну зону зварювання; зниженням парціального тиску водню в дузі шляхом зв'язування його в сполуки, що не розчиняються в металі (HF, OH); зниженням концентрації водню в зварювальній ванні за рахунок її окиснення чи легування; виділенням водню з розплавленого киплячого металу.

Уникнення пористості від оксиду вуглецю полягає у забезпеченні надійного розкислення металевої ванни при температурах її кристалізації будь-якими елементами, окрім вуглецю. Необхідно, щоб ступінь розкисленості ванни відповідав конкретним умовам зварювання. Так, при сильному її окисненні й низькому вмісті водню і азоту потрібне надійне розкислення. Якщо ж водню та азоту у ній багато, розкислення має бути неповним, інакше внаслідок гальмування кипіння ванни при високих температурах через реакцію $C + O = CO$ кінцевий вміст газів у металі буде високим, що спричинить пористість.

Технологічні способи уникнення пористості значною мірою визначаються методом та видом зварювання. У випадку зварювання електродами, з переважно органічними газотвірними компонентами покриття, це досягається обмеженням величини зварювального струму,

зменшенням діаметру і довжини електродів, а також зниженням швидкості зварювання. При використанні електродів, у яких газовий захист розплавленого металу здійснюється продуктами розпаду карбонатів, обов'язковим є їх зберігання у сухому місці та прожарювання перед зварюванням. При зварюванні під шаром флюсу, зокрема плавеного, необхідно суворо дотримуватись вимог щодо умов його зберігання, а також зачищати кромки основного металу та зварювальний дріт від іржі та інших забруднень. Для уникнення пористості при зварюванні у захисних газах потрібно використовувати сухий газ та обмежувати можливості попадання вологи і повітря в реакційну зону. За всіх методів та видів дугового зварювання пористість швів та наплавлених валиків менша при використанні постійного струму оберненої полярності. Звичайно пористість зменшується при збільшенні погонної енергії внаслідок довшого часу існування металу у розплавленому стані, що сприяє більш повному виділенню з нього газових бульбашок.

8.3. Методика виконання роботи

При виконанні роботи виконується наплавлення валиків на сталеві пластини за різних умов зварювання та виявлення впливу різних факторів на пористість. При ручному дуговому зварюванні здійснюють наплавлення валиків при різній кількості іржі на пластинах та при різних значеннях параметрів режиму (величини струму, довжини дуги, швидкості зварювання).

8.4. Контрольні питання

1. Ймовірність гомогенного зародження газових пор у зварювальній ванні.
2. Фізична суть гетерогенного зародження пор.
3. Фактори, що впливають на роботу утворення пор на міжфазових поверхнях.
4. Реакції, що можуть спричинити виникнення газових пор?
5. Фактори, що впливають на швидкість росту та виділення бульбашок.
6. Металургійні і технологічні способи запобігання пористості від водню.
7. Металургійні і технологічні способи запобігання пористості від азоту.
8. Вплив реакції $[C] + [O] = CO$ у ванні на пористість швів вуглецевих сталей.