

Міністерство освіти і науки України
Донбаська державна машинобудівна академія (ДДМА)

С. В. Жаріков, О. Г. Гринь, Д. М. Голуб

ТЕОРІЯ ПРОЦЕСІВ ЗВАРЮВАННЯ

Практикум до лабораторних робіт

**для здобувачів першого (бакалаврського) рівня
вищої освіти спеціальності 131 «Прикладна механіка»
освітніх програм «Прикладна механіка»,
«Зварювання і споріднені процеси»**

Затверджено
на засіданні вченої ради
Протокол № 5 від 26.12.2024

Краматорськ – Тернопіль
ДДМА
2025

Рецензенти:

Мироненко Є. В., доктор технічних наук, професор, декан факультету економіки і менеджменту Донбаської державної машинобудівної академії;

Марков О. Є., доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизації виробничих процесів Донбаської державної машинобудівної академії;

Мерзляков А.Є., технічний директор ТОВ «ТМ Велдтек».

Жаріков, С. В.

Ж 34 Теорія процесів зварювання : практикум до лабораторних робіт для здобувачів першого (бакалаврського) освітнього рівня вищої освіти спеціальності 131 «Прикладна механіка» освітніх програм «Прикладна механіка», «Зварювання і споріднені процеси»/ С. В. Жаріков, О. Г. Гринь, Д. М. Голуб. – Краматорськ : ДДМА, 2025. – 96 с.

ISBN 978-617-7889-82-2.

У посібнику містяться загальні положення щодо організації лабораторного практикуму. Наведено короткі теоретичні відомості та описано фізичні процеси, що протікають у зоні зварювання, необхідні для проведення лабораторних занять відповідно до робочої програми навчальної дисципліни.

УДК 621.791

© С. В. Жаріков, О. Г. Гринь,
Д. М. Голуб, 2025

© ДДМА, 2025

ISBN 978-617-7889-82-2

ЗМІСТ

ВСТУП	4
1 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 1. Дослідження еластичності зварювальної дуги постійного струму	6
2 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 2. Дослідження дугового розряду постійного струму	17
3 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 3. Дослідження процесу взаємодії магнітних полів з електричною зварювальною дугою	25
4 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 4. Дослідження впливу вологості електродів на вміст водню в наплавленому металі	30
5 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 5. Дослідження теплових характеристик зварювальної дуги	36
6 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 6. Дослідження впливу режиму зварювання на властивості металу шва і навколошовної зони	44
7 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 7. Дослідження проплавлення металу при дуговому зварюванні	50
8 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 8. Дослідження продуктивності процесу розплавлення електрода при дуговому зварюванні	55
9 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 9. Дослідження нерівномірності процесу нагрівання і плавлення електрода при дуговому зварюванні	63
10 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 10. Оцінка схильності зварювальних матеріалів до пористості	67
11 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 11. Оцінка опірності зварних з'єднань до утворення гарячих тріщин	70
12 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 12. Дослідження стійкості наплавленого металу до утворення холодних тріщин	74
13 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 13. Дослідження будови зони термічного впливу сталевих зварних з'єднань	78
14 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 14. Дослідження металургійних процесів при автоматичному зварюванні під шаром флюсу	82
15 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 15. Оцінка рівномірності шлакового покриття наплавленого валика	87
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	92
ДОДАТОК А. Графік для розрахункового визначення термічного ККД при наплавленні на масивне тіло	93
ДОДАТОК Б. Теплофізичні властивості маловуглецевої сталі	94
ДОДАТОК В. Номограма для розрахунку процесу нагрівання струмом електрода з маловуглецевого сталевих дроту	95

ВСТУП

Порядок проведення лабораторних робіт

Заняття проводяться згідно з кафедральним розкладом у лабораторії «Теорія процесів зварювання». Роботи виконуються одночасно групою з 5...7 студентів. При більшій кількості студентів у групі вона розбивається на 2 підгрупи. Кожна підгрупа виконує свою роботу згідно з графіком.

Перед виконанням лабораторного практикуму студенти отримують вступний інструктаж з техніки безпеки (розписуються в спеціальному журналі).

Студент зобов'язаний заздалегідь самостійно вивчити лекційний матеріал і методичні вказівки до виконуваної роботи і бути готовим відповісти на питання для самоперевірки.

Перед роботою викладач контролює рівень теоретичної підготовки студентів. Студенти, які слабо знають теоретичний матеріал, до виконання практичної частини роботи не допускаються.

Отримані результати у вигляді таблиць відразу ж після виконання експериментів слід показати викладачеві, який визначає достовірність отриманих даних і необхідність повторення того чи іншого дослідження.

Зміст, порядок оформлення і здачі звіту

Звіт з кожної виконаної роботи в обов'язковому порядку повинен відображати такі моменти: найменування та мета роботи; завдання дослідження; короткий опис методики експерименту, який при необхідності ілюструється ескізами, схемами; перелік використовуваного обладнання та матеріалів; результати експериментів у вигляді таблиць; оброблення результатів експериментів; графічну інтерпретацію результатів роботи; висновки.

Звіти оформлюються на одному боці аркуша білого паперу формату А4 (210 × 297 мм). Усі ескізи, схеми, графіки і табличні рамки виконуються олівцем чітко та ясно за допомогою лінійки. Графіки будуються на основному аркуші з нанесенням сітки.

Оцінка за виконання лабораторної роботи виставляється викладачем за результатами опитувань, співбесід, з урахуванням активності студента в ході виконання роботи. Робота вважається виконаною студентом після підписання його звіту викладачем.

Звіт про виконану лабораторну роботу повинен бути представлений викладачеві перед виконанням наступної роботи. Без звіту про попередню роботу студент не допускається до виконання наступної.

Перед заліком звіти з усіх виконаних робіт зшиваються разом і оформлюється титульний лист.

Правила техніки безпеки при проведенні лабораторних робіт

Студенти, які не пройшли вступний інструктаж з техніки безпеки та інструктаж на робочому місці, до виконання лабораторних робіт не допускаються.

Правила виконання роботи

1. Перед початком роботи слід перевірити заземлення зварювальної апаратури.

2. Відкривати розподільну шафу для заміни плавких запобіжників має право тільки лаборант.

3. Забороняється включати рубильники на розподільчих шафах, пускачі і зварювальне обладнання без дозволу викладача або лаборанта.

4. Приступати до складання електронних схем можна тільки при вимкненій напрузі мережі живлення.

5. Включення експериментального стенду допускається тільки після перевірки схеми викладачем та отримання його дозволу.

6. При включеному обладнанні не слід торкатися до його корпусу і клем, а також клем вимірювальних приладів.

7. Всі перемикання в електричних схемах повинні проводитися тільки при відключеному живленні.

8. При зварюванні відкритою дугою необхідно користуватися захисними екранами, масками, щитками зі світлофільтрами, справність яких необхідно перевіряти кожен раз перед початком зварювання.

9. Забороняється брати зварювальний флюс, компоненти електродних покриттів голими руками, здувати їх з поверхні деталі, зварного шва.

10. Особливо небезпечною щодо травмування очей є операція зачистки наплавленого металу від шлакової кірки і залишків флюсу. Тому при зачистці швів слід проявляти максимум обережності і працювати в захисних окулярах.

11. Розбирати електричну схему необхідно при вимкненій напрузі мережі, але тільки після дозволу викладача.

12. Після виконання роботи студенти зобов'язані здати лаборанту робоче місце.

1 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 1

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛАСТИЧНОСТІ ЗВАРЮВАЛЬНОЇ ДУГИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Мета роботи: дослідити іонізувальну дію компонентів електродних покриттів, стабілізуючі властивості електродів і флюсів для дугового зварювання.

Загальні вказівки

Студенти повинні знати, що для стабільного протікання процесу зварювання перш за все необхідно забезпечити фізичну стійкість дугового розряду.

Загальноприйнятий критерій фізичної стійкості зварювальної дуги в даний час не розроблений. У цій іпостасі застосовують швидкість переміщення активних плям дуги, амплітуду і частоту коливань напруги дуги, швидкість спаду струму в момент, що передує обриву дуги, і інші змінні характеристики дуги, певним чином пов'язані з просторовою нестійкістю дуги. Однією з причин порушення стабільності процесу зварювання може бути недостатній запас еластичності дуги.

Еластичність дуги – це здатність дуги подовжуватися в певних межах без її обриву. Збурення вздовж довжини дуги можуть бути при скиданні краплі розплавленого металу з торця електрода і різних переміщеннях електрода – уздовж або поперек шва; місцевому порушенні правильності складання зварюваних деталей (ступінчастість кромки); порушення дуги з короткого замикання електродів з їх подальшим розведенням.

При порушенні дуги в разі ручного дугового зварювання (РДЗ) амплітуда відриву електрода становить у досвідченого зварювальника до 3 мм, у недосвідченого – до 6 мм. Якщо вважати, що максимальні збурення спостерігаються по довжині дуги, то еластичність дуги повинна забезпечувати горіння дуги без обривів при випадкових подовженнях її до 6 мм. У цьому випадку буде гарантована нормальна робота зварника будь-якої кваліфікації.

Компоненти, з яких виготовляються зварювальні матеріали, діляться на іонізувальні, шлакоутворювальні, газоутворювальні, розкислювальні і легуючі. Не всі компоненти підвищують фізичну стійкість дугового розряду, деякі з них мають протилежний вплив.

Виникнення і існування дугового розряду між металевими електродами обумовлено іонізацією газової атмосфери дугового проміжку:



Для відриву електрона від атома або молекули необхідно затратити певну кількість енергії, яку називають роботою іонізації ϕ :

$$\varphi = e_0 U_j \quad (1.1)$$

де e_0 – заряд електрона;

U_j – потенціал іонізації.

Чим нижче потенціал іонізації атома або молекули, тим легше можна утворити з однієї нейтральної частинки дві заряджені (електрон і позитивно заряджений іон), легше створити провідну атмосферу, необхідну для підтримки дугового розряду.

Тому для збільшення фізичної стійкості дугового розряду до складу електродних матеріалів вводять речовини з низькими потенціалами іонізації (солі цезію, рубідію, калію, натрію).

Робоче завдання

1. Вивчити методику К. К. Хренова – визначення розривної довжини дуги.

2. Оцінити іонізувальну здатність різних компонентів зварювальних матеріалів.

3. Провести порівняльне визначення стабільності зварювальної дуги при застосуванні декількох різних марок сучасних флюсів при постійних значеннях напруги холостого ходу U_0 , струму короткого замикання $I_{кз}$, діаметра d_e і вильоту L_v електродного (сталевого) стрижня.

4. Визначити вплив на розривну довжину дуги величини струму короткого замикання (значення $I_{кз}$ задаються викладачем) при незмінних марці флюсу, діаметрі і вильоті електродного дроту, висоті засипки флюсу, типі джерела живлення і напрузі його холостого ходу.

5. Визначити вплив на розривну довжину дуги напруги холостого ходу джерела живлення (значення U_0 задаються викладачем) при постійних значеннях струму короткого замикання, діаметра і вильоту електродного стрижня, висоті засипки флюсу, незмінних марок флюсу і типу джерела живлення.

6. Провести порівняльне визначення стабільності зварювальної дуги при застосуванні різних марок сучасних покриттів електродів з урахуванням сталості значень U_0 , $I_{кз}$, d_e , вильоту електрода і незмінному типі джерела живлення.

7. Повторити пп. 4 і 5, застосовуючи замість флюсу певну марку якісного електрода (задається викладачем).

Примітка. Обсяг завдання при проведенні лабораторної роботи визначається викладачем.

Обладнання, пристрої та матеріали

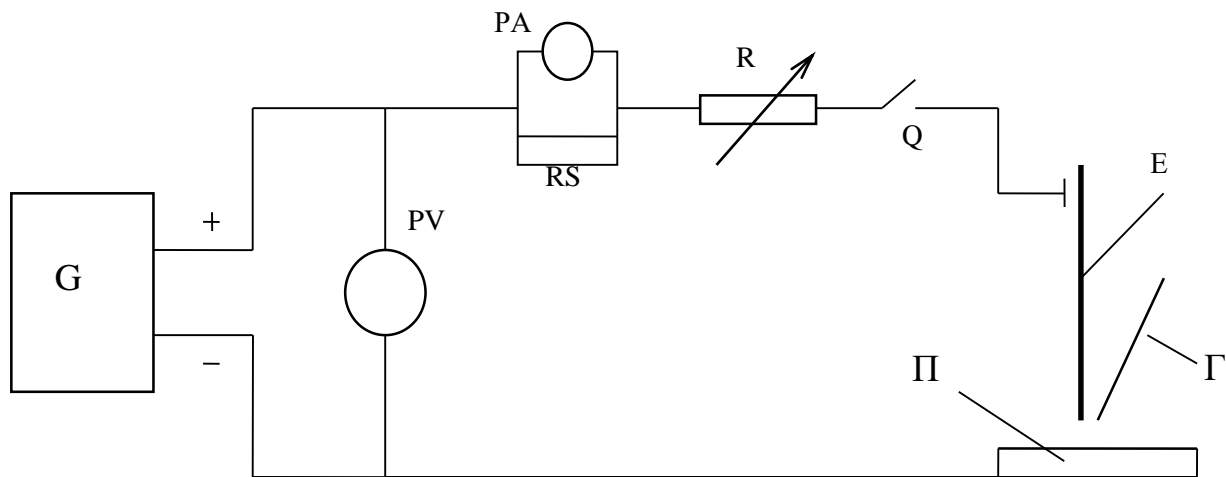
1. Джерело живлення постійного струму з жорсткою зовнішньою характеристикою; реостат баластний типу РБ-301; амперметр і вольтметр постійного струму; шунт вимірювальний.

2. Штатив для закріплення електродів (електродних стрижнів); штангенциркуль; вимірювальний шаблон; трубчастий обмежувач флюсу; ізоляційна прокладка під штатив; набір ручного інструменту зварника.

3. Електродні стрижні (сталеві) в кількості 6...7 шт. одного і того ж діаметру ($d_e \leq 4$ мм); якісні електроди різних марок одного і того ж діаметру ($d_e \leq 4$ мм); флюси 2...5 різних марок; компоненти електродних покриттів.

Вивчення роботи експериментальної установки

Експериментальна установка збирається за схемою, представленою на рис. 1.1. Джерелом живлення зварювальної дуги служить зварювальний перетворювач із жорсткою зовнішньою характеристикою типу ПГС-500-1 або випрямлячі типів ВДГ-601, ВДУ-505, ВДУ-1201.



G – джерело живлення; *PV* – вольтметр постійного струму;

RS – шунт вимірювальний; *PA* – мілівольтметр;

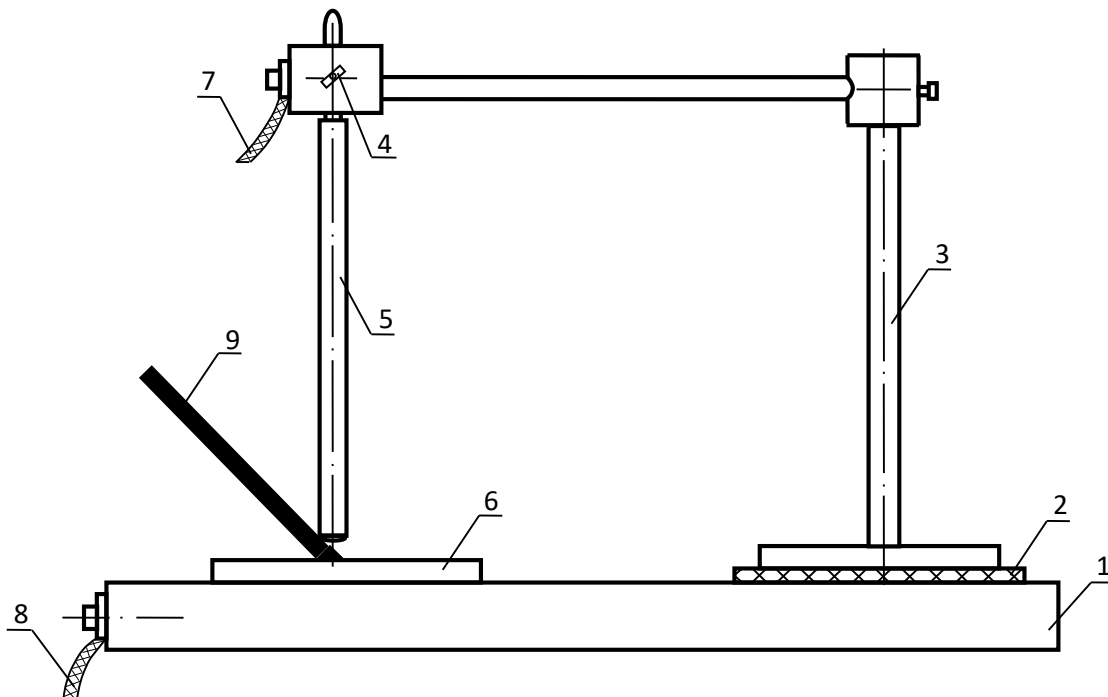
R – реостат баластний РБ-301; *Г* – графітовий стержень;

Q – роз'єднувач; *П* – сталеві пластина; *Е* – електрод

Рисунок 1.1 – Схема експериментального стенду

У даний час найбільш поширеним критерієм оцінки еластичності зварювальної дуги є розривна довжина дуги, яка визначається за методикою К. К. Хренова. Дана методика використана в лабораторній роботі.

На зварювальний стіл кладуть пластину сталі, що підлягає зварюванню, і встановлюють штатив, в якому вертикально закріплений відповідний електрод (рис. 1.2). Під штатив укладають ізоляційну прокладку. Нижній кінець електрода за допомогою шаблону встановлюють на відстані 2 мм від пластини. До столу і штатива підводять дроти від джерела живлення. Після подачі напруги загостреним вугільним стрижнем на короткий час замикають зазор між кінцем електрода і пластиною.



1 – зварювальний стіл; 2 – ізоляційна прокладка; 3 – штатив;
 4 – затиск; 5 – електрод; 6 – сталева пластина;
 7-8 – зварювальні проводи; 9 – вугільний стрижень
 Рисунок 1.2 – Установка для визначення розривної довжини дуги

Дуга повинна горіти до природного обриву, який відбувається внаслідок зростання довжини дуги в процесі плавлення електрода. Після обриву дуги вимикають джерело живлення і за допомогою шаблону вимірюють відстань між кінцем оплавленого електрода і бобишкою, наплавленою на пластину (рис. 1.3).

Відстань, яка дорівнює довжині дуги в момент її згасання, називається розривною довжиною дуги L_p .

Розривна довжина дуги – це довжина дуги, при досягненні якої обрив дуги при даних умовах неминучий. Розривна довжина дуги служить мірою еластичності дуги в заданих умовах: чим більше розривна довжина дуги, тим вище еластичність дуги.

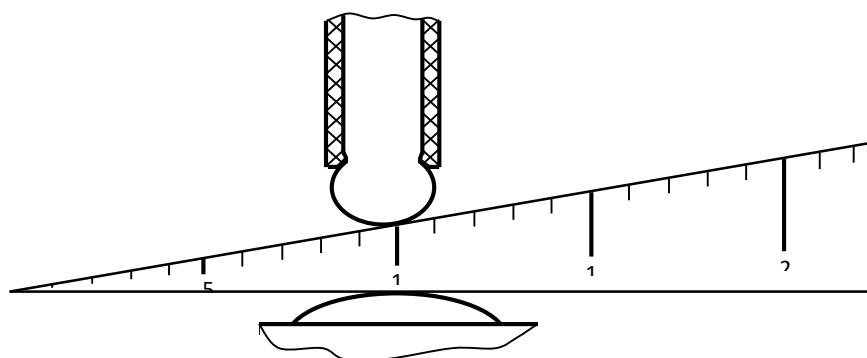


Рисунок 1.3 – Схема вимірювання розривної довжини дуги

Оцінка еластичності дуги за методикою К. К. Хренова носить статистичний характер і вимагає великої кількості дослідів через значну різницю результатів вимірювань. Слід зазначити, що умови горіння дуги при нерухомому електроді значно відрізняються від реально існуючих в процесі зварювання і, особливо, при порушенні дуги. Середня швидкість подовження дугового проміжку при цих випробуваннях порівняно невелика і дорівнює швидкості плавлення електрода.

Умови існування дугового розряду залежать, перш за все, від хімічного складу основного і електродного металу, газової та шлакової фаз, електричних параметрів джерела живлення і зварювального кола.

Для електричного кола, що складається з джерела живлення, дуги (споживача енергії) і активного опору всього контуру, справедливий вираз

$$U_{жс} = U_{\delta} + I_{зв} R_{к} \quad (1.2)$$

де $U_{жс}$ – напруга на клеммах джерела живлення, В;

U_{δ} – падіння напруги на дузі, В;

$I_{зв}$ – зварювальний струм, А;

$R_{к}$ – активний опір зварювального контуру, Ом.

Падіння напруги на дузі включає суму падінь напруг в приелектродних ділянках $U_{ка}$ і падіння напруги в стовпі дуги U_c :

$$U_{ка} = U_{к} + U_{а},$$

$$U_c = K_{\delta} L_{\delta},$$

де $U_{к}$ – падіння напруги в катодній ділянці;

$U_{а}$ – падіння напруги в анодній ділянці;

K_{δ} – градієнт потенціалу стовпа дуги;

L_{δ} – довжина дуги.

Таким чином,

$$U_{\delta} = U_{ка} + K_{\delta} L_{\delta}. \quad (1.3)$$

Спільне розв'язання рівнянь (1.2) і (1.3) дозволяє отримати вираз:

$$L_{\delta} = \frac{U_{жс} - U_{ка} - I_{зв} R_{к}}{K_{\delta}}. \quad (1.4)$$

Рівняння (1.4) визначає залежність довжини дуги як від електричних параметрів зварювального кола (U_{δ} , $I_{зв}$, $R_{к}$), так і від хімічного складу основного й електродного металу.

При дуговому зварюванні режим (струм, напруга) визначається перетином зовнішньої характеристики джерела живлення $U_{жс} = f_1(I_{зв})$ зі статичною характеристикою дуги $U_{\partial} = f_2(I_{зв})$, що показано на рис. 1.4.

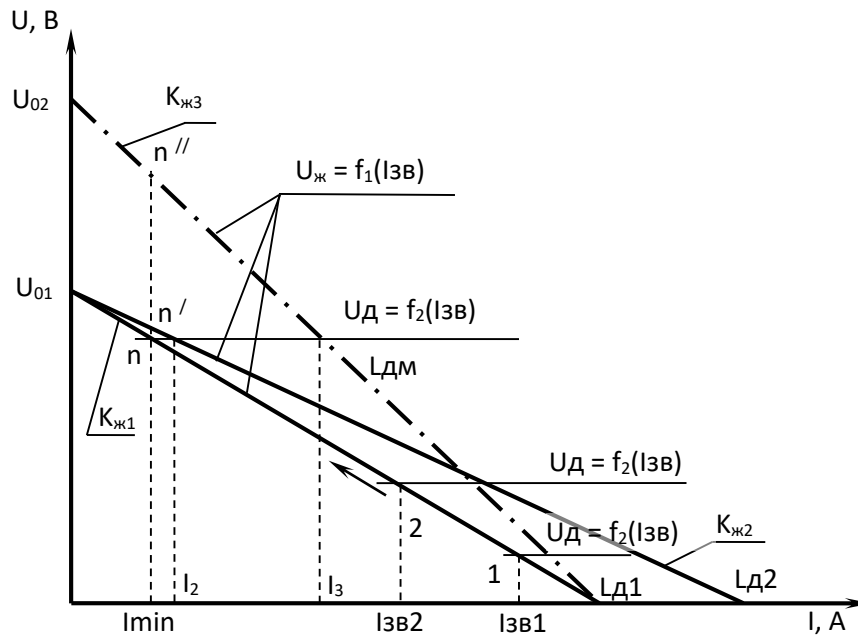


Рисунок 1.4 – Зміна режиму горіння дуги при зміні її довжини (електрод нерухомий)

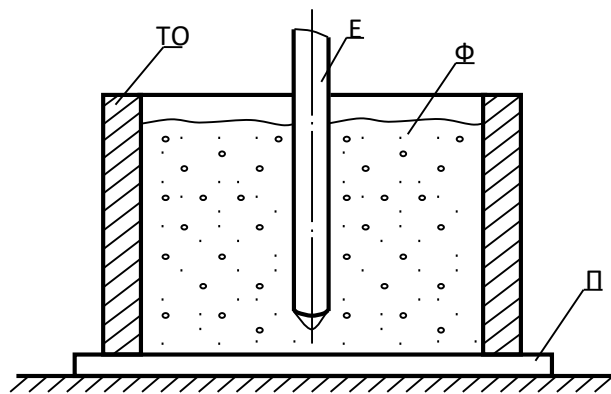
Наприклад, в якийсь початковий момент режим зварювання відповідав точці 1. Плавлення електрода, нерухомо закріпленого в штативі, і перехід крапель у зварювальну ванну викликав подовження дуги до величини $L_{\partial 2}$. Цьому положенню буде відповідати менший струм дуги ($I_{зв2} < I_{зв1}$). Потім дуга знову подовжується, тобто точка перетину зовнішньої характеристики джерела живлення і статичної вольт-амперної характеристики як би переміщається уздовж зовнішньої характеристики джерела живлення у напрямку стрілки на рис. 1.4. Нарешті настає момент (відповідний точці n), коли за даних умов струм дуги матиме якесь порогове значення $I_{зв} = I_{min}$, нижче якого дуга не може існувати. Цьому положенню відповідає і максимальна напруга дуги, і максимальна довжина дуги $L_{\partial n} = L_p$. Чим вище напруга джерела живлення за інших ідентичних умов, тим більше розривна довжина відповідно до рівняння (1.4).

Якщо зменшити опір зварювального контуру R_k ($K_{ж2} < K_{ж1}$), то при новій довжині дуги $L_{\partial n}$ струм дуги буде більше ($I_2 > I_{min}$). Це збільшує ступінь іонізації стовпа дуги (підвищується фізична стійкість дуги). Розривна довжина дуги збільшується (точка n' вище точки n). Аналогічним чином діє і збільшення напруги холостого ходу ($U_{02} > U_{01}$, $I_3 > I_2 > I_{min}$), точка n'' вище точки n'). Отже, збільшення як напруги холостого ходу джерела живлення, так і струму короткого замикання підвищує еластичність дуги.

В умовах визначення розривної довжини дуги (тобто в умовах «зварювання» без подачі електрода, що адекватно процесу зварювання кратера) з плином часу відбувається зміна всіх основних параметрів зварювання: довжини, струму і напруги дуги. Тому при проведенні експерименту слід задаватися напругою холостого ходу і коефіцієнтом зовнішньої характеристики джерела живлення K_n (або величиною струму короткого замикання $I_{кз}$). Сталеві пластини товщиною 8–10 мм закріплюються на зварювальному столі за допомогою струбцини. Поверхня електродних стрижнів повинна бути очищена від слідів іржі, технологічного мастила та інших забруднень. При повторному використанні кінець стрижня ретельно зачищається (краще – обрубється), торці електродів очищуються від шлакової кірки.

При випробуванні компонентів зварювальних матеріалів і флюсів висота шару компонента повинна бути такою, щоб дуга в процесі горіння не могла вийти з-під нього. Для того щоб флюс або компонент не розсипався ставиться трубчастий обмежувач флюсу (рис. 1.5).

Електродний стержень може замикатися на сталеву пластину через залізний порошок або тонку сталеву стружку.



*Е – електродний стержень; ТО – трубчастий обмежувач флюсу;
 Ф – флюс або компонент зварювальних матеріалів;
 П – сталеві пластини*

Рисунок 1.5 – Схема дослідження компонентів зварювальних матеріалів і флюсів

Порядок виконання роботи

1. Наждачним папером зачистити до металевих блиску електродні стрижні й сталеві пластини.

За допомогою абразивного круга заторцювати робочі кінці електродів. Один кінець кожного електродного стрижня заточити на конус.

2. Включити джерело живлення і встановити задану величину струму короткого замикання. Відключити джерело за допомогою роз'єднувача Q.

3. Закріпити електродний стрижень в штатив над пластиною, витримавши за допомогою шаблону зазор 2 мм між пластиною і кінцем електрода. Електроди, заточені на конус, доводяться до зіткнення зі сталевією стружкою або залізним порошком, попередньо поміщеними в центр пластини. Встановити трубчастий обмежувач флюсу таким чином, щоб електродний стрижень знаходився в його центрі. Засипати в обмежувач випробуваний компонент зварювальних матеріалів.

4. Включити роз'єднувач Q. При наявності контакту між електродом і пластиною через залізний порошок або стружку дуга повинна порушуватися відразу і горіти до природного обриву.

5. Вимкнути роз'єднувач Q.

6. Підняти трубчастий обмежувач, видалити залишки випробуваного компонента, очистити оплавлений кінець електрода і наплавлену на пластину бобишку від шлаку.

7. Виміряти розривну довжину дуги клиновим вимірювальним шаблоном.

8. Повторити пп. 2...7 ще 2...4 рази. При значному розкиді результатів всю серію дослідів з даними компонентом повторити. При окремих випадках розривної довжини дуги провести додатковий контрольний експеримент. Результати дослідів звести в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Іонізувальна дія різних речовин у зварювальній дузі постійного струму

I _{кз} = А, U _о = В, d _е = мм							
Найменування компонента	Хімічна формула	Розривна довжина дуги, мм					середнє значення
		1	2	3	4	5	

9. Повторити пп. 2...8, використовуючи для дослідів різні флюси. Техніка експерименту залишається тією ж самою. Результати дослідів звести в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Стабілізувальні властивості зварювальних флюсів

I _{кз} = А, U _о = В, d _е = мм							
Марка флюсу	Основа флюсу	Розривна довжина дуги, мм					середнє значення
		1	2	3	4	5	

10. Виконати досліди щодо визначення розривної довжини дуги для заданої марки флюсу при різних значеннях струму короткого замикання у

відповідність з п. 4 робочого завдання. При цьому використовувати техніку експерименту, наведену в пп. 2...8. Результати дослідів звести в табл. 1.3. Експеримент провести при зворотній і прямій полярності.

Таблиця 1.3 – Вплив величини струму короткого замикання на розривну довжину дуги, флюс АН-348А

		$U_0 = \quad В, d_e = \quad мм$					
Струм короткого замикання, А	Полярність	Розривна довжина дуги, мм					середнє значення
		1	2	3	4	5	

11. Виконати досліді з визначення розривної довжини дуги для заданої марки флюсу при різних значеннях напруги холостого ходу у відповідності з п. 5 робочого завдання. При цьому використовується техніка експерименту, наведена в пп. 2...8. Результати дослідів звести в табл. 1.4. Експеримент провести при зворотній і прямій полярності.

Таблиця 1.4 – Вплив величини напруги холостого ходу на розривну довжину дуги, флюс АН-348А

		$I_{кз} = \quad А, d_e = \quad мм$					
Напруга холостого ходу, В	полярність	Розривна довжина дуги, мм					середнє значення
		1	2	3	4	5	

12. Провести експерименти, описані в пп. 2...11 з якісними електродами заданих марок. При цьому потреба в трубчастому обмежувачі відпадає. Зазор між торцем електрода і пластиною не заповнюється ні стружкою, ні залізним порошком. Збудження дуги здійснюється шляхом короткочасного замикання розрядного проміжку вугільним (графітовим) стрижнем. Результати дослідів звести в табл. 1.5–1.7.

Таблиця 1.5 – Стабілізувальні властивості зварювальних електродів, постійний струм, полярність зворотна

		$I_{кз} = \quad А, U_0 = \quad В, d_e = \quad мм$					
Марка електрода	Газошлакова основа покриття	Розривна довжина дуги, мм					Середнє значення
		1	2	3	4	5	

Таблиця 1.6 – Вплив величини струму короткого замикання на розривну довжину дуги, електроди УОНИ-13/45

Режими: $U_o = B, d_e = \text{мм}$							
Струм короткого замикання, А	Полярність	Розривна довжина дуги, мм					
		1	2	3	4	5	середнє значення

Таблиця 1.7 – Вплив величини напруги холостого ходу на розривну довжину дуги, електроди УОНИ-13/45

$I_{кз} = A, d_e = \text{мм}$							
Напруга холостого ходу, В	Полярність	Розривна довжина дуги, мм					
		1	2	3	4	5	середнє значення

Оброблення результатів експерименту

1. За даними табл. 1.1; 1.2; 1.5 побудувати порівняльні гістограми вигляду, наведеного на рис. 1.6.

2. За даними табл. 1.3; 1.4; 1.6; 1.7 побудувати графіки залежностей $L_p = f(I_{кз})$ і $L_p = f(U_o)$.

3. Зробити висновки з теоретичним обґрунтуванням отриманих результатів.

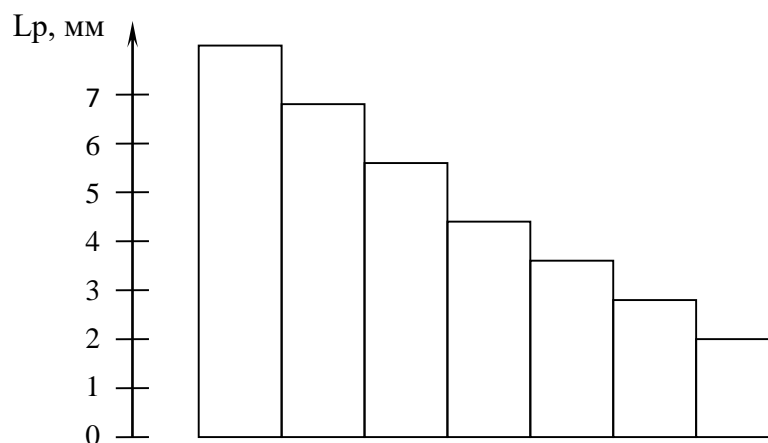


Рисунок 1.6 – Оброблення експериментальних даних іонізувальних властивостей компонентів зварювальних матеріалів

Контрольні питання

1. Що таке ефективний потенціал іонізації і як він залежить від складу атмосфери дуги?
2. Якими процесами забезпечується перенесення струму в стовпі дуги?
3. Що таке ступінь іонізації і як вона залежить від температури іонізації і потенціалу іонізації речовини?
4. Види іонізації газу в дузі?
5. До якої зі складових напруги дуги можна прирівняти ефективний потенціал іонізації?
6. Яке призначення іонізувальних компонентів зварювальних матеріалів?
7. Як зміниться енергія дугового розряду при збільшенні вмісту фтористих або хлористих солей у складі зварювальних матеріалів, якщо величина струму і довжини дуги залишаться незмінними?
8. Як зміниться продуктивність процесу розплавлення металу в ході зварювання при збільшенні лужних, лужноземельних речовин у складі зварювальних матеріалів, якщо величина струму і довжини дуги залишаться незмінними?
9. Який з наступних компонентів зварювальних матеріалів: SiO_2 , FeO , FeSi , CaF_2 , CaO – сильно знижує еластичність зварювальної дуги? Підвищує еластичність дуги?
10. Як буде змінюватися розривна довжина дуги, якщо при постійній величині напруги джерела живлення збільшувати опір зварювального кола?
11. Як буде змінюватися розривна довжина дуги, якщо при постійній величині струму короткого замикання збільшувати напругу джерела живлення?

2 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ДУГОВОГО РОЗРЯДУ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Мета роботи: дослідити будову дугового розряду з неплавким електродом і визначити його параметри.

Загальні вказівки

Слід згадати явище проходження електричного струму через гази, яке отримало назву газових розрядів. У техніці розрізняють і використовують темновий, нормальний тліючий, аномальний тліючий, дуговий, чорновий і коронний розряд. Жорстких кількісних меж між ними провести не вдається, тому що один вид розряду часто переходить в інший без помітного зовнішнього впливу.

Поняття «дугового розряду» охоплює всі види газових розрядів, які характеризуються великою щільністю струму, малим падінням напруги, що не перевершує декількох десятків вольт і високою температурою газу в зоні розряду.

Дуга розмежовується на три ділянки – катодну, стовп і анодну, що характеризуються падіннями напруг U_k , $U_{ст}$, U_a . Приелектродні падіння напруги U_k і U_a не залежать від довжини дуги. Падіння напруги в стовпі дуги пропорційно довжині стовпа дуги:

$$U_{ст} = K_d \cdot L_{ст},$$

де K_d – градієнт потенціалу стовпа дуги, величина якого залежить від фізичних властивостей середовища, в якій горить дуга.

Оскільки довжина приелектродних ділянок незмірно мала в порівнянні з довжиною стовпа дуги, то вважають, що $L_{ст} \approx L_d$. Тоді:

$$U_{ст} = K_d \cdot L_d \quad (2.1)$$

Експериментальне дослідження розподілу потенціалу вздовж дуги має великі труднощі з наступних причин: по-перше, в силу малих лінійних розмірів катодної і анодної ділянок, по-друге, на ділянці стовпа дуги мають місце високі температури, що ускладнює застосування такого методу вимірювань, як метод зондів.

Крім того, слід пам'ятати, що зонд, введений у стовп дуги, являє собою чужорідне тіло, що має початкову температуру навколишнього середовища. Усе це значно спотворює справжню картину.

На рис. 2.1 наведена приблизна картина розподілу напруги в дузі. Довжини окремих ділянок показані без дотримання масштабу.

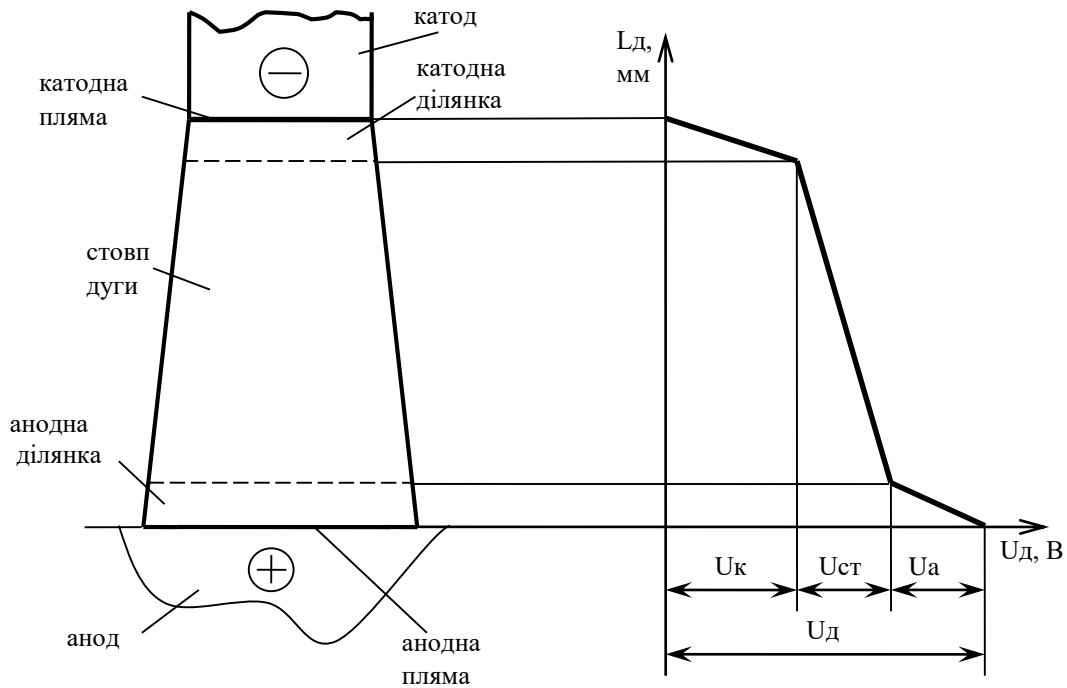


Рисунок 2.1 – Розподіл напруг по довжині дуги

Робоче завдання

1. Користуючись методом оптичної проєкції, ознайомитися з будовою дуги постійного струму, що горить в атмосфері повітря:

- між двома вугільними електродами;
- між вугільним і металевим електродами, при прямій і зворотній полярності.

Визначити фактичні значення довжини дуги, діаметри активних плям на електродах.

За вказівкою викладача використовувати вугільні або графітові електроди і пластини з маловуглецевої сталі, міді або алюмінію.

2. Отримати експериментальні дані для обчислення коефіцієнтів рівняння Г. Айртона і побудови вольт-амперних статичних характеристик дуги постійного струму, що горить в середовищі повітря:

- між вугільними електродами;
- вугільними і металевими електродами, при прямій і зворотній полярності.

Примітка. Обсяг завдання, матеріал електродів і режими горіння дуги вказує викладач.

Обладнання, пристрої та матеріали

1. Джерело живлення зварювальної дуги – випрямляч УКСМ-1000 і баластний реостат РБ-301, вольтметр і амперметр (з шунтом на 300 А) постійного струму, перемикач полярності.

2. Штатив з затискачем для електрода і механізмом вертикального переміщення електрода, екран, з'єднувальні дроти, лінійка вимірювальна.

3. Електроди вугільні (графітові), металеві; пластини вугільні (графітові), металеві.

Вивчення роботи експериментальної установки

Установка (рис. 2.2) складається з джерела живлення GV (випрямляч УКСМ-1000); реостата баластного R типу РБ-301; амперметра PA з шунтом RS на 75 мВ, 300 А; вольтметра PV; перемикача полярності Q; штатива Шт, за допомогою якого можна плавно регулювати довжину дуги; електрода E1, встановленого в рухливий затиск штатива, і електрода E2, встановленого в нерухомій обоймі.

Слід звернути увагу на місце установки перемикача полярності Q.

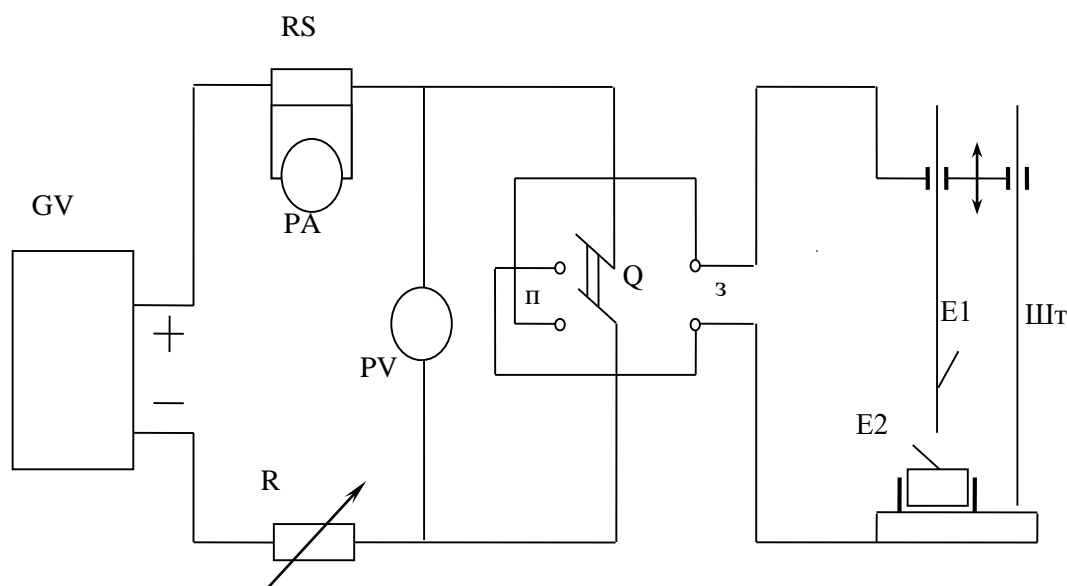


Рисунок 2.2 – Схема експериментальної установки

Будову дуги можна спостерігати через світлофільтр або за допомогою оптичної проєкції дуги на екран. При спостереженні дуги через світлофільтр відбувається спотворення істинного забарвлення різних зон дуги і вимір її довжини здійснити дуже важко. При проєктуванні дуги на екран (рис. 2.3) зберігається забарвлення зон дуги і з'являється можливість отримати на екрані збільшене її зображення, користуючись яким можна досить точно виміряти довжину дуги, що необхідно для визначення коефіцієнтів рівняння Г. Айртона і побудови статичних характеристик дуги.

Збільшене зображення дуги на екран можна замалювати, обводячи контури зображення олівцем. Знаючи ступінь збільшення зображення, визначають фактичну довжину дуги.

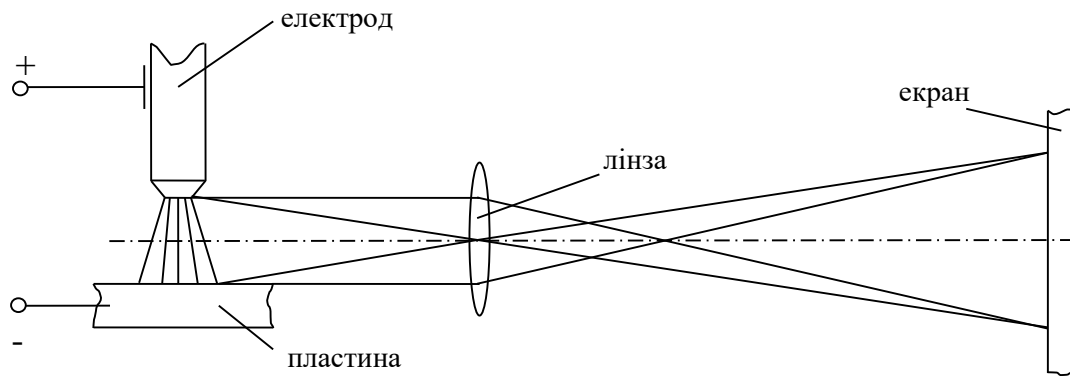


Рисунок 2.3 – Схема проєктування дуги на екран

Порядок виконання роботи

1. Зібрати експериментальну установку, схема якої приведена на рис. 2.2.

2. Визначити ступінь збільшення, для чого:

а) включити джерело живлення, встановити за допомогою баластного реостата заданий струм короткого замикання, запалити дугу прямої полярності (перемикач Q знаходиться в положенні «п») з вугільним електродом; дуга збуджується замиканням електрода і пластина допоміжним вугільним електродом;

б) користуючись щитком із лінзою, спроектувати дугу на екран, домогтися чіткості зображення зміною відстані між дугою, лінзою і екраном;

в) виміряти діаметр проєкції електрода на екрані;

г) погасити дугу і виміряти діаметр електрода;

д) розрахувати ступінь збільшення:

$$K = \frac{\text{Діаметр проєкції електрода}}{\text{Діаметр електрода}}$$

3. Порушити дугу при мінімально можливому струмі, зробити замальовку дуги і необхідні вимірювання відповідно до п. 2 робочого завдання. Одночасно з вимірюванням довжини дуги зафіксувати показання вимірювальних приладів. Діаметр стовпа визначити в п'яти різних поперечних перетинах. Проаналізувати отримані дані і результати звести в табл. 2.1.

4. Повторити п. 3 при струмі дуги, що дорівнює 180–200 А, і результати звести в табл. 2.1.

5. Встановити довжину розрядного проміжку приблизно 2 мм. Порушити дугу прямої полярності між вугільними електродами при мінімально можливому струмі. Після встановлення дугового розряду визначити справжню довжину дуги (за допомогою проєкції дуги на екран) і зафіксувати покази приладів. Результати вимірювань внести в табл. 2.2.

Таблиця 2.1 – Розміри зон дугового розряду

Електроди		Струм дуги $I_{зв}$, А	Напруга дуги U_d , В	Довжина дуги L_d , мм	Діаметр, мм			Полярність
					анодної плями	катодної плями	стовпа дуги	

Таблиця 2.2 – Визначення довжини дуги

Електроди		Довжина дуги L_d , мм	Напруга дуги U_d , В	Струм дуги $I_{зв}$, А
+	-			

Для досліджень і практичного застосування надзвичайно важлива вольт-амперна характеристика дуги $U_d = f(I_{зв}, L_d)$ (рис. 2.4).

Вольт-амперна характеристика показує, що дуга як вид газового розряду є нелінійним елементом електричного кола, опір якого залежить від величини струму, що протікає.

Сфери застосування дуги досить великі, різні умови її існування і, звичайно, різні її характеристики. На рис. 2.4 зображена якась «середня» характеристика дуги зі сталевими електродними. У характеристиці можна умовно розрізнити три ділянки: А, В і С.

На ділянці А динамічний опір дуги $K_{ом} = \frac{\partial U_d}{\partial I_{зв}} < 0$, на ділянці В – $K_{дт} = 0$, на ділянці С – $K_{дт} > 0$.

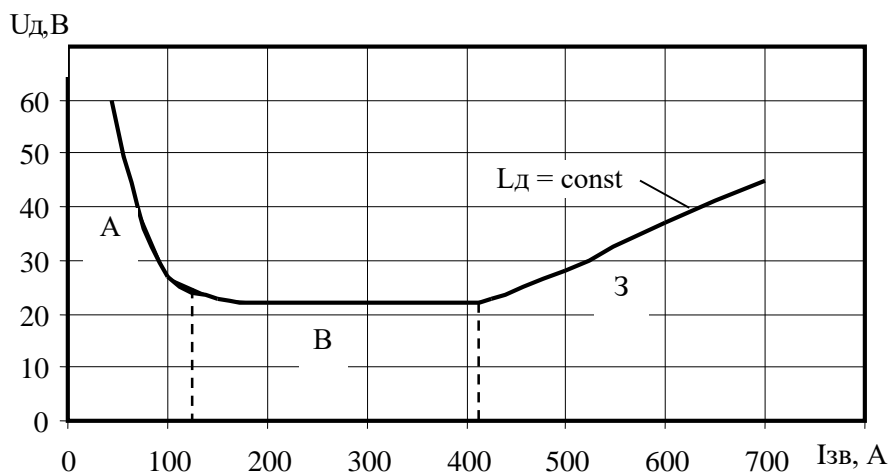


Рисунок 2.4 – Вольт-амперна характеристика зварювальної дуги

При заданій довжині дуги L_d можливо нескінченна кількість варіантів дугового розряду, які відрізняються напругою дуги, температурою газу, діаметром стовпа, розмірами електродних плям та інше. Однак досвід показує, що при заданих умовах встановлюється один, цілком певний стаціонарний режим дугового розряду. За аналогією з багатьма іншими енергетичними процесами вважають, що дуговий розряд підпорядковується «принципом мінімуму», тобто протікає при мінімальній енергії. Оскільки потужність розряду і величина струму задані, то мінімальна потужність досягається при найменшому значенні напруги дуги U_{\min} . З усього можливого різноманіття тільки цей варіант стійкий.

Складна залежність між параметрами дуги виражається різними емпіричними рівняннями. Одним з них є рівняння Г. Айртона, яке задовільно описує «падаючу» і «жорстку» гілки вольт-амперної характеристики дуги (ділянки А і В):

$$U_d = a + \epsilon L_d + \frac{c + dL_d}{I_{зв}}, \quad (2.2)$$

де a , b , c і d – постійні коефіцієнти.

Для «жорсткої» вольт-амперної статичної характеристики третій член рівняння (2.2), який залежить від струму дуги $I_{зв}$, обертається в нуль:

$$U_d = a + \epsilon L_d. \quad (2.3)$$

Зростальній ділянці кривої (рис. 2.4) рівняння Г. Айртона не підкоряється. Зростання напруги дуги U_d при збільшенні струму $I_{зв}$ ($K_{дг} > 0$) можна пояснити збільшенням щільності струму.

У відповідність з рис. 2.1 можна записати рівняння:

$$U_d = U_a + U_\epsilon + U_{ст} \quad (2.4)$$

Зіставляючи вирази (2.1), (2.3) і (2.4), можна усвідомити фізичний зміст коефіцієнтів рівняння (2.2). Коефіцієнт a , вочевидь, являє собою суму катодного і анодного падіння напруг для дуги з $K_{дг} = 0$, тобто

$$a = U_\kappa + U_a \quad (2.5)$$

Для цього ж випадку коефіцієнт b є градієнт потенціалу в стовпі дуги, тобто $K_d = b$; $\frac{c}{I_{зв}}$ – змінна складова суми приелектродних падінь напруг, обумовлена значною часткою електростатичного емісії, яка зменшується в міру підвищення температури катодної плями; $\frac{d}{I_{зв}}$ – змінна складова граді-

ента потенціалу стовпа дуги, яка зменшується в міру збільшення провідності стовпа дуги.

Орієнтовні значення коефіцієнтів рівняння Г. Айртона наведені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Величина коефіцієнтів a , b , c і d (газове середовище – повітря)

Електроди		a, В	b, В/мм	c, Вт	d, Вт/мм
+	-				
Вугілля	Вугілля	30...38	2,0	11...12	10,5
Залізо	Вугілля	16	1,5	-	-
	Залізо	14...16	2,5	9...10	15,0
	З крейдяним покриттям	14...16	2,3	9...10	15,0
	Покриття УОНИ-13/45	16...18	2,8	9...10	15,0

6. Повторити п. 5 5...7 разів, щоразу збільшуючи ще на 10...20 А величину струму і на 1...3 мм первісну довжину розрядного проміжку.

7. За допомогою перемикача Q змінити полярність на зворотну та повторити пп. 5 і 6.

8. Замінити графітовий нижній електрод на металеву пластину і повторити пп. 5, 6 і 7.

Оброблення результатів експерименту

1. Визначити коефіцієнти рівняння Г. Айртона.

2. Проаналізувати і дати графічну інтерпретацію отриманих рівнянь $U_d = f(I_{зв}, L_d)$. При проведенні аналізу слід звернути увагу на вплив середовища, в якій горить дуга, і матеріалу електродів на значення коефіцієнтів рівняння Г. Айртона.

3. Розрахувати динамічний опір дуги:

$$K = \frac{\partial U_d}{\partial I_{зв}}$$

Контрольні питання

1. Що називається зварювальної дугою?
2. Будова дугового розряду. Характерні ділянки і зони.
3. Що називають довжиною дуги?
4. Процеси, що протікають в приелектродних ділянках. Температура активних плям.

5. Процеси, які відбуваються в стовпі дуги. Градієнт потенціалу стовпа дуги. Температура стовпа дуги. Фактори, що сприяють підвищенню температури стовпа дуги.

6. Класифікація дугових розрядів.

7. Вольт-амперна статична характеристика зварювальної дуги.

8. Фізичний сенс коефіцієнтів рівняння Г. Айртона.

9. Які ознаки відрізняють одну зварювальну дугу від іншої?

10. Як пов'язані між собою напруга дуги, зварювальний струм і довжина дуги?

3 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВЗАЄМОДІЇ МАГНІТНИХ ПОЛІВ З ЕЛЕКТРИЧНОЮ ЗВАРЮВАЛЬНОЮ ДУГОЮ

Мета роботи: експериментальне дослідження зварювальної дуги як провідника струму і визначення факторів, що впливають на форму зварювальної дуги.

Короткі теоретичні відомості

Стовп зварювальної дуги містить вільні електрони, іони й електрично нейтральні частинки. Завдяки наявності в дузі заряджених частинок (електронів та іонів), що рухаються в певних напрямках, стовп дуги може розглядатися як гнучкий провідник, по якому проходить електричний струм. Тому магнітне поле, створюване струмом самої дуги, або стороннє магнітне поле робить досить помітний вплив на дугу, викликаючи переміщення або зміну форми останньої. Таке явище називають магнітним дуттям. Якщо розглядати дугу в магнітному полі як гнучкий провідник зі струмом, то сили, які рухають дугу, можна виразити у вигляді:

$$F = \alpha \cdot B \cdot I_{зв} \cdot l$$

де B – магнітна індукція;

$I_{зв}$ – струм дуги;

l – довжина дуги;

α – коефіцієнт пропорційності.

Під впливом магнітного поля зварювальна дуга відхиляється в бік найменшого згущення магнітних силових ліній. Крім того, магнітне поле впливає на характер переміщення заряджених частинок в самій дузі.

На зварювальну дугу можуть впливати сторонні поздовжнє або поперечне магнітні поля, а також власне магнітне поле дуги. Електрична дуга під впливом власного магнітного поля буде відхилятися від місця підключення до виробу струмопідводу в сторону розрядження магнітних силових ліній в залежності від місця підключення (рис. 3.1).

Кут нахилу електрода до поверхні зварюваного металу також впливає на величину відхилення стовпа дуги. Чим більше кут нахилу, тим сильніше дуга відхиляється в сторону, протилежну нахилу електрода (рис. 3.2).

Поперечне магнітне поле направлено перпендикулярно осі дуги, що призводить до відхилення дуги, зміни її форми і довжини. Якщо магнітне поле буде досить сильним, то дуга може обірватися.

Напрямок відхилення дуги в поперечному полі можна визначити правилом лівої руки (рис. 3.3).

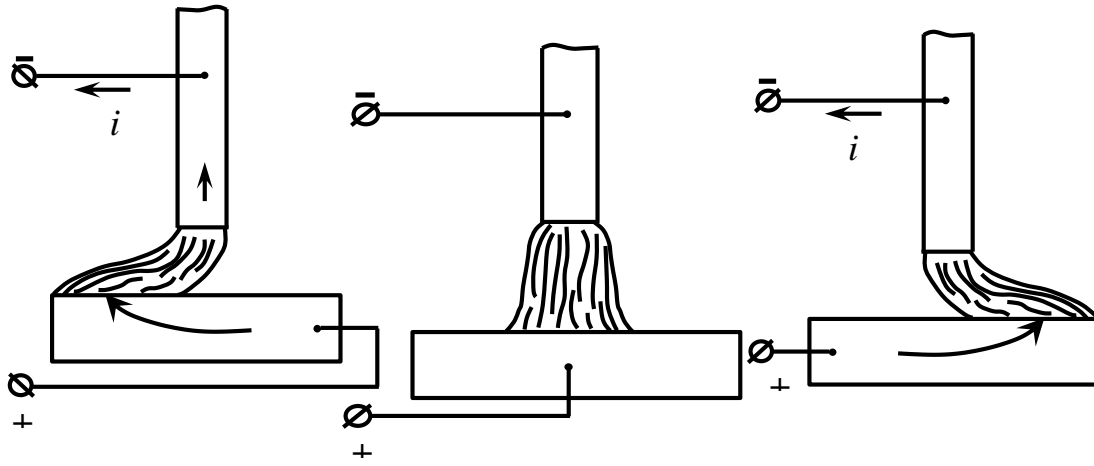


Рисунок 3.1 – Вплив струмопідводу на відхилення дуги (магнітне дуття)

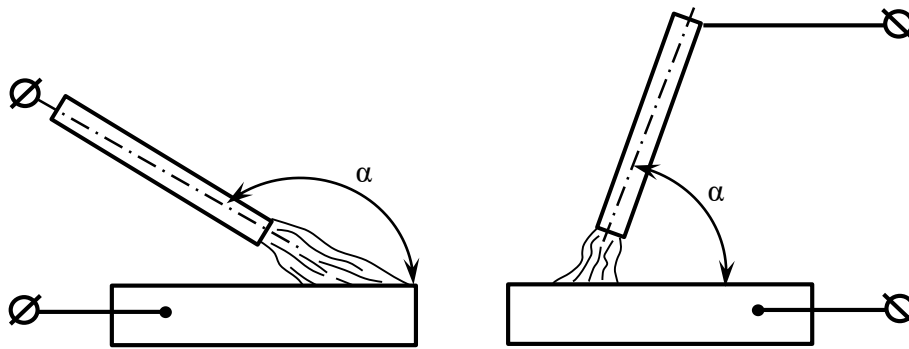


Рисунок 3.2 – Вплив кута нахилу електрода на відхилення дуги

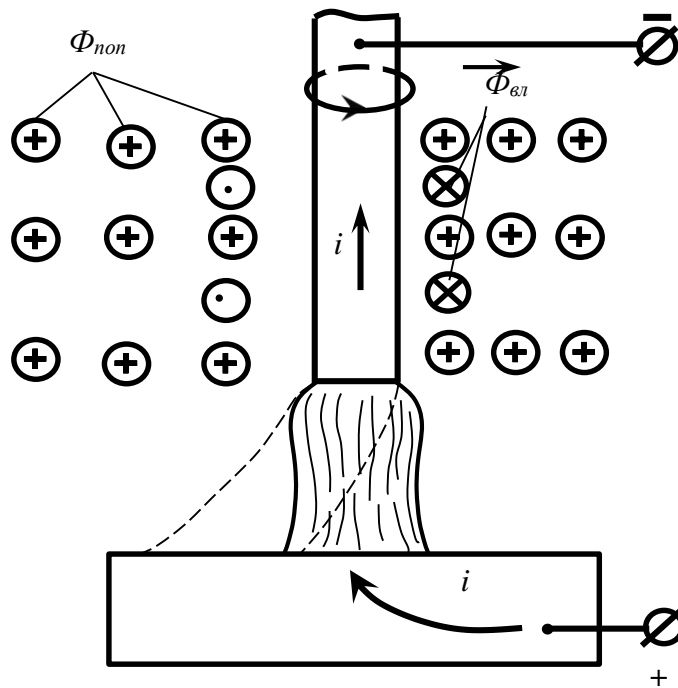


Рисунок 3.3 – Поперечне магнітне поле і дуга

Поздовжнє магнітне поле збігається з напрямком електричного поля дуги і направлено паралельно осі дуги. Таке магнітне поле не впливає на заряджені частинки, які рухаються в напрямку електричного поля. При русі в радіальному напрямку заряджені частинки перетинають магнітне поле, яке взаємодіє з ними, створює силу, перпендикулярну подовжньому магнітному полю дуги і напрямку руху частинки.

Під дією цієї сили заряджені частинки, які дифундують до периферії, придуть в обертальний рух. При цьому напрямок руху буде залежати від знаку заряду частинки (електрони і позитивні іони будуть обертатися в протилежні сторони). Дія електричного поля вводить осьову складову. Тому заряджені частинки при спільній дії поздовжнього магнітного й електричного полів рухаються по спіралі, доцентрова сила, яка виникає при цьому, відтягує стовп дуги до вертикальної осі (рис. 3.4).

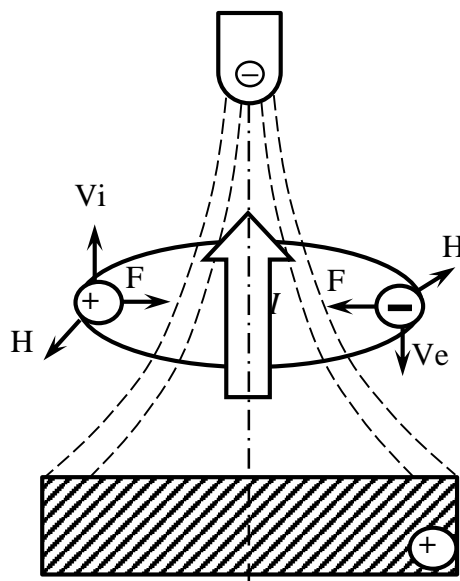


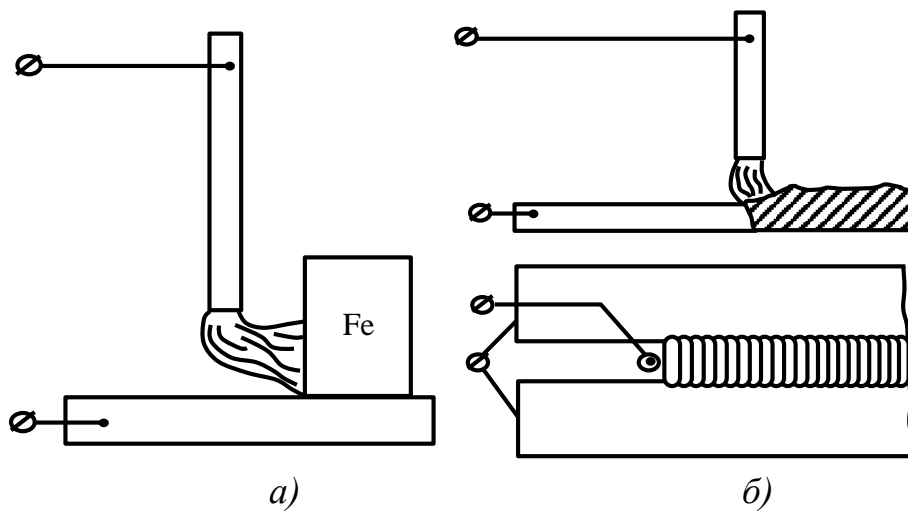
Рисунок 3.4 – Дія електромагнітних сил на елементарні заряджені частинки плазми – іон і електрон

Дія феромагнітних мас на відхилення дуги обумовлена тим, що магнітна проникність їх у тисячі разів більше магнітної проникності повітря, а магнітні силові лінії прагнуть замкнутися шляхом найменшого опору. Концентричне магнітне поле навколо дуги спотвориться, і вона виявляється притиснутою до феромагнітного тіла (рис. 3.5, а).

З явищем магнітного дуття зварювальники стикаються при зварюванні кутових і стикових швів, коли дуга під впливом сталевих стінок і кромek відхиляється в їх сторону й ускладнює процес зварювання (рис. 3.5, б).

У разі зварювання на змінному струмі магнітне дуття буде значно меншим або зовсім непомітним. Це відбувається з тієї причини, що магнітний потік дуги, який змінюється за величиною і напрямком, пронизує фе-

ромагнітну масу, наводить у ній вихрові струми, що створюють власне магнітне поле, спрямоване проти магнітного поля зварювального струму.



*а – вплив феромагнітного тіла;
б – вплив сталевих кромок на відхилення дуги*

Рисунок 3.5 – Вплив феромагнітних мас на відхилення дуги

Заходи боротьби з магнітним дуттям:

- а) вибір відповідного місця підключення струмопідводу до виробу або застосування рухомого струмопідводу;
- б) підведення струму в декількох точках;
- в) застосування заспокійливих соленоїдів з поздовжнім напрямком магнітного поля;
- г) нахил електрода в сторону «здування» дуги;
- д) розміщення феромагнітного матеріалу поблизу дуги;
- е) застосування для зварювання змінного струму.

Робоче завдання

1. Оволодіти методикою експериментальної оцінки впливу на зварювальну дугу феромагнітних мас.
2. Вивчити вплив поперечного та поздовжнього магнітних полів на зварювальну дугу.

Обладнання, пристрої та матеріали

1. Зварювальний пост постійного струму; зварювальний пост змінного струму.
2. Соленоїд для створення поперечного магнітного поля; соленоїд для створення поздовжнього магнітного поля.
3. Сталевий брусок розміром 100 × 100 × 150 мм.

4. Вугільні або графітові електроди; вугільні або графітові пластини розміром $100 \times 100 \times 20$ мм.

5. Набір ручного інструменту зварника; зварювальний столик із кронштейнами.

Порядок виконання роботи

1. Вивчити форму зварювальної дуги між електродом і вугільною пластиною при різних її положеннях відносно струмопідводу.

2. Вивчити форму зварювальної дуги при різних кутах нахилу вугільного електрода щодо вугільної пластини ($\alpha = 75, 60, 45^\circ$).

3. Вивчити вплив стороннього поперечного магнітного поля на зварювальну дугу. При проведенні досліду змінювати напрямок магнітного поля магніту.

4. Вивчити вплив поздовжнього магнітного поля соленоїда на зварювальну дугу.

5. Вивчити форму зварювальної дуги поблизу феромагнітних мас.

Досліди 1–5 необхідно провести на постійному струмі прямої полярності і повторити їх при використанні джерела живлення дуги змінного струму.

При проведенні експериментів необхідно усвідомити сутність явищ, що відбуваються з дугою, і ескізно зобразити розташування дуги між електродом і пластиною.

Контрольні питання

1. Що таке електрична дуга?
2. Яку будову має електрична дуга?
3. Як впливає на дугу місце підключення до виробу струмопідводу?
4. Як впливає на дугу кут нахилу електрода до поверхні зварюваного металу?
5. Як впливає на дугу поперечне магнітне поле?
6. Як визначити напрямок відхилення дуги в магнітному полі?
7. Як впливає на дугу поздовжнє магнітне поле?
6. Як впливає на дугу наявність феромагнітних мас?
9. Перерахуйте заходи боротьби з магнітним дуттям.

4 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВОЛОГОСТІ ЕЛЕКТРОДІВ НА ВМІСТ ВОДНЮ У НАПЛАВЛЕНОМУ МЕТАЛІ

Мета роботи: вивчення впливу вологості зварювальних матеріалів (флюси, захисні гази, електродні покриття) на утримання дифузійного водню в металі шва зварних з'єднань, вивчення способів визначення дифузійного водню в металі шва зварних з'єднань; оволодіння методикою визначення водню в пробах.

Короткі теоретичні відомості

Студенти повинні знати, що водень є шкідливою домішкою в металах, який погіршує пластичність зварних з'єднань і сприяє утворенню пор, флокенів і тріщин в металі шва і в зоні термічного впливу. Встановлено, що в розплавленому залізі і його сплавах водень може існувати в кількох формах: атомарний, молекулярний і в складі гідридів при легуванні титаном і ніобієм. Рівноважна концентрація водню в розплавленому залізі, яке контактує з молекулярним і атомарним воднем, пропорційна квадратному кореню з його парціального тиску:

$$S_H = K_H \sqrt{P_{H/H_2}^{1+\alpha}}$$

де K_H – константа розчинності;

α – ступінь дисоціації водню при даній температурі;

P_H і P_{H_2} – парціальний тиск атомарного і молекулярного водню.

Константа розчинності водню K_H також залежить від температури і складу сталі. Розчинність водню, розрахована за цих умов при різних температурах, показана на рис. 4.1.

У твердому залізі при температурі плавлення розчинність водню становить 13,5...14,5 см³/100 г.

Максимальна розчинність водню в залізі (42 см³/100 г) спостерігається при 2400...2500 °С, подальше підвищення температури призводить до інтенсивного випаровування заліза і зниження розчинності водню в ньому аж до точки кипіння (рис. 4.1).

Умови зварювання, склад і властивості зварювальних матеріалів значно впливають на кінцевий вміст водню в металі, склад атмосфери дуги, кінетику плавлення електродного металу і умови тверднення зварювальної ванни.

Основними джерелами водню є волога й органічні компоненти покриттів (флюсів, газів), забруднення, іржа, окалина на поверхні деталей, що зварюються. При зварюванні високолегованих сталей значна кількість водню може вноситися в зону зварювання зварювальним дротом.

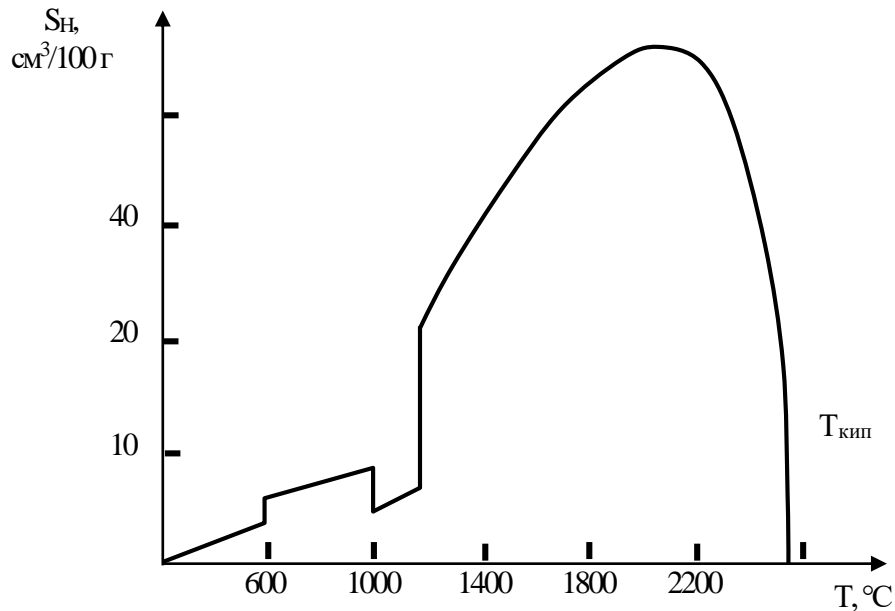


Рисунок 4.1 – Постійна концентрації водню

У реальних умовах зварювання відбуваються одночасно процеси адсорбції і десорбції водню металом зварювальної ванни. Швидкість адсорбції водню з атмосфери дуги значно вище швидкості десорбції з ванни в холодній її частині і збільшується з підвищенням сили струму. При струменевому перенесенні металу температура крапель наближається до температури кипіння, при цьому парціальний тиск водню в краплях зменшується. Внаслідок цього концентрація водню в краплях зменшується, незважаючи на більш високий вміст водню в газовій суміші.

Великий вплив на процес адсорбції водню надає рід струму і полярність. При зварюванні на змінному струмі вміст водню в металі шва значно більше, ніж на постійному. Вміст водню в металі, наплавленому на прямій полярності, як правило, вище, ніж при зворотній.

На перерозподіл водню між зварювальною ванною і металом, який закристалізувався, вирішальний вплив надає швидкість кристалізації. Мала швидкість сприяє активній десорбції водню, у результаті цього його вміст у металі шва різко знижується; великі швидкості гальмують процеси десорбції водню, і в металі шва залишається його високий вміст. Зі збільшенням швидкості кристалізації підвищується ймовірність утворення пор у металі шва. Пористість у затверділому металі визначається тим, що під час кристалізації між швидко зростаючими кристалами можуть виникати порожнини рідкої фази, пересичені воднем і обмежені твердою фазою, яка вже виникла.

Загальний вміст водню за стадіями виділення можна представити у вигляді трьох складових:

$$[H]_{\Sigma} = [H]_{кр} + [H]_{диф} + [H]_{зал},$$

де $[H]_{кр}$ – водень, який виділяється при охолодженні і кристалізації рідкої зварювальної ванни;

$[H]_{диф}$ – водень, який виділяється з затверділого металу шляхом дифузії;

$[H]_{зал}$ – залишковий водень.

Характер зміни кількості водню, що виділяється з наплавленого металу при кімнатній температурі в часі, графічно показаний на рис. 4.2.

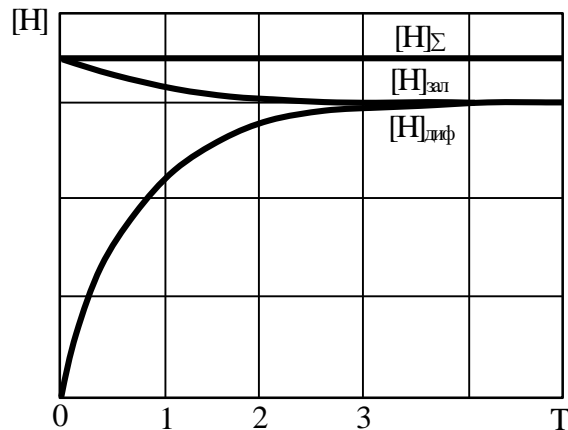


Рисунок 4.2 – Виділення водню з наплавленого металу

Водень, розчинений в наплавленому металі і впроваджений в зону термічного впливу зварних з'єднань безпосередньо після зварювання, може різко змінити механічні властивості з'єднань, викликати виникнення водневої крихкості, яка полягає в зниженні пластичних властивостей сталі і її опірності крихкому руйнуванню.

Найбільш поширеними дефектами зварних з'єднань, обумовлених водневою крихкістю, є флокени і холодні тріщини.

Флокени – волосяні тріщини в сталі, зазвичай проявляються на шліфованих поверхнях макрошліфов після травлення. Уражена флокенами сталь має в зламі плями сріблястого кольору. Ці тріщини розвиваються в низьковуглецевих з'єднаннях нижче 500 °С і є наслідком надмірної концентрації водню в кількості, критичному для даного складу сталі, умов охолодження і напруженого стану з'єднань, які охолоджуються.

Холодні тріщини – це дефект зварювання високоміцних сталей, який з'являється в навколошовній зоні зварних з'єднань при охолодженні до 200 °С або незабаром після охолодження шва до кімнатної температури. Поява холодних тріщин зумовлена загальною дією структурних напружень, підвищеною кількістю водню в навколошовній зоні й наявністю залишкових зварювальних напружень.

У даній лабораторній роботі для вивчення впливу стану зварювальних матеріалів на вміст водню в металі шва використовується методика ви-

значення дифузійного водню $[H]_{\text{диф}}$ в пробі металу, отриманій наплавленням на плоский зразок будь-яким типом зварювання – автоматичним під флюсом, напівавтоматичним у захисних газах та ручним (рис. 4.3) наплавленням вологими (1) і прожареними (2) електродами.

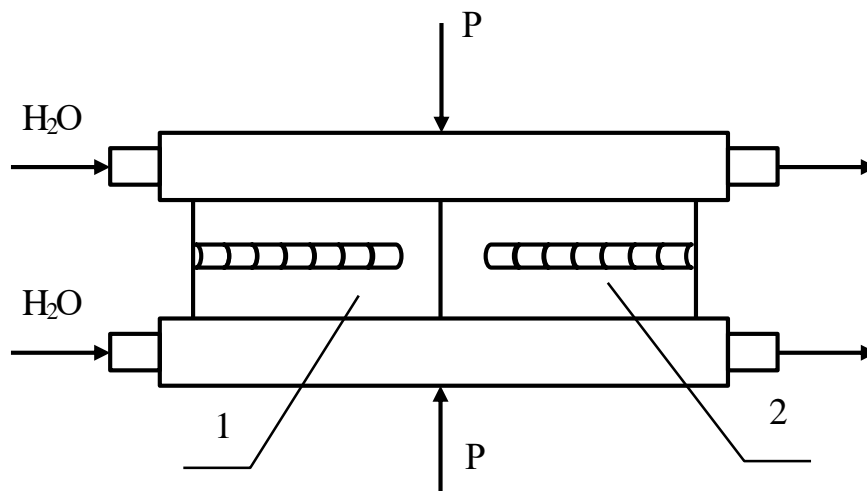


Рисунок 4.3 – Зразок наплавленого металу

Наплавлений зразок має розміри $5 \times 10 \times 60$ мм. Його застосування для оцінки насичення воднем зварних з'єднань при зварюванні має більш високі показники кількості зафіксованого в ньому водню в порівнянні з застосуванням зразків, отриманих відсмоктуванням рідкого металу зі зварювальної ванни в кварцову трубку або виливанням його в мідну виливницю. Це пояснюється значним впливом на кількість зафіксованого в зразку водню умов кристалізації металу, відібраного для аналізу, і його вільної питомої поверхні.

Отримана таким чином кількість $[H]_{\text{диф}}$ дозволяє орієнтовно оцінити загальний вміст водню в металі шва і контролювати якість зварювальних матеріалів і умов зварювання з метою зменшення можливості утворення водневої крихкості зварних з'єднань.

Наплавлена проба після наплавлення негайно охолоджується у воді до температури $15...20$ °С, потім очищується від шлаків, занурюється у ванну з гліцерином і розміщується в скляній колбі з гліцерином (рис. 4.4), в якій зразок витримується протягом 72 годин. При цьому в пробірці змінюється висота газового стовпа (весь газ, який виділився, вважається воднем), після чого «олівцеві» проби беруть із пробірок і зважують з точністю до десятих часток грама.

Кількість водню в пробірці:

$$[H_{\text{диф}}] = \frac{V_0}{P_{\text{н.м}}} \times 100$$

де $[H]_{\text{диф}}$ – вміст водню, $\text{см}^3/100 \text{ г}$;
 V_0 – обсяг газу в пробірці, см^3 ;
 $P_{\text{н.м.}}$ – маса наплавленого металу, г.

$$P_{\text{н.м.}} = P_{\text{зр}} - P_{\text{п}}$$

де $P_{\text{зр}}$ – маса пластини з наплавленим валиком, г;
 $P_{\text{п}}$ – маса пластини до наплавлення, г.

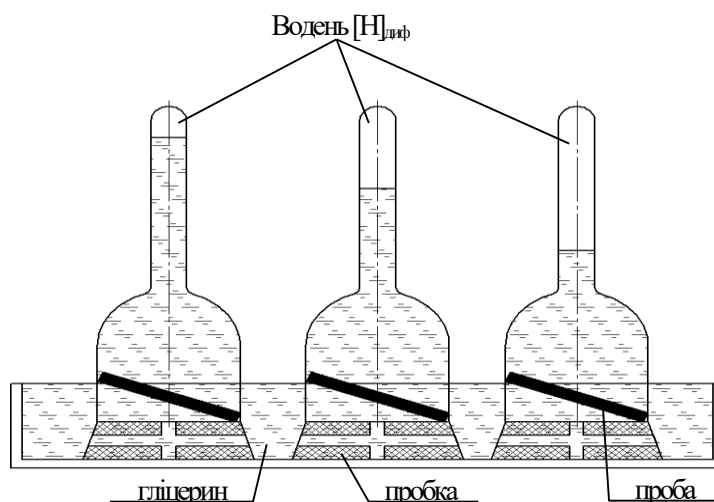


Рисунок 4.4 – Скляна пробірка з гліцерином

Існують також інші засоби визначення вмісту $[H]_{\text{диф}}$: ртутно-вакуумний і хроматографічний методи. Найбільш прийнятним у провадженні відносно точності, безпеки і часу проведення є хроматографічний метод.

Обладнання, пристрої та матеріали

1. Зварювальної автомат; мідні лещата, що охолоджуються водою; сталеві пластини.
2. Ванночка зі скляними пробірками; гліцерин; ваги аналітичні; секундомір.

Порядок виконання робіт

1. Встановити пластини в мідні охолоджувані лещата.
2. Підготувати електроди з різним ступенем вологості (вологі – оброблені водою, нормальні і прожарені) і виконати кожним електродом наплавлення валика на пластину.
3. Після зварювання наплавлені проби витягти з мідних лещат і охолодити у воді до кімнатної температури.

4. Наплавлену пробу очистити від шлаку, занурити в ванночку з гліцерином і помістити в пробірку з гліцерином.
5. Ванну з пробірками встановити так, щоб температура гліцерину була в межах 5...18 °С.
6. Пробірки з пробами витримати протягом 72 годин і виміряти висоту газового стовпця мірної частини пробірок.
7. Проби витягти з пробірок і зважити їх з точністю до десятих часток грама.
8. За формулою визначити кількість дифузійного водню в наплавленому металі.
9. Проаналізувати отримані результати за змістом дифузійного водню в пробах і зробити висновки.

Контрольні питання

1. Як впливає водень на працездатність зварних з'єднань?
2. Як водень адсорбується металом шва при зварюванні?
3. Як впливають умови зварювання і стан зварювальних матеріалів на вміст водню у зварних з'єднаннях?
4. Які дефекти зварних з'єднань викликає вміст водню в швах?
5. Поясніть, чому при оцінці впливу стану зварювальних матеріалів на вміст водню у зварних швах в якості показника беруть не сумарний водень, а дифузний?

5 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 5 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗВАРЮВАЛЬНОЇ ДУГИ

Мета роботи: експериментально вивчити ефективну теплову потужність зварювальної дуги і освоїти калориметричний метод дослідження ефективності різних джерел теплоти.

Загальні вказівки

Тільки деяка частина енергії, витрачена при зварюванні з використанням зовнішнього джерела енергії, яким є зварювальний дуга, вводиться в метал.

Кількість теплоти, введеної в метал в одиницю часу – це і є ефективна теплова потужність зварювального джерела теплоти (дуги, електронного або світлового променя і інші). Відношення ефективної теплової потужності до всієї потужності, витраченої на зварювання, називається ефективним коефіцієнтом корисної дії джерела:

$$\eta_{\epsilon} = \frac{q_{\epsilon}}{U_{\text{д}} I_{\text{зв}}} \quad , \quad (5.1)$$

де q_{ϵ} – ефективна теплова потужність, Вт;

$U_{\text{д}}$ – напруга дуги, В;

$I_{\text{зв}}$ – струм дуги, А.

Ефективний ККД є стійкою характеристикою для кожного процесу й умов його здійснення. Зазвичай для визначення ККД користуються калориметричним методом, але при цьому розраховують η_{ϵ} і q_{ϵ} як середні величини всього процесу, у той час як в процесі зварювання або наплавлення ці величини можуть певним чином змінюватися. Наприклад, якщо деталь нагрівається теплом зварювального джерела, то її здатність до поглинання тепла з часом знижується і, природно, падає ефективний ККД процесу.

Зміна кількості тепла, що надходить у метал за одиницю часу, призводить до нерівномірності властивостей зварного з'єднання, різної реакції зварюваних металів на нагрівання у різні моменти часу. У зв'язку з цим регулювання ефективної потужності в різні періоди зварювання є надзвичайно важливим питанням, оскільки від його правильного вирішення залежить стабільність властивостей зварних з'єднань у різні періоди процесу зварювання.

При безперервно діючому нерухомому джерелі температура різних точок тіла змінюється, наближаючись до граничного стану. У зв'язку з цим і ефективний ККД прагне до якогось сталого значення.

Робоче завдання

Визначити ефективну теплову потужність q_v й ефективний ККД нагріву η_v при наплавленні валика на пластину металевими електродами з різними покриттями (іонізуючим, якісним – основного і рутилового типу).

Примітка. Конкретне завдання і обсяг виконуваної роботи визначає викладач.

Устаткування, прилади, матеріали

1. Калориметрична установка; підставка під зразки в калориметричному посуді; столик для зварювання під зразок; секундомір; пост ручного дугового зварювання з вимірювальними приладами; ваги з важками, термометр.

2. Зразки-пластини розміром $(6...10) \times (80...100) \times (160...200)$ мм з маловуглецевої сталі (з хвостовиками); електроди: металевий з іонізуювальним покриттям, якісні – з покриттям основного і рутилового типу (діаметр електродів – 4 мм); запас води, що має температуру приміщення, у кількості 10...12 л.

Вивчення роботи експериментальної установки

Основним вузлом експериментальної установки є калориметр (рис. 5.1).

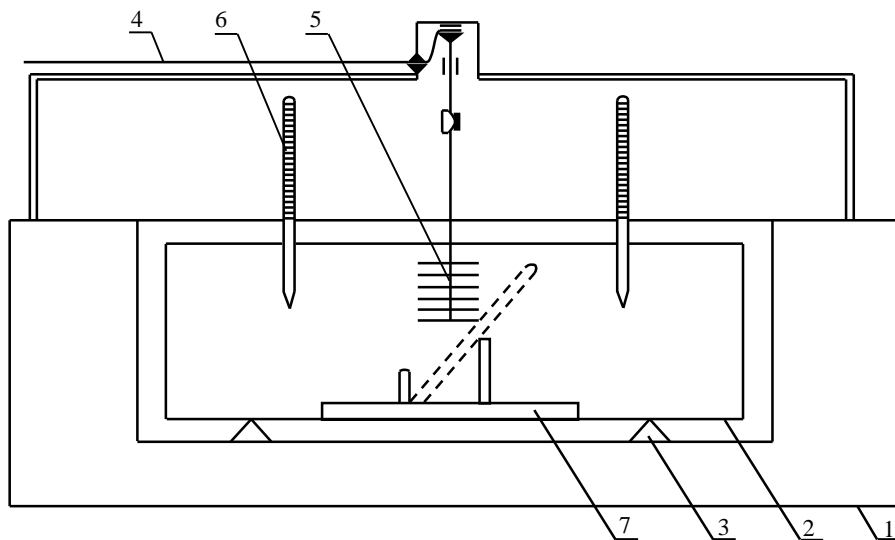


Рисунок 5.1 – Схема калориметричного дослідження

Калориметр складається з зовнішнього корпусу 1 із подвійними стінками, простір між якими заповнено водою, і калориметричної судини 2, встановленої всередині корпусу на теплоізолюючій підставці 3. Корпус і судина виготовлені з латуні, нікельовані і ретельно відполіровані для

зменшення тепловіддачі. Над корпусом на стійках поміщений кривошипний механізм 4 для приводу мішалки 5, розташованої усередині калориметричної судини. Температура води всередині корпусу вимірюється термометром 6, вставленим в отвір корпусу.

Під час проведення наплавлення зразок-пластина 1 (рис. 5.2) з хвостовиком 2 повинна бути встановлена на підставку 3, обклеєну теплоізоляційним матеріалом 4. Зворотний дріт підводиться до зразка за допомогою механічного затискача електродотримача.

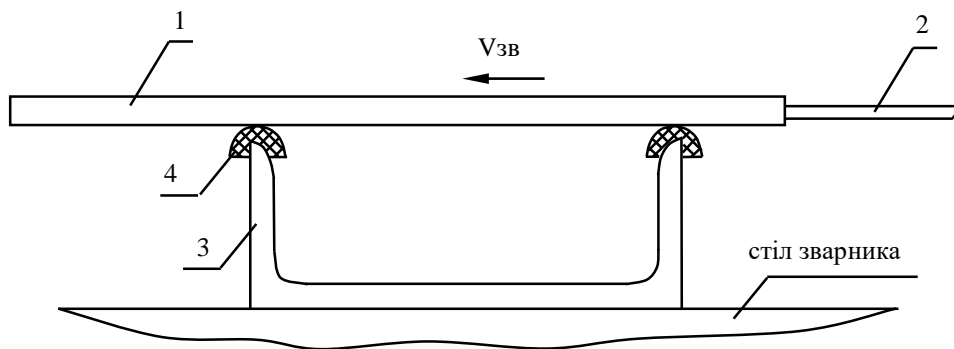


Рисунок 5.2 – Схема проведення наплавлення

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з калориметром і підготувати його до роботи:

а) вийняти калориметричну судину, помістити на її дно підставку 7 під зразок (див. рис. 5.1);

б) наповнити судину водою, що має температуру приміщення (рівень води – нижній край верхньої заклепки ручки калориметричної судини); визначити масу води і надалі підтримувати її постійною;

в) встановити судину в корпус калориметра на підставку 3 (див. рис. 5.2) так, щоб висока частина підставки 7 (див. рис. 5.1) під зразок була справа; щілина повинна бути перпендикулярна краю столу (рис. 5.3).

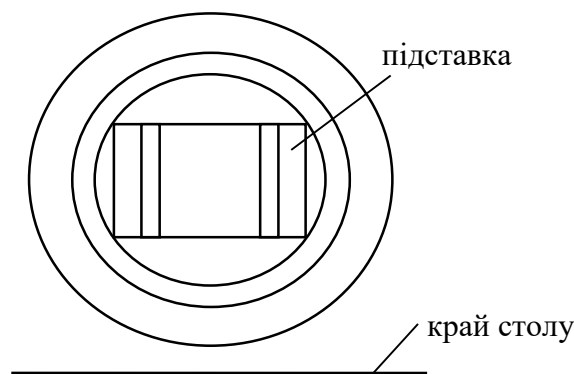


Рисунок 5.3 – Схема розташування підставки під зразок у калориметричній судині

г) занурити в воду мішалку 5 (див. рис. 5.1) вирізами вправо і з'єднати її з приводом 4 так, щоб при роботі останнього мішалка не торкалася дна посудини, стінок і підставки під зразок; верхнє кільце мішалки не повинно виходити на поверхню води, щоб уникнути її розплескування; перевірити роботу мішалки;

д) встановити калориметричний термометр, пропустивши його через отвір у верхній кришці при відтиснутому затиску; відпустити затиск і перевірити хід мішалки; після 1...2 хв роботи мішалки зафіксувати покази термометра з точністю до 0,1 °С.

2. Встановити зразок-пластину на підставку для наплавлення (рис. 5.2). Провести наплавлення або нагрів зразка протягом 10...20 с. Час наплавлення (нагрівання) вибирається з таким розрахунком, щоб отримати тепломісткість зразка близько 25...40 кДж. Оскільки режим наплавлення відомий (задається викладачем і попередньо перевіряється на сторонній пластині), то час наплавлення (нагрівання) можна визначити з співвідношення

$$\tau_2 = \frac{(25...40) \cdot 10^3}{\eta'_v U_d I_{зв}}$$

де η'_v – орієнтовне значення ефективного ККД нагріву виробу дугою, вибирається на підставі даних табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Значення η_v при дуговому зварюванні

Різновид процесу дугового зварювання	Зварювання неплавким електродом	Зварювання плавким електродом			
		РДЗ, електроди з іонізуючим покриттям	РДЗ, електроди якісні	Під флюсом	У вуглекислому газі
Величина η_v	0,45...0,60	0,65...0,75	0,75...0,85	0,75...0,90	0,7...0,92

Після закінчення наплавлення (нагрівання) фіксуються середні значення струму $I_{зв}$ і напруги дуги U_d , а також час наплавлення – горіння дуги τ_r .

3. Як тільки наплавлення закінчено, швидко, але обережно, взяти зразок за хвостовик і занурити в калориметричну судину так, щоб нижній край зразка увійшов в щілину підставки (див. рис. 5.1).

Безпосередньо перед зануренням зразка мішалку зупинити, зразок встановити так, щоб він не заважав роботі мішалки, і негайно включити мішалку.

Примітка. При зануренні зразка оберегати від пошкоджень термометр і мішалку.

Після занурення зразка потрібно уважно стежити за показами термометра: спочатку неозброєним оком, потім через лупу. Провести відлік максимальної температури з точністю до 0,1 °С.

4. Максимальна температура зазвичай встановлюється через 20...40 секунд після занурення зразка. Після досягнення сталої температури зупинити мішалку і вийняти термометр. Зразок витягти, висушити і зважити (без шлаку). Розрахувати масу не зануреної частини хвостовика (за розмірами), відняти від загальної маси зразка і зафіксувати масу зануреної частини зразка.

5. Результати, отримані при виконанні пп. 1...4 (температура води до і після дослідів T_0 і T_K ; температура зразка до наплавлення, яка дорівнює температурі повітря $T_{п}$; середнє значення струму $I_{зв}$ і напруги дуги $U_{д}$; час горіння дуги $\tau_{г}$; час перенесення зразка, тобто час, що минув від моменту закінчення наплавлення до моменту опускання зразка в калориметричну судину $\tau_{п}$, маса зразка m_3) повинні бути внесені в табл. 5.2.

Таблиця 5.2 – Результати експериментів

Електроди	№ дос- ліду	$I_{зв}$, А	$U_{д}$, В	$\tau_{г}$, с	$\tau_{п}$, с	$T_{к}$, К	$T_{п}$, К	T_0 , К	m_3 , г	$\eta_{в}$, Дж/с	$\eta_{в}$

6. Для кожного типу електрода дослід калориметрування (пп. 1...5) виконується тричі. При цьому слід зберігати масу води в калориметричній судині постійною (заповнюючи між дослідом втрати і випаровування води) і ретельно фіксувати зміни початкової температури. Якщо температура води в посудині перед зануренням зразка відрізняється від температури навколишнього середовища більше ніж на 5...7 °С, її слід змінити.

7. Відповідно з отриманим завданням пп. 1...6 повторюються для кожного типу електрода.

Примітки

1. Наплавлення ведуть вручну по осьовій лінії зразка уздовж його більшої сторони, починаючи і закінчуючи валик на відстані 10...15 мм від країв.

2. Для забезпечення сталості умов і точності дослідів при наплавленні зразків забезпечити по можливості:

- постійну швидкість переміщення дуги при наплавленні;
- дотримання сталості часу перенесення зразка в калориметричну судину після наплавлення в межах 1,5...2,5 с і вимір цього часу секундоміром;

- застосування чутливого термометра (типу термометра Бекмана) в тих випадках, коли підвищення температури води в калориметрі при зануренні зразка становить кілька десятих або сотих часток градуса.

Оброблення результатів експерименту

1. Вираз для розрахунку ефективної теплової потужності дуги отримаємо з рівняння теплового балансу:

$$Q = Q_k + Q_{\Delta} + Q_n + Q_{вт} = q_e \tau_z, \quad (5.2)$$

де τ_r – час горіння дуги, с;

Q – енергія, введена джерелом нагрівання (дугою) у зразок, Дж;

Q_k – енергія, що витрачається на нагрів води в калориметрі, Дж;

Q_{Δ} – енергія, яка визначається різницею теплоємності пластини-зразка до і після дослідів, Дж;

Q_n – енергія, що втрачається на випаровування при зануренні зразка в калориметр, Дж, визначається в залежності від потужності дуги (рис. 5.4);

$Q_{вт}$ – енергія, що втрачається в навколишнє середовище при нагріванні і перенесення зразка за рахунок конвекції і радіації, Дж.

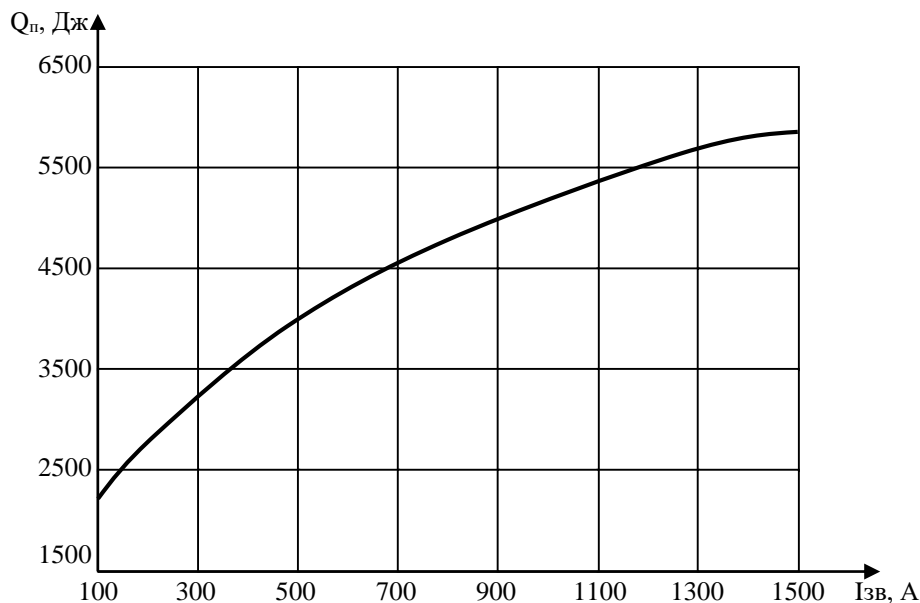


Рисунок 5.4 – Вплив зварювального струму $I_{зв}$ на втрати теплоти при випаровуванні Q_n

Таким чином, ефективна теплова потужність дуги визначається відношенням:

$$q_e = \frac{Q_k + Q_{\Delta} + Q_n + Q_{вт}}{\tau_z}. \quad (5.3)$$

2. Енергія, що витрачається на нагрів води в калориметрі Q_K , визначається за формулою:

$$Q_K = A(T_K - T_0), \quad (5.4)$$

де T_0 і T_K – температура, відповідно, до і після досліду;
 A – водний еквівалент калориметра, Дж/К,

$$A = c_B m_B + c_{K.C} m_{K.C} + c_M m_M + c_n m_n, \quad (5.5)$$

де $c_B, c_{K.C}, c_M, c_n$ – питомі теплоємності води, матеріалу калориметричної судини, мішалки і сталевій підставці під зразок, відповідно, Дж/(г·К);
 $c_B = 4,17$; $c_{K.C} = c_M = 0,38325$ (для латуні); $c_n = 0,46$;

$m_B, m_{K.C}, m_M, m_n$ – маси води в калориметрі, калориметричної судини, мішалки, підставці під зразок, відповідно, г; $m_{K.C} = 570$ г, $m_M = 275$ г, $m_n = 182$ г.

Маса води, що заповнює калориметричну судину до заданого рівня (нижній край верхньої заклепки), становить $m_B = 2\,870$ г.

3. Енергія, яка визначається різницею теплоємності пластини-зразка до і після досліду, Q_Δ :

$$Q_\Delta = c_3 m_3 (T_K - T_B), \quad (5.6)$$

де m_3 – маса зразка після наплавлення, г;

c_3 – питома теплоємність матеріалу зразка, Дж/(г·К), для маловуглецевої сталі $c_3 = 0,46$ Дж/(г·К);

T_B – температура зразка до досліду, що дорівнює температурі навколишнього повітря, К.

4. Втрати енергії в навколишнє середовище Q_{BT} визначаються як функція миттєвої теплоємності зразка, яке за час горіння дуги вважається зростаючим пропорційно величині τ_r , і за час перенесення зразка в калориметр τ_n для простоти підрахунків приймається постійним:

$$Q_{em} = bq_\delta \int_0^{\tau_2} t dt + bq_\delta \tau_2 \tau_n, \quad (5.7)$$

Після перетворень отримаємо:

$$Q_{em} = \frac{\alpha}{c\gamma\delta} q_\delta \tau_2 (\tau_2 + 2\tau_n),$$

де $b = \frac{2\alpha}{c\gamma\delta}$ – коефіцієнт, що враховує інтенсивність тепловіддачі в навколишнє середовище, 1/с;

α – коефіцієнт повної поверхневої тепловіддачі зразка, який дорівнює

$\alpha = 0,00418 \text{ Дж}/(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{К})$;

$c\gamma$ – об'ємна теплоємність металу зразка, яка для маловуглецевої сталі дорівнює $c\gamma = 5,434 \text{ Дж}/(\text{см}^3 \cdot \text{К})$;

δ – товщина зразка, см.

5. Втрати теплоти на випаровування $Q_{\text{п}}$ визначаються на підставі рис. 5.4.

6. Ефективний ККД нагріву виробу дугою $\eta_{\text{в}}$ визначається на підставі залежності (5.1).

7. Отримані результати вносяться в табл. 5.2.

Контрольні питання

1. Який тепловий баланс різних дугових джерел теплоти при зварюванні під флюсом, у захисних газах, штучними електродами, вугільною дугою?

2. Що називається загальною тепловою потужністю джерела тепла і як вона визначається?

3. Що називається ефективною тепловою потужністю джерела тепла?

4. Що називається ефективним ККД процесу нагріву?

5. Як провести вимірювання збільшення теплоємності тіла калориметричним методом?

6. Які втрати тепла є при проведенні досліду і як вони враховуються?

7. Як визначається ефективний ККД джерела?

8. Який вплив струму і напруги дуги на величину ефективного ККД процесу нагріву?

9. Чим пояснити відмінність у величині $\eta_{\text{в}}$ при зварюванні вугільним, штучними електродами, під флюсом і в вуглекислому газі плавким електродом?

6 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 6

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕЖИМУ ЗВАРЮВАННЯ НА ВЛАСТИВОСТІ МЕТАЛУ ШВА І НАВКОЛОШОВНОЇ ЗОНИ

Мета роботи: оволодіти методикою розрахунково-експериментального дослідження впливу термічного циклу зварювання на твердість різних зон зварного з'єднання.

Загальні вказівки

Студенти повинні знати, що вирішальним фактором у формуванні структури і властивостей зварних з'єднань, особливо з середньолегованих сталей, є швидкість охолодження. Охолодження металу з досить великими швидкостями сприяє отриманню нерівноважних структур. Зниження швидкості охолодження металу шва і навколошовної зони дозволяє уникнути утворення гартівних мартенситних структур, що характеризуються підвищеною твердістю, міцністю і низькою пластичністю, і забезпечити якісне зварне з'єднання.

Для будь-якої марки сталі можна побудувати експериментальну залежність твердості HRC (HB) від швидкості охолодження.

Робоче завдання

1. Вивчити залежність твердості навколошовної зони основного металу від технологічних факторів режиму зварювання.

2. Оволодіти методикою експериментального визначення залежності твердості від швидкості охолодження для даної марки сталі в умовах зварювального нагрівання.

3. Вивчити методику розрахункового визначення режиму зварювання для отримання заданої твердості.

Обладнання, пристрої та матеріали

1. Апарат для автоматичного зварювання під флюсом або у вуглекислому газі (за вказівкою викладача), обладнаний вимірювальними приладами, секундомір, верстат для різання зразків, шліфувальний верстат, робоче місце з витяжкою для травлення зразків, прилад для виміру твердості на шліфах.

2. Матеріали зварювальні: флюс марки АН-348А (вуглекислота), дріт зварювальний Св-08А діаметром 3 мм (Св-08Г2С діаметром 1,6 мм, або 2,0 мм), пластини з середньолегованої сталі розміром 200 × 150 × (15...20) мм у кількості 3 шт., реактив для травлення (3 %-й розчин HNO₃ спиртовий).

Опис лабораторної установки

При проведенні експериментів повинні бути використані зварювальне обладнання, реєстру вальні прилади, прилад для вимірювання твердості й інші, які за технічними характеристиками і класами точності відповідають вимогам, наведеним нижче.

Механізми подачі зварювальних головок повинні забезпечувати стабільну рівномірну швидкість подачі дроту. Допустимі коливання швидкості подачі не повинні перевищувати $\pm 5\%$. Аналогічні вимоги висувають і до швидкості переміщення зварювальної дуги.

Клас точності вимірювальних приладів – не нижче 1,5.

Перед виконанням експерименту необхідно переконатися в готовності апаратури. Для зварювання слід використовувати апарат із постійною швидкістю подачі (система автоматичного регулювання зварювальної дуги з саморегулюванням) і живленням від джерела з жорсткою або похило спадною зовнішньою характеристикою.

Порядок виконання роботи

1. На сторонній пластині підібрати режим зварювання, струм $I_{зв}$ і напругу U_d , близькі до максимальних для даного діаметра електрода. Визначити діапазон зміни швидкості зварювання $\vartheta_{зв}$, в якому забезпечується необхідне формування шва і встановити найменшу, середню і найбільшу швидкості.

2. Провести наплавлення першого валика при мінімальній швидкості зварювання на відстані 30...40 мм від краю пластини. Наплавленому валику дати охолонути до кімнатної температури на повітрі. При наплавленні слід якомога точніше зафіксувати режим зварювання. Результат внести в табл. 6.1. Після охолодження таврувати валик. Під час охолодження пластини повинна знаходитися на ізоляторі. Допускається примусове охолодження після того, як температура зразка знизиться до 550...600 К.

3. Повторити п. 2 на другій пластині, але після наплавлення зразок швидко опустити у воду. За рис. 6.1 визначити швидкість охолодження і занести в табл. 6.2.

4. Повторити п. 2 цього разу для третьої пластині, попередньо підігрівши її в печі до температури 493...523 К. Охолодження після наплавлення вести на повітрі.

5. Другий валик (на середній швидкості зварювання) наплавляється на відстані 30...40 мм від протилежного краю першої пластини.

6. Наплавити другий валик (на середній швидкості зварювання) на другу пластину. Охолодження у воді.

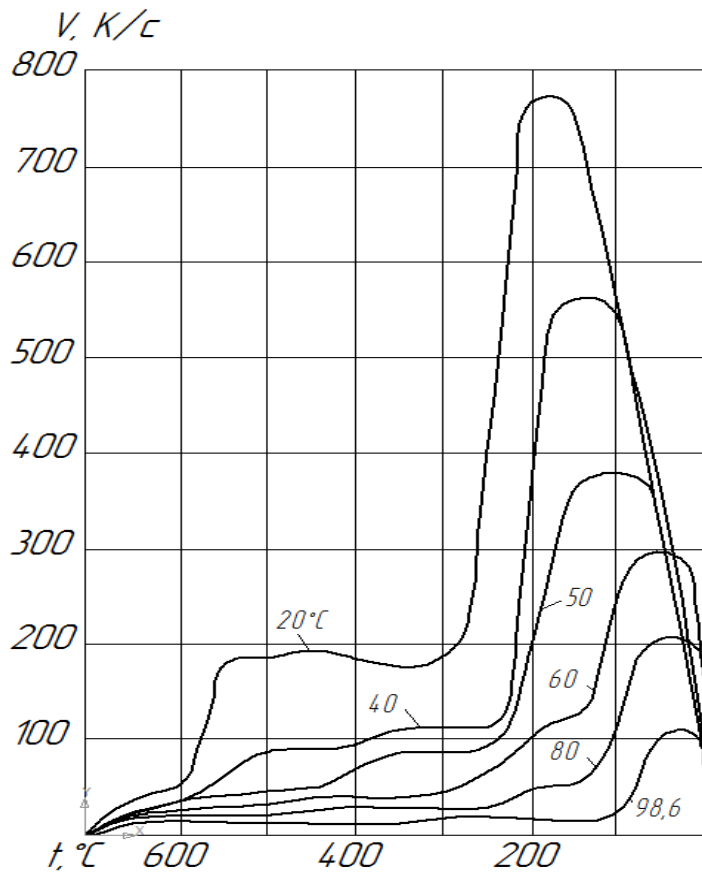


Рисунок 6.1 – Швидкість охолодження зразка в спокійній воді за різних температур

Таблиця 6.1 – Результати вимірювань

Порядковий номер валика	Товщина пластин δ , мм	Струм зварювальний $I_{зв}$, А	Напруга на дузі $U_{дз}$, В	Швидкість зварювання $V_{зв}$, см/с	Початкова температура T_0 , К	Умови охолодження

7. Наплавити другий валик на третю пластину, попередньо підігріту до температури 493...523 К. Охолодження після наплавлення на повітрі.

8. Третій валик (на максимальній швидкості зварювання) наплавляється між двома першими (відстань від наплавленого валика до раніше наплавленого вибирається таким чином, щоб уникнути відпуску загартованої зони). Наплавлення послідовно виконується на кожну з трьох пластин за умов, обумовлених у пп. 2...7.

9. З середини кожного зразка вирізується поперечний темплет шириною близько 20 мм. Протилежні сторони темплетів повинні бути строго паралельні. Шліфи полірувати на верстаті, травити. Час травлення – 10...15 с.

Оброблення результатів експерименту

1. Вздовж межі проплавлення кожного шва по лінії найбільшої твердості зробити виміри величини твердості. Зазвичай найбільша твердість спостерігається на відстані 1,0...1,5 мм від межі сплавлення. За результатами кількох вимірів знайти середню величину твердості навколошовної зони для даного валика. Результати внести в табл. 6.2.

Таблиця 6.2 – Результати експериментів

Порядковий номер валика	Погонна енергія $q_B/\mathcal{Q}_{зв}$, Вт/см	Критерій $1/\theta$	Критерій ω	Швидкість охолодження W , °C/с	Твердість навколошовної зони, HRC

2. Швидкість охолодження при будь-якій температурі $T > T_0$ металу у зварному з'єднанні в загальному випадку описується рівнянням:

$$W = -\omega \frac{2\pi\lambda(T - T_0)^2}{(q_6 / \mathcal{Q}_{зв})}, \quad (6.1)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності, Дж/(см³·К);

ω – безрозмірний критерій процесу охолодження.

Безрозмірний критерій ω залежить від властивостей металу, що зварюється і умов зварювання, виражених через безрозмірну величину $1/\theta$, яка визначається за формулою

$$\frac{1}{\theta} = \frac{2q_6 / \mathcal{Q}_{зв}}{\pi\delta^2 c\gamma(T - T_0)}, \quad (6.2)$$

де $c\gamma$ – об'ємна теплоємність, Дж/(см³·К);

δ – товщина пластини, см.

Залежно від $1/\theta$ значення ω показано на рис. 6.2. При малих значеннях $1/\theta$, тобто при великій величині δ (практично при $\delta = 25$ мм), значення ω прагне до 1.

У тих випадках, коли товщина зразка $\delta = 5...10$ мм, розрахунок середньої швидкості охолодження відбувається за такою формулою:

$$W = - \frac{2\pi\lambda c\gamma(T - T_0)^3}{(q_v / (\vartheta_{36} \delta))^2} \cdot \quad (6.3)$$

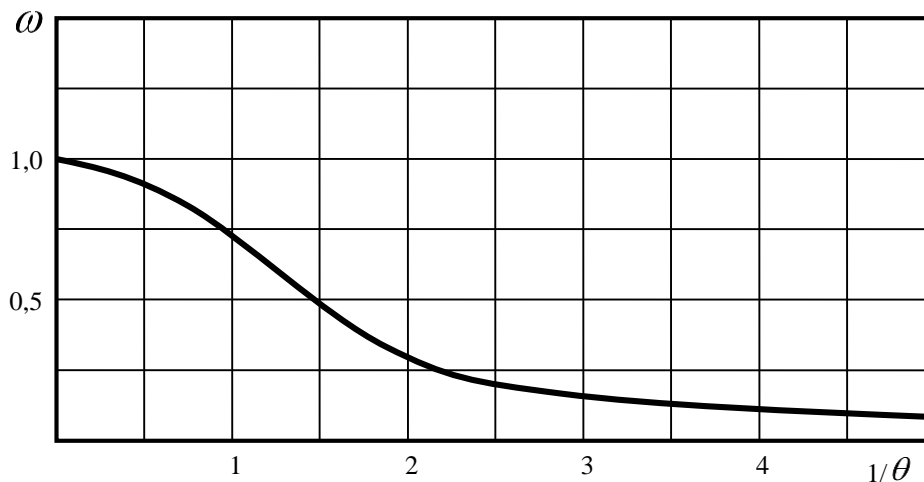


Рисунок 6.2 – Залежність $\omega = f(1/\theta)$

На твердість металу навколошовної зони впливає швидкість охолодження в критичному інтервалі найменшої стійкості аустеніту, тому в залежності (6.1) і (6.3) слід підставляти $T = T_{\min}$, де T_{\min} – температура найменшої стійкості аустеніту для даної сталі (873К). На підставі даних табл. 6.1, використовуючи залежності (6.1), (6.3), слід розрахувати погонну енергію і швидкість охолодження. Результати внести в табл. 6.2.

3. За отриманими вимірами твердості і обчисленими швидкостями охолодження побудувати залежність в координатах $HRC = f(W)$.

4. Практично доводиться розраховувати режим зварювання так, щоб твердість металу навколошовної зони не перевищувала заданої. За заданою твердістю, скориставшись побудованим графіком $HRC = f(W)$, визначити необхідну швидкість охолодження.

Для товщини металу $\delta = 10...25$ мм розрахунок ведеться методом послідовних наближень з використанням формул (6.1), (6.2). При $\delta = 5...10$ мм і $\delta > 25$ мм розрахунок виходить більш простим і дозволяє відразу отримати значення погонної енергії $q_v/\vartheta_{зв}$. Знайшовши значення $q_v/\vartheta_{зв}$ з технологічних міркувань необхідно задатися швидкістю зварювання і визначити ефективну теплову потужність, звідки можна обчислити $I_{зв}$ і U_d (величина ефективного ККД нагріву приймається рівною 0,8).

Якщо розрахунок дає нездійсненну на практиці величину погонної енергії (занадто велику), то, отже, без підігріву отримати необхідну твер-

дість не вдасться. Необхідно зменшити різницю ($T_{\min}-T_0$), тобто збільшити початкову температуру T_0 за рахунок підігріву виробу і повторити весь розрахунок.

Контрольні питання

1. Яка фізична сутність процесу поширення теплоти при зварюванні?
2. Яким чином можна впливати на розміри зони термічного впливу?
3. Як вибрати схему тіла, що нагрівається і схему джерела тепла в кожному конкретному випадку?
4. Як впливають теплофізичні властивості металу на розподіл тепла при зварюванні?
5. Яка мета побудови залежності $HRC = f(W)$?
6. Який взаємозв'язок між швидкістю охолодження і ступенем загартування металу навколошовної зони?
7. Яким чином можна впливати на швидкість охолодження навколошовної зони?
8. Як впливає попередній підігрів на характер термічного циклу металу навколошовної зони?
9. Як розрахувати режим зварювання за заданої твердості металу навколошовної зони?

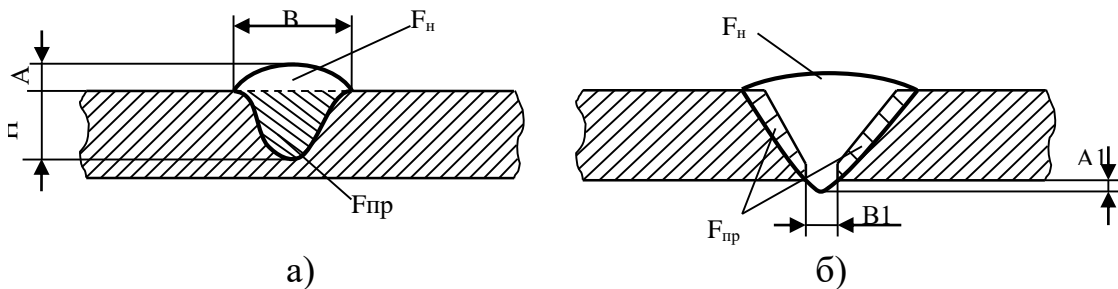
7 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 7 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОПЛАВЛЕННЯ МЕТАЛУ ПРИ ДУГОВОМУ ЗВАРЮВАННІ

Мета роботи: оволодіти методикою розрахункового і технікою експериментального визначення термічного ККД процесу проплавлення, площ наплавлення і проплавлення. Вивчити вплив параметрів режиму на продуктивність процесу проплавлення при наплавленні валика на масивний виріб.

Загальні вказівки

При зварюванні (наплавленні) плавленням поряд з плавленням електродного металу відбувається розплавлення (проплавлення) на деяку глибину основного металу. Зварний шов (рис. 7.1) утворюється за рахунок змішування проплавленого основного і розплавленого електродного металів.

У поперечному перерізі шов (наплавлений валик) характеризується такими параметрами: A – висота посилення шва; B – ширина шва; H – глибина проплавлення; $B1$ – ширина зворотного боку шва; $A1$ – висота зворотного боку шва; H/B – відносна глибина проплавлення; B/H – коефіцієнт форми шва; F_H – площа наплавлення; F_{np} – площа проплавлення; F_{np}/F_H – коефіцієнт площ; $\mu = \frac{F_{np}}{B \cdot H}$ – коефіцієнт повноти.



a – наплавлений валик; б – стиковий шов

Рисунок 7.1 – Основні параметри зварного шва

Усі розміри шва залежать від режиму й умов зварювання. Для правильного вибору режиму зварювання, що забезпечує необхідні розміри і форму шва, необхідно знати закономірності процесу проплавлення.

Ефективність процесу проплавлення характеризується термічним ККД η_t , який представляє собою відношення теплової потужності q_{np} , що витрачається на проплавлення, до ефективної теплової потужності $q_в$:

$$\eta_t = \frac{q_{np}}{q_в} = \frac{F_{np} S'_{пл} \rho_{зв}}{\eta_в U_0 I_{зв}}, \quad (7.1)$$

де $\vartheta_{зв}$ – швидкість зварювання, см/с;

$S'_{пл}$ – об'ємна тепломісткість розплавленого металу, Дж/см³, для маловуглецевої сталі $S'_{пл} = 10\ 500$ Дж/см³;

q_B – ефективний ККД нагріву виробу;

$I_{зв}$ – зварювальний струм дуги, А;

U_d – напруга на дузі, В.

Номограма для знаходження η_t при наплавленні на масивне тіло побудована в залежності від безрозмірного критерію ξ_3 (дод. А).

Робоче завдання

1. Провести наплавлення валиків на пластини, виготовити поперечні макрошліфи, виміряти параметри зон наплавлення і проплавлення, обчислити значення термічного ККД за експериментальними даними.

2. Отримати рівняння регресії $\eta_t = f\left(\xi_3, \frac{H}{B}\right)$.

3. Розрахувати значення термічного ККД η_t за допомогою номограми (дод. А) і зіставити розрахункові й експериментальні дані, встановити величину і характер розбіжностей.

4. Виявити за експериментальними даними вплив факторів режиму зварювання на коефіцієнт площ.

Обладнання, пристрої та матеріали

1. Апарат для автоматичного зварювання під флюсом, обладнаний вимірювальними приладами, секундомір, ножівка механічна, шліфувальний верстат, епідіаскоп, ваги аналітичні, клейма сталеві (цифрові), лінійка сталева, ножиці.

2. Матеріали зварювальні: флюс типу АН-348А, дріт зварювальний Св-08А діаметром 3 мм, пластини з маловуглецевої сталі (250...300) × (150...200) × (20...30) мм у кількості 2 шт., реактив для травлення макрошліфів.

Опис лабораторної установки

При проведенні експериментів має бути використано зварювальне обладнання, реєструвальні прилади, вимірювальний інструмент, які за технічними характеристиками і класами точності відповідають вимогам, наведеним нижче.

Механізми подачі зварювальних головок повинні забезпечувати стабільну рівномірну швидкість подачі дроту. Допустимі коливання швидкості подачі при зміні опору в трактах зварювальної апаратури не повинні перевищувати ± 5 %. Аналогічні вимоги висувають і до швидкості переміщення зварювальної дуги.

Клас точності вимірювальних приладів – не нижче 1,5. При проведенні експериментів необхідно забезпечити таку точність вимірювання лінійних параметрів поперечного перерізу зварного шва $\pm 0,2$ мм, площ наплавлення і проплавлення ± 4 %.

Порядок виконання роботи

1. Залежно від виданого викладачем завдання, варіанти якого наводяться в табл. 7.1, підібрати зварювальне обладнання, перевірити його працездатність. Зібрати схему.

Таблиця 7.1 – Орієнтовні значення параметрів режиму при зварюванні під флюсом

Характеристики процесу	Порядковий номер експерименту								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Флюс	АН-348А								
Діаметр електрода, мм	3								
Виліт електрода, мм	34...38								
Струм зварювальний, А									
Напруга на дузі, В									
Швидкість зварювання, см/с									

2. За допомогою секундоміра і сталеві лінійки встановити мінімальну швидкість зварювання і на сторонній пластині підібрати необхідні значення зварювального струму і напруги на дузі. Провести експериментальне наплавлення. Зафіксувати справжні значення параметрів режиму зварювання, результати внести в таблицю, побудовану за формою табл. 7.1. Таврувати зварний шов.

3. Повторити досліди для інших значень струмів і напруг (експерименти 2 і 3).

4. Повторити переходи 2 і 3 для інших швидкостей зварювання.

Примітка. Кожен наступний валик наплавляється на повністю охолоджену пластину. Для охолодження можна використовувати струмінь води. Оскільки глибина проплавлення менше половини товщини пластини, то можливе наплавлення з двох сторін пластини

5. Наплавлені пластини розрізаються з метою виготовлення поперечних макрошліфів. Ширина вирізаного поперечного темплету повинна складати 15...20 мм. Для усереднення і підвищення точності результатів експерименту з кожної пластини слід вирізати по три темплети. При цьому повинні бути виключені початкова і кінцева ділянки наплавлених валиків довжиною 25...30 мм

Вирізані темплети піддаються шліфуванню з одного боку і травленню з метою виявлення меж зон проплавлення.

6. Підготовлені мікрошліфи наплавлених валиків за допомогою епідіаскопа проєктуються на папір при відповідному збільшенні. При цьому слід пам'ятати, що якщо лінійні розміри збільшені в n разів, то площа наплавлення F_n і проплавлення $F_{пр}$ – в n^2 . Фактор n може бути попередньо визначений за допомогою еталона, або за результатами порівняння товщини пластини реальної і на екрані.

На збільшеному зображенні вимірюються ширина валика B , глибина проплавлення H , висота посилення A , підраховуються F_n і $F_{пр}$. Значення F_n і $F_{пр}$ можуть бути визначені методом зважування збільшеного зображення площі на аналітичних вагах з подальшим порівнянням з еталонном. Отримані результати вимірювань внести в табл. 7.2.

Таблиця 7.2 – Результати вимірювань

Номер експерименту	Ширина валика B , мм		Глибина проплавлення H , мм		Площа наплавлення F_n , мм ²		Площа проплавлення $F_{пр}$, мм ²		Висота посилення A , мм	
	B_i	$B_{ср}$	H_i	$H_{ср}$	F_{ni}	$F_{нср}$	$F_{при}$	$F_{прср}$	A_i	$A_{ср}$

Оброблення результатів експерименту

1. Використовуючи дані табл. 7.1, розрахувати для кожного експерименту значення ефективної теплової потужності зварювальної дуги

$$q_e = \eta_e U_o I_{зв} \quad (7.2)$$

де η_e – ефективний ККД нагріву виробу дугою, при виконанні даної роботи його значення можна прийняти усереднено рівним 0,8.

Результати розрахунків внести в табл. 7.3.

Таблиця 7.3 – Дані експериментів

Порядковий номер експерименту	Ефективна теплова потужність q_e , Вт	Безрозмірний критерій ξ_3	Відносна глибина проплавлення $H_{ср}/B_{ср}$	Термічний ККД		Поправочний коефіцієнт $p = \eta' / \eta''_t$	Коефіцієнт площ $F_{пр}/F_n$	Коефіцієнт повноти μ	Коефіцієнт посилення F_n/AB	форми шва
				Розрахунковий η'_t	Експериментальний η''_t					

2. Використовуючи отримані значення q_v і дані табл. 7.1, розрахувати безрозмірний критерій:

$$\xi_3 = \frac{q_v \vartheta_{36}}{a^2 S_{nl}}, \quad (7.3)$$

де a – коефіцієнт температуропровідності, приймається відповідним температурі 673...773 К і рівним 0,08 см²/с (дод. Б).

3. Використовуючи номограму (дод. А), визначити теоретичні значення η'_t . При цьому значення відносної глибини проплавлення Н/В приймаються рівними 0,5.

4. Використовуючи дані, наведені в табл. 7.1...7.3, розрахувати експериментальне значення термічного ККД процесу проплавлення η''_t .

5. Використовуючи дані, наведені в табл. 7.2, розрахувати відносну глибину проплавлення.

Результати розрахунків внести в табл. 7.3.

6. Провести статичне оброблення результатів і отримати рівняння регресії $\eta'_t, \eta''_t = f(\xi_3), \eta''_t = f\left(\xi_3, \frac{H}{B}\right)$.

Порівняти результати.

7. Визначити величину поправочного коефіцієнта. Результати внести в табл. 7.3. Провести статистичне оброблення та отримати залежність. Зробити висновки.

8. Використовуючи дані, наведені в табл. 7.2, розрахувати коефіцієнти площ $F_{пр.ср}/F_{н.ср}$, повноти $\mu = F_{пр}/NB$, форми посилення F_H/AB . Результати подати у вигляді графіків спочатку у функції ефективної теплової потужності q_v , потім в функції параметра процесу $q_v/\vartheta_{зв}$. Зробити висновки про вплив параметрів режиму зварювання на формоутворення зварного шва.

Контрольні питання

1. Що являє собою термічний ККД проплавлення?
2. Як впливають параметри режиму зварювання на величину термічного ККД?
3. Яким відносним показником характеризується ефективність процесу проплавлення?
4. Які шляхи підвищення термічного ККД, ефективності використання тепла дугового джерела енергії?
5. Чому змінюються розміри шва при зміні швидкості зварювання?
6. Чому змінюються розміри шва при зміні напруги (струму) дуги?
7. Дайте характеристику розрахункового методу визначення термічного ККД процесу проплавлення.
8. Опишіть експериментальний метод визначення термічного ККД процесу проплавлення.

8 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 8 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ РОЗПЛАВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОДА ПРИ ДУГОВОМУ ЗВАРЮВАННІ

Мета роботи: вивчити закономірності процесів нагріву і розплавлення електродів при зварюванні.

Загальні вказівки

Студенти повинні знати, що при оцінюванні продуктивності різних способів дугового зварювання користуються такими характеристиками: миттєва, середня і питома продуктивність наплавлення.

Показники продуктивності процесу наплавлення визначаються продуктивністю розплавлення (або плавлення) присадкового (електродного) металу. Таким показником буде миттєва продуктивність розплавлення електродного дроту:

$$g_p = \frac{q_e}{S_k}, \quad (8.1)$$

де g_p – миттєва продуктивність розплавлення, г/с;

q_e – енергія, що виділяється в електроді, Вт;

S_k – тепломісткість розплавленого і нагрітого до кипіння металу електрода, Вт·с/г.

У більшості випадків при правильному протіканні процесу зварювання, а також при механізованих способах зварювання (у разі незначних коливань вильоту електрода) миттєву продуктивність розплавлення можна вважати рівною її середній величині:

$$g_p = \frac{\alpha_p I_{зв}}{3600}, \quad (8.2)$$

де α_p – коефіцієнт розплавлення, г/(А·год).

У процесі зварювання не весь розплавлений метал переходить у зварювальну ванну, утворюючи шов або валик на основному металі. Частина розплавленого металу розбризкується, випаровується, вигорає (окислюється). Звичайно, втрачається не тільки присадковий, але і розплавлений основний метал. Для спрощення всі втрати відносять до присадкового металу.

Загальні втрати при зварюванні оцінюються коефіцієнтом втрат ψ_n :

$$\psi_n = \frac{g_p - g_n}{g_p} = \frac{\alpha_p - \alpha_n}{\alpha_p} \quad (8.3)$$

де α_n – коефіцієнт наплавлення, г/(А·год);
 g_n – продуктивність наплавлення, г/с.

Робоче завдання

1. Оволодіти методикою експериментального дослідження характеристик плавлення присадкового металу при дуговому зварюванні.
2. Дослідити вплив складу електродних матеріалів на характеристики плавлення присадкового металу.

Обладнання, пристрої та матеріали

1. Пости ручного дугового зварювання постійного і змінного струму, обладнані вимірювальними приладами.
2. Пристрій для уловлювання бризок, секундомір, технічні ваги до 5 кг із важками, набір слюсарного інструменту, набір клейм, штангенциркуль.
3. Пластини з маловуглецевої сталі розміром $(6-8) \times 50 \times 250$ мм, електродні стрижні з дроту Св-08А і електроди марки АНО-4 і УОНИ-13/45 діаметром 4...5 мм, крейда, плавиковий шпат.

Вивчення роботи експериментальної установки

Установка для зварювання на постійному струмі (рис. 8.1) складається з джерела живлення GV (випрямляч УКСМ-1000), реостата баластного R типу РБ-301, амперметра PA з шунтом RS на 75 мВ, 300 А, вольтметра PV, перемикача полярності Q, електрода E.

Установка для зварювання на змінному струмі (рис. 8.2) складається з джерела живлення GT (зварювальний трансформатор ТД-500), трансформатора струму Т (300 / 5 А), амперметра PA на 5 А, вольтметра PV і електрода E.

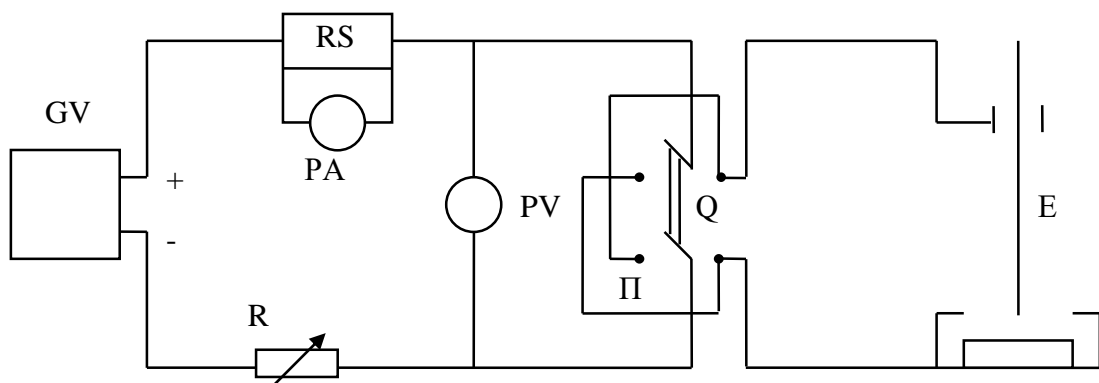


Рисунок 8.1 – Схема експериментальної установки для зварювання на постійному струмі

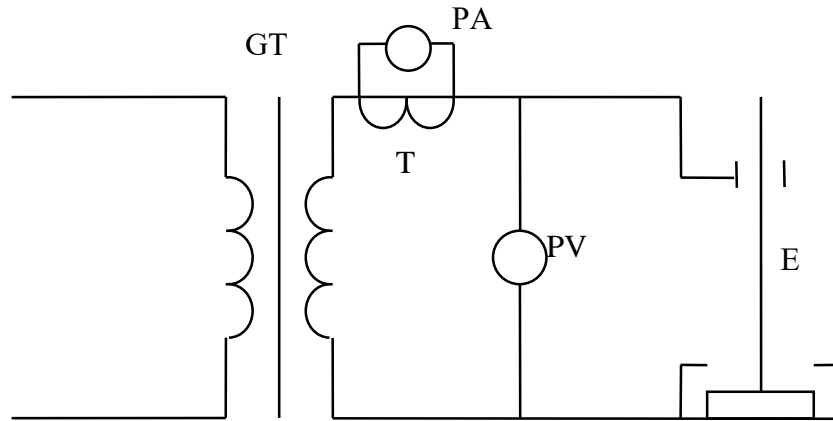


Рисунок 8.2 – Схема експериментальної установки для зварювання на змінному струмі

Порядок виконання роботи

1. На електродні стрижні нанести тонким шаром розчини крейди і плавикового шпату.

2. Поставити вимикач Q в положення «полярність зворотна». Для сталевого стрижня без покриття підібрати мінімальний струм дуги, що забезпечує стійке протікання процесу плавлення електрода. Попередньо ретельно виміряти вихідну довжину стержня і його діаметр у різних перетинах і напрямках і визначити середнє значення d_e . Провести наплавлення, фіксуючи при цьому величини струму $I_{зв}$ і напруги дуги U_d , тривалість процесу наплавлення $t_{зв}$. Після закінчення процесу наплавлення виміряти величину недогарка, який залишився, і обчислити довжину розплавленого стрижня $L_{рс}$. Результати дослідів внести в табл. 8.1.

3. Виконати експерименти згідно з п. 2 при зварюванні на прямій полярності. Результати внести в табл. 8.1.

4. Виконати експерименти згідно з пп. 2 і 3 послідовно для електродів: Св-08А + крейда, Св-08А + CaF₂, УОНИ-13/45, АНО-4. Результати внести в табл. 8.1.

Таблиця 8.1 – Дослідження впливу типу покриття на плавлення електродного стрижня

Марка електрода (покриття)	d_e , мм	Полярність	$L_{рс}$, мм	$I_{зв}$, А	U_d , В	$t_{зв}$, с

5. Виконати експерименти згідно з п. 2 при наплавленні електродами УОНИ-13/45 і АНО-4 на змінному струмі. Результати внести в табл. 8.1.

6. Зважити сталеву пластину, призначену для проведення експерименту. Таврувати пластину. Результат ($m_{пл}$) записати в табл. 8.2.

Таблиця 8.2 – Дослідження продуктивності плавлення електрода

Клеймо пластини	Марка електрода	d_e , мм	$L_{рс}$, мм	$t_{зв}$, с	$I_{зв}$, А	$m_{пл}$, г	m_b , г	α_p , г/(А·год)	ψ , %	α_n , г/(А·год)

Помістити пластину в пристрій для уловлювання бризок (рис. 8.3), попередньо встановлений на зварювальному столі.

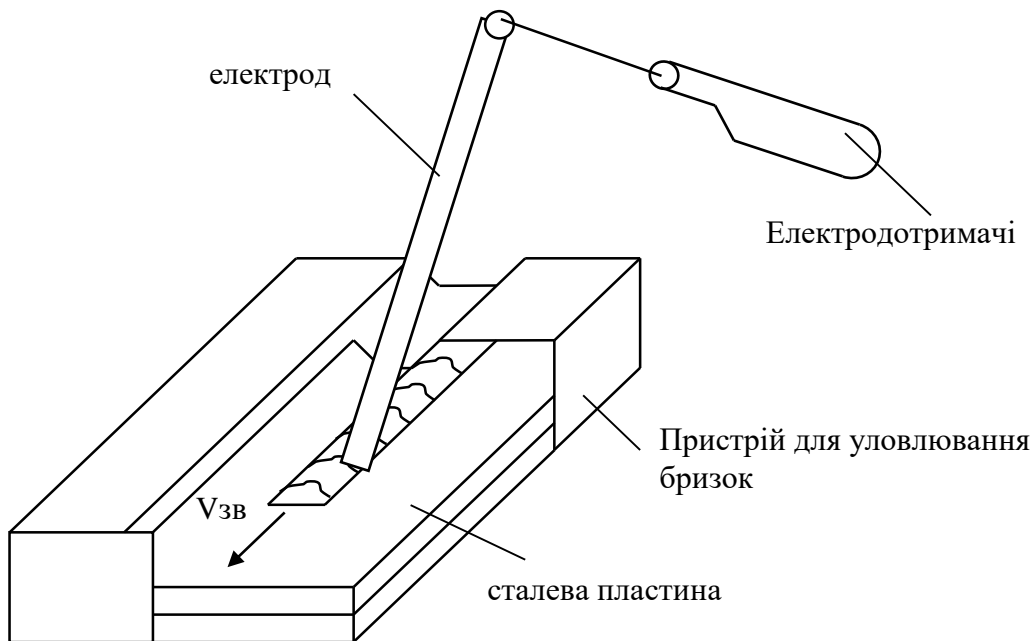


Рисунок 8.3 – Схема проведення досліду

Виконати наплавлення валика електродом УОНИ-13/45 (струм постійний, полярність зворотна, величина струму дуги $I_{зв} \approx 50d_e$).

Після виконання наплавлення (час наплавлення $t_{зв}$ фіксується за секундоміром) пластину видаляється з пристрою, очищується від шлаку і бризок, і зважується. Значення маси наплавленого зразка $m_{пл}$, часу наплавлення $t_{зв}$ і величини струму дуги $I_{зв}$ внести в табл. 8.2. Металева фракція, яка утворилася після очищення, за допомогою магніту виділяється – це і є втрати металу на розбризування m_b . Отриманий результат необхідно записати в табл. 8.2.

7. Виконати експерименти згідно з п. 6 для електрода АНО-4. Результати внести в табл. 8.2.

Оброблення результатів експериментів

1. На підставі даних табл. 8.1 слід розрахувати продуктивність процесу розплавлення g_p для кожного з досліджених електродів:

$$g_p = \frac{m_p}{t_{зв}},$$

$$g_p = \frac{\pi d_e^2}{4} \cdot \frac{L_{pc} \gamma}{t_{зв}}, \quad (8.4)$$

де γ – щільність матеріалу електрода, для сталевих електродів $\gamma = 7,8 \text{ г/см}^3$.
Результати занести в табл. 8.3.

Таблиця 8.3 – Вплив типу покриття на плавлення електродного стрижня і енергетичні характеристики дугового розряду

Марка електрода (покриття)	Рід струму, полярність	g_p , г/с	$I_{зв}$, А	U_d , В	Т, К	U_e , В	η_e

2. Величина ефективного приелектродного падіння напруги залежить від полярності і використовуваних електродних матеріалів:

- при прямій полярності:

$$U_e = U_a + \frac{\varphi_e}{e_0};$$

- при зворотній полярності:

$$U_e = U_k - \frac{\varphi_e}{e_0};$$

- при змінному струмі:

$$U_e = \frac{U_a + U_k}{2},$$

де U_a , U_k – анодне і катодне падіння напруги відповідно, В;

φ_e – робота виходу, еВ;

e_0 – заряд електрона, еВ.

Розрахунок ефективного приелектродного падіння напруги може бути виконаний за формулою:

$$U_e = \frac{g_p (S_k - S_T)}{\eta_e I_{3e}} \quad (8.5)$$

де S_k – тепломісткість крапель електродного металу, в першому наближенні можна прийняти постійною і рівною 1 880 Дж/г;

S_T – тепломісткість електродного металу, нагрітого до температури T , Дж/г.

Величину S_T розраховують за формулою:

$$S_T = c_T \cdot T, \quad (8.6)$$

де c_T – питома теплоємність матеріалу електрода при температурі T , Дж/(г·К), величина c_T приймається за додатком Б;

T – температура підігріву електрода струмом, К, визначається розрахунковим методом:

$$\frac{D_1 + T}{T_{np} - T} = \frac{D_1 + T_0}{T_{np} - T_0} e^{nt_{3e}}$$

У вигляді, зручному для виконання розрахунків, результат розв'язання рівняння теплового балансу може бути поданий таким чином:

$$T = \frac{T_{np} (D_1 + T_0) \cdot e^{nt_{3e}} - D_1 (T_{np} + T_0)}{(D_1 + T_0) \cdot e^{nt_{3e}} + (T_{np} - T_0)}, \quad (8.7)$$

де $T_{np} = md_e j^2 + T_0$ – гранична температура нагріву, К;

$$nt_{3e} = \frac{A}{md_e} \cdot \left(\frac{T_{np}}{D_1} + 1 \right) \cdot t_{3e} - \text{безрозмірний час нагрівання};$$

T_0 – початкова температура електродного стрижня, К, приймаємо $T_0 = 0$;

$$j = \frac{4I_{3e}}{\pi d_e^2} - \text{щільність струму в електроді, А/мм}^2;$$

A , D_1 , m – постійні коефіцієнти, які залежать від багатьох факторів (табл. 8.4).

Температура нагріву електрода струмом може бути визначена за номограмою (додаток В).

Таблиця 8.4 – Значення постійних коефіцієнтів узалежності від типу покриття і роду струму

Тип покриття, марка електрода	Рід струму	Коефіцієнти		
		A, 10 ⁻² , (мм ⁴ ·К)/(А·с)	D ₁ , К	m, (мм ³ ·К)/А ²
Без покриття, з тонким покриттям	постійний	3,1	240	2,6
	змінний	3,7	300	
УОНИ-13 АНО-4	постійний	2,4	200	2,5
	змінний	2,7	240	

3. Ефективний ККД нагріву електрода η_e визначається залежністю:

$$\eta_e = \frac{U_e}{U_o} . \quad (8.8)$$

Результати розрахунків вносяться в табл. 8.3. Усі розрахунки краще виконувати, використовуючи ЕОМ. За даними табл. 8.3 будуються порівняльні діаграми, в яких по осі ординат змінними величинами є η_e і U_e , а по осі абсцис – g_p , $I_{зв}$.

5. На підставі даних табл. 8.2 визначимо коефіцієнти розплавлення і наплавлення, а також коефіцієнт втрат електродного металу.

Масу розплавленого електродного металу m_p в даному випадку можна визначити знаючи довжину розплавленої частини електрода:

$$m_p = \frac{\pi d_e^2}{4} \cdot L_{pc} \gamma .$$

Відповідно до даних табл. 8.2 маса наплавленого металу m_n може бути визначена як різниця між масою розплавленого металу m_p і масою втрат на розбризування m_o :

$$m_n = m_p - m_o .$$

Тоді з урахуванням залежностей (8.2) і (8.3) можна записати такі вирази:

$$\alpha_n = 3600 \frac{m_n}{I_{36} t_{36}} ,$$

$$\alpha_p = 3600 \frac{m_p}{I_{36} t_{36}} ,$$

$$\psi = \frac{(m_p - m_n)}{m_p} \cdot 100\%$$

Отримані результати занести в табл. 8.2. На підставі отриманих даних зробити висновок про вплив типу покриття на характеристики плавлення електрода.

Контрольні питання

1. Що таке миттєва продуктивність розплавлення електрода?
2. Що таке середня продуктивність розплавлення електрода?
3. Що таке коефіцієнт розплавлення електрода?
4. Що таке коефіцієнт наплавлення?
5. Що таке коефіцієнт втрат електродного металу на вигар і розбризування?
6. Опишіть методику експериментального визначення коефіцієнтів розплавлення, наплавлення, втрат на вигар і розбризування.

9 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 9

ДОСЛІДЖЕННЯ НЕРІВНОМІРНОСТ ПРОЦЕСУ НАГРІВУ І ПЛАВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОДА ПРИ ДУГОВОМУ ЗВАРЮВАННІ

Мета роботи: оволодіти методикою експериментального і розрахункового визначення нерівномірності плавлення електрода.

Загальні вказівки

Нагрівання та плавлення електродів походять від двох джерел: розподіленого за обсягом – теплоти струму, що проходить через стрижень електрода, і плоского зосередженого – енергії зварювальної дуги

$$q_e = q_{ed} - q_{ec}, \quad (9.1)$$

де q_{ed} – енергія, що виділяється дугою на торці електрода, Вт;

q_{ec} – енергія, яка виділяється в стрижні електрода при проходженні по ньому струму, Вт.

Енергія, що виділяється дугою на торці електрода, залежить від ефективного приелектродного падіння напруги U_e і струму дуги $I_{зв}$:

$$q_{ed} = U_e I_{зв} = \eta_e U_e I_{зв} = q_p (S_k - S_T), \quad (9.2)$$

де S_T – тепломісткість металу електрода, підігрітого джоулевим теплом, Вт·с/г (Дж/г).

η_e – ефективний ККД процесу нагріву електрода.

У зв'язку з тим, що величина S_T – змінна (мінімальна на початку процесу плавлення і максимальна в кінці процесу плавлення електрода при ручному дуговому зварюванні), миттєва продуктивність розплавлення змінюється. Коефіцієнт нерівномірності розплавлення електродів виражається відношенням швидкості $V_{e,max}$ (продуктивності $g_{p,max}$) розплавлення електрода наприкінці і швидкості $V_{e,0}$ (продуктивності $g_{p,0}$) розплавлення на початку процесу:

$$K_H = \frac{V_{e,max}}{V_{e,0}} = \frac{g_{p,max}}{g_{p,0}}. \quad (9.3)$$

Зазвичай при правильному протіканні процесу $K_H = 1,1-1,3$.

Робоче завдання

1. Оволодіти методикою експериментального дослідження нерівномірності плавлення електродів при дуговому зварюванні.
2. Дослідити вплив щільності струму на нерівномірність плавлення електрода.

Обладнання, пристрої та матеріали

1. Пости ручного дугового зварювання постійного і змінного струму, обладнані вимірювальними приладами.
2. Секундомір, набір слюсарного інструменту, набір клейм, штангенциркуль.
3. Пластини з маловуглецевої сталі розміром $(6-8) \times 50 \times 250$ мм, електродні стрижні з дроту Св-08А і електроди марки АНО-4 і УОНИ-13/45 діаметром 4–5 мм, крейда, плавиковий шпат, дріт мідний діаметром 0,6...1,0 мм.

Вивчення роботи експериментальної установки

Установка для зварювання на постійному струмі (рис. 9.1) складається з джерела живлення GV (випрямляч УКСМ-1000), реостата баластного R типу РБ-301, амперметра РА з шунтом RS на 75 мВ, 300 А, вольтметра PV, перемикача полярності Q, електрода E.

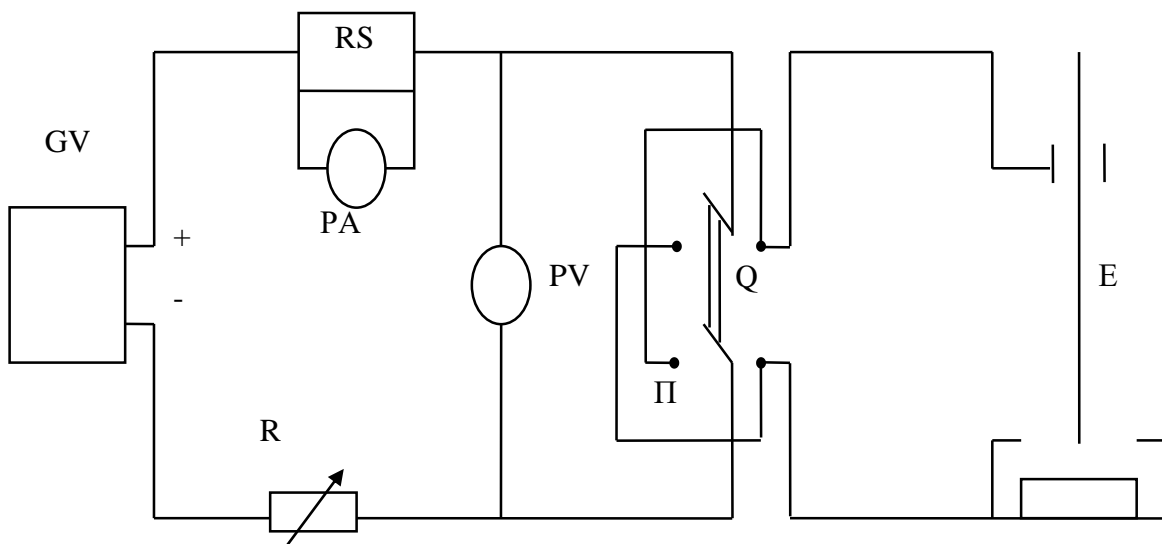


Рисунок 9.1 – Схема експериментальної установки для зварювання на постійному струмі

Порядок виконання роботи

1. Підготувати електроди для експерименту. Для цього слід попередньо розділити електрод на ділянки довжиною по 50 мм (відлік ведеться від торця електрода) і зазначити межі ділянок за допомогою скруток з мідного дроту.

2. Для електродів АНО-4 і УОНИ-13/45 під час зварювання на зворотній полярності встановити характер нерівномірності плавлення по довжині при виконанні наплавлення на мінімальному струмі дуги.

3. Момент запалювання дуги приймається за початок відліку, і за допомогою секундоміра фіксується час розплавлення кожної ділянки. За допомогою приладів зафіксувати середні значення параметрів режиму. Результати внести в табл. 9.2

4. Виконати експерименти згідно з п. 2 і 3 для середньої і великої щільності струму в електродах. Результати внести в табл. 9.1.

Таблиця 9.1 – Дослідження впливу типу покриття на нерівномірність плавлення електрода

Марка електрода	I _{зв} , А	U _д , В	Тривалість плавлення ділянок t _{зв} , с							
			1	2	3	4	5	6	7	Σ

Оброблення результатів експериментів

1. Розрахувати експериментальний коефіцієнт нерівномірності плавлення електрода, використовуючи вираз (9.3). При цьому слід врахувати, що продуктивність розплавлення окремих ділянок електродного стрижня обернено пропорційна тривалості плавлення цих же ділянок (при постійних інших умовах). Тому вираз (9.3) можна трансформувати в такий спосіб:

$$K_H = \frac{t_1}{t_n}, \quad (9.4)$$

де t₁ і t_n – тривалість плавлення першої і останньої ділянок електродного стрижня (довжина ділянок однакова) відповідно.

Отримані результати внести до табл. 9.2.

2. Розрахувати температуру підігріву електрода струмом при загальній тривалості плавлення всіх ділянок, використовуючи методику, наведену в лабораторній роботі № 8. Потім, використовуючи дані дод. Б, визначити теплоємність матеріалу електрода для розрахованої температури.

Таблиця 9.2 – Вплив щільності струму на нерівномірність плавлення електрода

Марка електрода	d_e , мм	$I_{зв}$, А	$j_{зв}$, А/мм ²	Т, К	K_H	
					експериментальний	теоретичний

3. Розрахувати теоретичне значення коефіцієнта нерівномірності плавлення:

$$K_H = \frac{S_k - S_0}{S_k - S_T} \quad (9.5)$$

де S_k – тепломісткість крапель електродного металу, у першому наближенні можна прийняти постійною і рівною 1 880 Дж/г;

S_T – тепломісткість електродного металу, нагрітого до температури Т, Дж/г.

Отримані результати внести в табл. 9.2.

4. За даними табл. 9.2 побудувати графіки в координатах «тривалість плавлення ділянок – довжина розплавленої частини електрода».

5. Побудувати графік залежності коефіцієнта нерівномірності плавлення від струму зварювання $K_H = f(I_{зв})$ для заданих марок електродів, на підставі якого зробити висновок про збіжність розрахункових і експериментальних даних, визначити оптимальні струми для заданих електродів.

Контрольні питання

1. Якими джерелами тепла нагрівається електрод при зварюванні?
2. Що таке нерівномірність розплавлення електрода і чим вона викликана?
3. Опишіть методику експериментального визначення величини коефіцієнта нерівномірності плавлення електрода.
4. Опишіть методику розрахункового визначення величини коефіцієнта нерівномірності плавлення електрода.
5. Як впливає щільність струму на нерівномірність плавлення електрода?

10 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 10 ОЦІНКА СХИЛЬНОСТІ ЗВАРЮВАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ДО ПОРИСТОСТІ

Мета роботи: вивчення способу оцінки схильності зварювальних матеріалів до пористості при зварюванні відкритою дугою. Визначення впливу способу захисту на схильність до пористості.

Короткі теоретичні відомості

У процесі зварювання розплавлений метал електродних крапель і зварювальної ванни насичується газами в результаті хімічних реакцій, що протікають в самому металі і між газовою і шлаковою фазами.

Зі зниженням температури зварювальної ванни розчинність газів у металі різко знижується і вони виділяються з ванни у вигляді газових бульбашок. При малій швидкості охолодження бульбашки встигають спливати на поверхню. При великій швидкості спостерігається неповний відрив газових бульбашок від твердої фази металу, який кристалізується, при цьому залишаються готові зародки майбутніх пор. Найбільш інтенсивно розчиняються в металі водень і азот. Джерелом надходження водню є органічні забруднення, іржа та волога на зварюваних кромках, у зварювальних матеріалах. Азот надходить у ванну з повітря при недостатньому фізичному захисті розплавленого металу електродних крапель і зварювальної ванни.

Для оцінювання стійкості зварювальних матеріалів проти пористості на кафедрі ОіТЗВ ДДМА розроблений спосіб, відповідно до якого в обробку на поверхні пластини укладають порошковий дріт, до складу осердя якого вводять речовини, що викликають пори. В якості таких речовин використовують, наприклад, іржу або нітрид магнію. Мінімальна кількість речовин, при якій у шві з'являється пора, віднесена до одиниці довжини шва, вважається критичною і служить порівняльним показником зварювальних матеріалів за стійкістю до утворення пор.

Робоче завдання

1. Оволодіти методикою експериментального оцінювання схильності зварювальних матеріалів до пористості при зварюванні відкритою дугою.
2. Визначити вплив способу захисту на схильність до пористості.

Обладнання, пристрої та матеріали

1. Апарат зварювальний із джерелом постійного струму з похилоспадною зовнішньою характеристикою; амперметр на 500 А, вольтметр на 50...75 В.

2. Протяжний верстат для виготовлення порошкового дроту.
3. Порошковий дріт діаметром 2,4...3,6 мм і дріт суцільного перетину діаметром 2...4 мм.
4. Порошковий дріт з іржею і нітридом магнію в складі наповнювача, машинне масло або інші пороутворюючі матеріали.
5. Пластини з маловуглецевої сталі з поздовжнім пазом глибиною 4 мм.

Порядок виконання роботи

Наплавлення виконують на автоматі при живленні зварювальної дуги від джерела постійного струму з похилоспадною зовнішньою характеристикою. Струм вимірюють амперметром на 500 А через шунт у зварювальному ланцюзі, напругу – вольтметром на 50...75 В. Для наплавлення використовують порошковий дріт діаметром 2,4...3,6 мм і дріт суцільного перетину діаметром 2...4 мм. Наплавлення виконують на пластини з маловуглецевої сталі з поздовжнім пазом глибиною 4 мм або без нього. Для оцінювання стійкості матеріалів проти пористості на протяжному верстаті виготовляють порошкові дроти з іржею і нітридом магнію в складі наповнювача.

1. Зібрати схему установки для зварювання на постійному струмі зворотної полярності.
2. Визначити ваговий вміст наповнювача, що викликає пори, у порошковому дроті на 1 мм довжини дроту за формулою

$$M_{\text{пн}} = \frac{m_{\text{др}} - m_{\text{об}}}{l_{\text{др}}}$$

де $m_{\text{др}}$ – маса відрізка порошкового дроту, г;
 $m_{\text{об}}$ – маса оболонки дроту без наповнювача, г;
 $l_{\text{др}}$ – довжина відрізка дроту, мм.

3. Порошковий дріт із наповнювачем розділити на відрізки довжиною 50 мм.
4. Встановити режим зварювання порошковим дротом ($I_{\text{зв}} = 220...280$ А, $U_{\text{д}} = 22...28$ В, $V_{\text{зв}} = 0,0055$ м/с) і перевірити його на пластині без паза.
5. Укласти відрізки порошкового дроту з іржею в поздовжній паз пластини один за одним, змінюючи кількість поруч покладених відрізків відповідно до закону арифметичної прогресії. Провести наплавлення і візуально визначити ділянку, на якій з'явилися пори.
6. Змінити полярність зі зворотної на пряму і повторити п. 5.
7. Збільшити швидкість зварювання до 0,011 м/с і повторити п. 5.
8. Повторити пп. 5, 6 і 7 для зварювання суцільним дротом на режимі: $I_{\text{зв}} = 350...600$ А, $U_{\text{д}} = 30...35$ В.

9. Укласти в поздовжній паз пластини відрізки порошкового дроту, заповнені нітридом магнію. Виконати зварювання порошковим дротом, дротом суцільного перетину і візуально визначити ділянку з порами.

10. Провести досліди пп. 6, 7 і визначити ділянки з порами.

Оброблення результатів експерименту

1. Отримані результати звести в табл. 10.1.

Таблиця 10.1 – Результати експерименту

№ п/п	Умови дослідів і режим зварювання	Критичний вміст наповнювача, г/мм	
		іржі	нітриду магнію

2. Зробити висновки і пояснити отримані результати.

Контрольні питання

1. Який механізм виникнення пор у металі шва?
2. Які гази можуть бути причиною пористості зварних швів?
3. Як запобігти утворенню пор, викликаних воднем?
4. Як впливає режим зварювання на насичення шва азотом?
5. Які існують заходи попередження пористості, викликані азотом?
6. Як попередити насичення шва азотом?
7. Як впливає на пористість швидкість зварювання?
8. Механізм впливу швидкості зварювання на пористість.
9. Чи впливає полярність струму на пористість зварних швів?

11 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 11

ОЦІНКА ОПІРНОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ДО УТВОРЕННЯ ГАРЯЧИХ ТРІЩИН

Мета роботи: вивчити пристрій визначення опірності зварних з'єднань утворенню гарячих тріщин; вивчити методика кількісної оцінки опірності зварних зразків утворенню гарячих тріщин.

Короткі теоретичні відомості

Під технологічною міцністю зварних з'єднань розуміють їхню здатність витримувати без руйнування різного роду впливи, які можуть виникнути в процесі зварювання, охолодження або вилежування зварних конструкцій під впливом зварювальних деформацій і напружень.

Гарячі тріщини – це міжкристалічні руйнування, що виникають при кристалізації металу, а також при високих температурах у твердому стані внаслідок в'язкопластичної деформації.

У процесі зварювання в зоні твердіння розплавленого металу в більшості випадків виникають напруги розтягнення внаслідок утворення деформацій подовження металу. Власні деформації ε дорівнюють різниці спостережуваних ε_c і температурних ε_α деформацій:

$$\varepsilon = \varepsilon_c - \varepsilon_\alpha$$

Однією з причин появи деформацій подовження є температурна усадка металу ε_α . Якщо температура знижується, тобто $\Delta T < 0$, то $-\varepsilon_\alpha = -\alpha \Delta T$ позитивна. Отже, навіть при $\varepsilon_n < 0$ може виникати деформація подовження. Деформації подовження будуть ще більшими, якщо $\varepsilon_n < 0$. Значення ε_n стають позитивними внаслідок складних процесів нагрівання та охолодження сусідніх ділянок і залежать також від форми деталей, що зварюються, і їх закріплення.

Наприклад, при наближенні шва до краю пластини (рис. 11.1, а) метал розширюється в напрямку зварювання $V_{зв}$ і різко збільшується розмір l в зоні металу ванни, який кристалізується, при розвороті кромки. Вузкі пластини (рис. 11.1, б) при зварюванні досить сильно згинаються від нерівномірного нагрівання і створюють подовження металу в районі ділянки l_1 поруч зі зварювальною ванною; одночасно з тією ж причиною збільшується розмір l_2 .

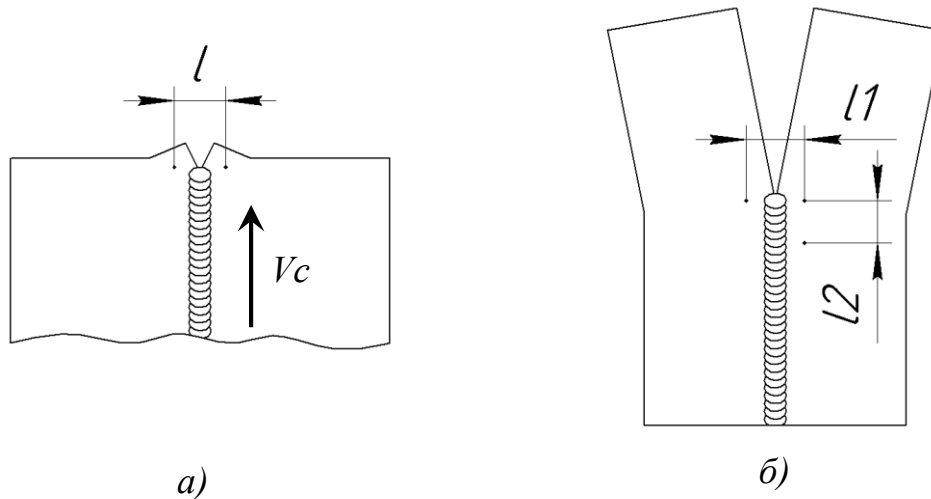


Рисунок 11.1 – Розширення металу при зварюванні

Механічні випробування металів при високих температурах показують, що пластичність металу δ в деякому інтервалі між температурами солідус T_c і ліквідус T_l дуже мала (рис. 11.2).

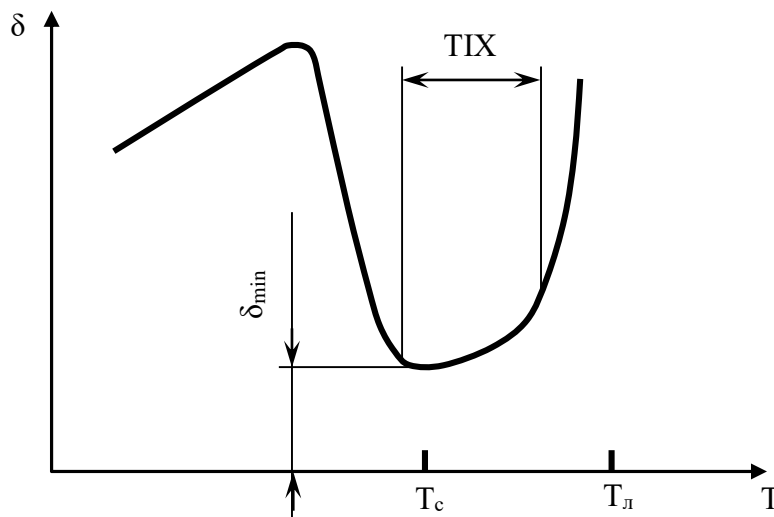


Рисунок 11.2 – Залежність пластичності металу від температури

Цей інтервал отримав назву температурного інтервалу крихкості (ТІХ). Наявність ТІХ, в якому мінімальна пластичність може знижуватися до 0,1...0,5 %, є однією з основних причин утворення гарячих тріщин. За період перебування металу в цьому інтервалі можуть накопичитися такі деформації подовження, які перевершать рівень пластичності в ТІХ. Можливість утворення гарячих тріщин тим більше, чим менше пластичність металу в ТІХ, чим нижче ТІХ і чим більший темп α^* власних деформацій подовження ϵ при зварюванні. Під темпом розуміють швидкість зміни деформацій від температури $\alpha^* = \partial\epsilon / \partial T$. Деякі сплави можуть мати два і на-

віть три температурних інтервали крихкості. При цьому другий і третій інтервали виникають при температурах нижче T_c .

Гарячі тріщини з'являються як у швах, так і поблизу лінії сплавлення в наволошовній зоні; як вздовж, так і поперек шва.

Утворення тріщин залежить від складу металу шва й основного металу, форми і розмірів зварного вузла конструкції, режимів і умов зварювання. Існують різні методи і засоби визначення опірності зварних з'єднань утворенню гарячих тріщин. У кожній із проб прийнятий певної форми зразок, який повинен забезпечувати якомога більший рівень ϵ , щоб свідомо створювати більший темп власних деформацій в шві в період кристалізації металу. Якщо зварюється метал із доброю опірністю утворенню гарячих тріщин і застосовуються досить високоякісні зварювальні матеріали, то гарячі тріщини в зразках проб можуть і не утворюватися. Для інтенсифікації процесу утворення деформації, з метою одержання гарячих тріщин у лабораторних умовах, зразки в процесі зварювання можуть додатково деформуватися випробувальною машиною, яка створює за певний проміжок часу на додаток до деформацій ($\epsilon_n - \epsilon_a$) машинну деформацію ϵ_m .

Як показано на рис. 11.3, зразки в процесі зварювання розтягують із заданою швидкістю деформації, при цьому стійкість швів утворенню гарячих тріщин оцінюють довжиною тріщини $l_{тр}$ або критичним темпом деформації $\alpha^*_{кр}$, який визначається приблизно як відношення критичного значення переміщення кромки зварювальних елементів за час деформування в ТІХ до значення ТІХ.

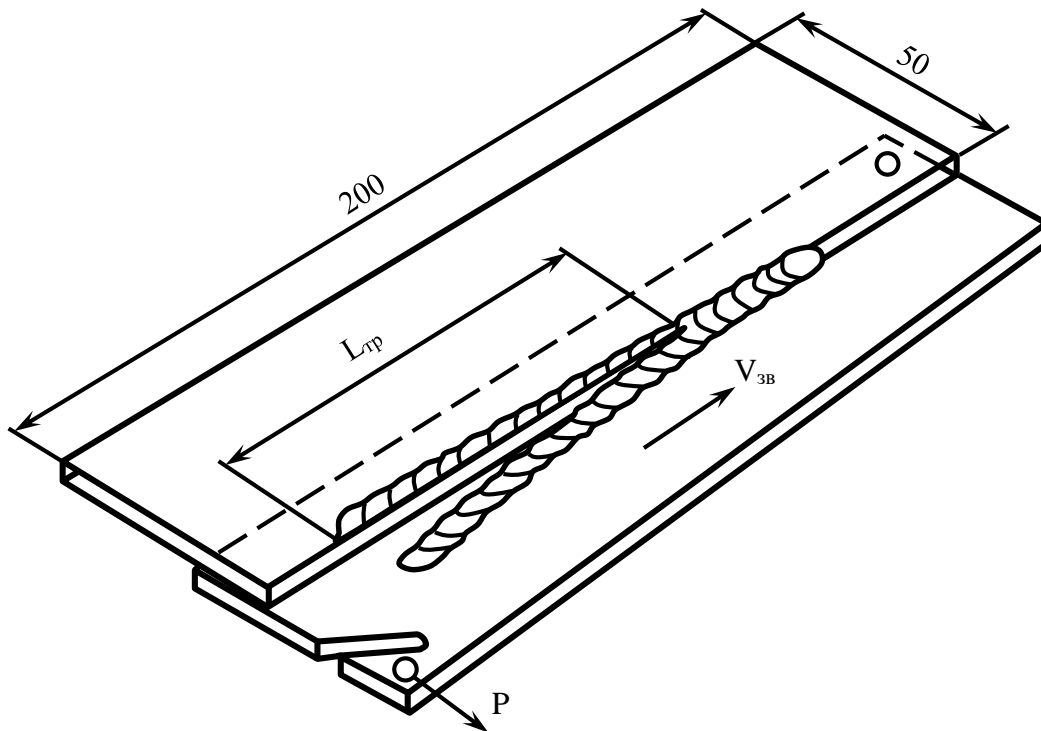


Рисунок 11.3 – Випробувальний зразок

Обладнання, пристрої та матеріали

1. Пристрій для утворення деформацій у шві при кристалізації металу.
2. Зварювальний трактор, зразки зі сталі, секундомір, лінійка.

Порядок виконання роботи

1. Познайомитися з пристроєм для створення деформацій у шві при кристалізації металу.
2. Визначити кутову швидкість обертання зварювального зразка.
3. Ознайомитися з органами керування зварювального автомата.
4. Зробити налаштування автомата і вибрати оптимальний режим зварювання.
5. Зібрати зразки під зварювання.
6. Зварити зразки, що піддаються розтягуванню.
7. Визначити критичний темп деформації і оцінити опірність металу зварного шва утворенню гарячих тріщин.

Контрольні питання

1. Що називається технологічної міцністю?
2. Гарячі тріщини при зварюванні. Причини їх утворення.
3. Наведіть приклади утворення значних деформацій подовження металу, що кристалізується, у процесі зварювання.
4. Як змінюється пластичність металу при зміні температури?
5. Що називають темпом деформації?
6. У чому сутність випробувань зварних з'єднань при визначенні стійкості до утворення гарячих тріщин?

12 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 12

ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ НАПЛАВЛЕНОГО МЕТАЛУ ДО УТВОРЕННЯ ХОЛОДНИХ ТРІЩИН

Мета роботи: вивчення механізму утворення холодних тріщин, освоєння методики оцінювання стійкості сплавів до утворення холодних тріщин на технологічній пробі.

Загальні вказівки

Однією з причин порушення технологічної міцності є утворення холодних тріщин. Уявлення про природу холодних тріщин ґрунтуються на гартівній і водневій гіпотезах. В основу цих гіпотез покладено теорію крихкого руйнування Гріффітса, що припускає існування в металі готових зародкових тріщин. У даний час для пояснення холодних тріщин залучається механізм уповільненого руйнування, тобто руйнування при статичному навантаженні і кімнатній температурі. Для опису процесу зародження тріщин використовують схему Зінера. Відповідно до цієї схеми прослизання на межі зерен, де діють дотичні напруження, призводить до концентрації напруг, що розтягують, на межах, перпендикулярних осі напруг, що і створює тріщину на стику зерен.

Аналіз накопичених практикою результатів показує, що інтенсивному утворенню холодних тріщин при температурах, близьких до кімнатної, в першу чергу сприяють підвищення температури гартування, швидкості охолодження, напруги і їх концентрація. Для оцінювання стійкості сталі до утворення холодних тріщин застосовуються методи кількісної оцінки та технологічні проби.

Методи кількісного оцінювання опору зварних з'єднань утворенню холодних тріщин засновані на теорії сповільненого руйнування і передбачають механічні випробування зварних зразків з основного металу, оброблених по циклу навколошовної зони. Випробування ці досить складні і вимагають спеціального обладнання і великих витрат часу.

Перевага випробувань на технологічних пробах, у порівнянні з кількісними методами випробувань, полягає в можливості детально моделювати увесь технологічний процес і, отже, судити про опір утворенню холодних тріщин в умовах, близьких до реальних. У більшості випадків проби являють собою жорстке закріплення зварювальних елементів тієї чи іншої форми. Однак спроби не характеризують запас технологічної міцності, а придатні лише для порівняльної оцінки матеріалів.

Технологічну міцність матеріалів оцінюють за наявністю або відсутністю тріщин у пробах, за відносною протяжністю появи першої тріщини.

Для попередньої оцінки схильності легованих сталей до утворення холодних тріщин використовують розрахункове значення еквівалента вуглецю C_e . У цих розрахунках враховується негативний вплив легуючих

елементів подібно збільшенню вмісту вуглецю в сталі. Найбільше застосування знайшла формула, запропонована Міжнародним інститутом зварювання (IIW):

$$C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + (V + Ti + Nb)}{5} + \frac{Cu + Ni}{15} + 5B \quad (12.1)$$

де С, Мn, Cr, Мо, V, Ti, Nb, Ni, Cu, В – зміст відповідних елементів, %.

Найбільший вплив на утворення холодних тріщин надають марганець і хром.

Сталі, в яких еквівалент вуглецю менш 0,45 %, не схильні до утворення холодних тріщин і зварюються без обмежень. У разі якщо еквівалент вуглецю знаходиться в межах 0,45...0,75 % – для зменшення швидкості охолодження і запобігання утворенню гартівних структур слід використовувати попередній підігрів, а при більшому значенні і супутній. Температура підігріву розраховується за формулою

$$T_{nid} = 350\sqrt{C_e - 0,25}. \quad (12.2)$$

Для розрахунку еквівалента вуглецю використовується також ряд інших методик. Метод Сеферіана враховує товщину деталей, що зварюються:

$$\begin{aligned} C_e &= C + \frac{Mn + Cr}{9} + \frac{Ni}{18} + \frac{Mo}{13}, \\ C'_e &= 0,005 \cdot \delta \cdot C_e, \\ C''_e &= C_e + C'_e \end{aligned} \quad (12.3)$$

Температура підігріву розраховується за формулою (12.2) в залежності від C''_e .

Японська методика визначення еквівалента вуглецю при зварюванні з'єднань з обробленням (X, V, U) – типу, крім товщини деталей враховує також жорсткість з'єднання та вміст дифузійного водню:

$$P_w = C + \frac{Si + Mn + Cr + Ni + Cu}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B + \frac{[H]}{60} + \frac{K_0 \cdot \delta}{40 \cdot 10^3}, \quad (12.4)$$

де [H] – вміст дифузійного водню, см³/100 г;

K₀ – коефіцієнт жорсткості з'єднання;

δ – товщина деталей, мм.

Обладнання, пристрої та матеріали

1. Пост ручного дугового зварювання. Проби з кільцевою канавкою з різних матеріалів (Ст3, 15ХСНД, 09Г2С та інші).

2. Електроди з різними механічними властивостями і хімічним складом (УОНИ-13/55, ЦЛ-11, Т-590, Т-620, Сормайт і інші).

3. Шліфувальна машина. Клеймо з цифрами, молоток. Реактиви для виявлення макро- і мікроструктури. Мікроскоп. Відрізний, фрезерний, шліфувальний верстати.

Робоче завдання

1. Провести випробування на кільцевій пробі з канавкою при зварюванні різних сталей різними зварювальними матеріалами, до складу яких входять легуючі (С, Cr, Ni, Mo, W, Mn, Si) і мікролегуєчі (Y, Ce і інші) елементи.

2. Проаналізувати отримані матеріали і зробити висновок про їхню стійкість проти утворення холодних тріщин.

Порядок виконання роботи

1. На підготовлених під зварювання зразках із кільцевою канавкою за задалегідь підібраним режимом провести зварювання (рис. 12.1). Режим зварювання: $I_{зв} = 200...220$ А, $U_d = 30...36$ В. Марка електрода задається викладачем.

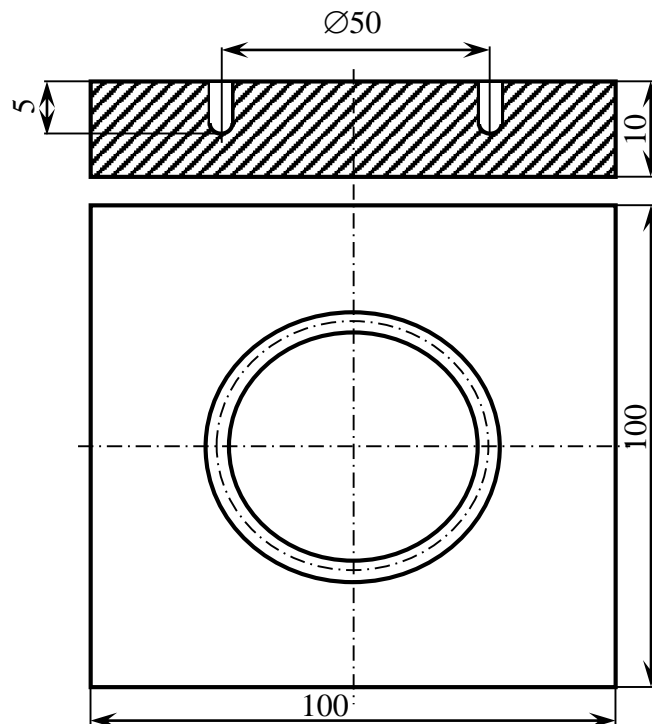


Рисунок 12.1 – Розміри і форма проби з кільцевою канавкою

Зварювання виконується за трьома варіантами:

- 1) зразок перед зварюванням підігрівають у печі до $T = 473...523$ К. Після зварювання охолоджують на повітрі;
- 2) зварюють при кімнатній температурі й охолоджують на повітрі;
- 3) зварюють при кімнатній температурі й охолоджують проточною водою.

2. Аналогічну серію експериментів виконати для іншого основного металу при зварюванні електродом іншого хімічного складу.

3. Після повного охолодження зразків шліфувальною машиною обробити їх поверхню. Потім зразки протравить реактивом для виявлення макро- і мікроструктури. Після чого виміряти довжину тріщин на кожному зразку.

Оброблення результатів експерименту

1. Розрахувати еквівалент вуглецю C_e для наплавленого металу і визначити необхідність в попередньому підігріві.

$$C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + (V + Ti + Nb)}{5} + \frac{Cu + Ni}{15} + 5B,$$

де $C, Mn, Cr, Mo, V, Ti, Nb, Ni, Cu, B$ – вміст відповідних елементів, %.

2. Розрахувати, за необхідності, температура підігріву за формулою (12.2)

3. Порівняти результати розрахунків з експериментальними даними і зробити висновок про стійкість наплавлених зразків до утворення холодних тріщин.

Контрольні питання

1. Що таке технологічна й експлуатаційна міцність конструкції?
2. У чому відмінності між кристалізаційними (гарячими) і холодними тріщинами?
3. Який характер пружно-пластичних деформацій, що виникають в металі шва при дуговому зварюванні?
4. Основні причини виникнення холодних тріщин при зварюванні.
5. Яка роль водню в утворенні холодних тріщин при зварюванні?
6. Як впливають різні елементи термічного циклу при зварюванні на кінцеву структуру і виникнення холодних тріщин?
7. Як пояснюється механізм утворення холодних тріщин при зварюванні з залученням теорії сповільненого руйнування?
8. Які шляхи підвищення технологічної міцності зварних з'єднань?
9. Які чинники підвищують схильність сталі до утворення холодних тріщин?

13 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 13

ДОСЛІДЖЕННЯ БУДОВИ ЗОНИ ТЕРМІЧНОГО ВПЛИВУ СТАЛЕВИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ

Мета роботи: дослідити особливості структури різних ділянок зони термічного впливу (ЗТВ) зварних з'єднань з низьколегованої сталі. Дослідити вплив способів і режимів зварювання на розмір і будову ЗТВ. Дослідити вплив хімічного складу сталей на мікроструктуру і твердість ЗТВ.

Короткі теоретичні відомості

Зоною термічного впливу називають частину основного металу навколо шва, в якому під дією термічного циклу зварювання відбуваються структурні перетворення. У сталях структура може змінюватися в широкому інтервалі температур. Так, під час зварювання загартованої (наклепаної) сталі при температурах вище 500 °С у ній будуть відбуватися процеси рекристалізації, а якщо зразки були загартовані, то процеси старіння і відпуску матимуть місце навіть при 100...150 °С. У разі рівноважного стану металу зміна структури при зварюванні відбувається лише при нагріванні вище A_{C1} .

Як і при звичайному термообробленні, структура ЗТВ залежить від ряду факторів: хімічного складу сталей і її вихідної структури, швидкості нагріву, максимальної температури нагріву, часу знаходження в аустенітному стані, швидкості охолодження в температурному інтервалі перетворення аустеніту. Але термічне оброблення під дією зварювання, порівняно з пічним, має ряд специфічних особливостей. По-перше, при зварюванні спостерігаються значно вищі швидкості нагріву, які можуть досягати декількох сотень градусів у секунду. Це призводить до помітного зсуву критичних точок A_{C1} і A_{C3} до більш високих температур; одночасно, як правило, розширюється і інтервал температур $A_{C1}-A_{C3}$. По-друге, максимальні температури нагріву в ЗТВ досягають температури плавлення, у той час як при звичайному термообробленні лише на 30...50 °С перевищує точку A_{C3} . Висока температура нагріву викликає інтенсивне зростання зерен аустеніту. По-третє, при зварюванні дуже малий час знаходження сталі в аустенітному стані (від часток до кількох десятків секунд), що призводить до значної фізичної і хімічної неоднорідності сталей.

Швидкість охолодження металу ЗТВ в температурному інтервалі перетворення аустеніту того ж порядку, як і при термообробленні. Залежно від товщини металу, способу і режиму зварювання діапазон $A_{C1}-A_{C3}$ і швидкостей охолодження може охоплювати як режим загартовування, так і нормалізації.

Таким чином, найбільш суттєві відмінності в параметрах термічних циклів між пічним термообробленням і зварюванням мають місце до початку перетворення аустеніту.

У маловуглецевої сталі ЗТВ, подібно основному металу, має феритно-перлітну структуру, але відрізняється від нього формою і розмірами зерен. За характером структури можна виділити три характерних ділянки в зоні термічного впливу: неповної перекристалізації, нормалізації і перегріву.

Ділянка неповної перекристалізації – це частина ЗТВ, в якій максимальні температури нагріву відповідають інтервалу $A_{C1}-A_{C3}$. Після подальшого охолодження виходить неоднорідна феритно-перлітна структура, яка складається з відносно великих зерен фериту, які не пройшли перекристалізацію, і розміщених навколо них ділянок дрібних зерен фериту і перліту, що утворилися з аустеніту.

Унаслідок значної різнозернистості ділянка неповної перекристалізації має гірші механічні властивості, ніж основний метал.

У ділянці нормалізації при нагріванні виходить дрібнозернистий аустеніт. Після наступної перекристалізації при охолодженні виходить дрібна рівноважна феритно-перлітна структура з високими механічними властивостями. Максимальні температури нагріву цієї ділянки обмежені з одного боку критичною точкою A_{C3} , а з іншого – температурою початку інтенсивного росту зерна аустеніту $T_{пир}$. Температура $T_{пир}$ в основному залежить від хімічного складу і способу виплавки сталі, які визначають схильність до зростання зерна аустеніту, і від швидкості нагріву. Для вуглецевих сталей при більшості способів зварювання $T_{пир} = 1\ 100...1\ 200\ ^\circ\text{C}$. Для низьколегованих сталей з сильними карбідоутворюючими елементами вона, як правило, вище.

При нагріванні в інтервалі температур $T_{пир}-T_{пл}$ відбувається інтенсивний ріст аустенітних зерен. Продукти розпаду (ферит і перліт), що утворюються при подальшому охолодженні, також грубозернисті. Досить часто, особливо при газовому зварюванні, структура і грубозерниста, і відманштеттова.

Частина ЗТВ, яка прилягає до зварного шва і має грубозернисту структуру, називається ділянкою перегріву. Тут найнижчі механічні властивості, особливо ударна в'язкість.

При зварюванні сталей з великим вмістом вуглецю або легуваних сталей зміна мікроструктури під дією термічного циклу значно істотніше. В цьому випадку в ЗТВ часто утворюються структури гартування – сорбіт, троостит, бейніт, мартенсит, зокрема, найбільша кількість мартенситу зустрічається на ділянці перегріву. Це пояснюється тим, що зі збільшенням розміру зерен аустеніту і зростанням їх гомогенності (однорідності) підвищується стабільність структури, а значить, і схильність до гартування. Як правило, для цієї ділянки ЗТВ критична швидкість гартування $V_{кр}$ менше, ніж при звичайному термообробленні, але для сталей з сильними карбідоутворюючими елементами вона може бути і вище. Для ділянок нормалізації і неповної перекристалізації $V_{кр}$ значно вище, ніж при термообробленні, що сприяє утворенню більш рівноважних структур. При зварюванні

сталей, що гартуються, в ЗТВ помітно зростає твердість і знижуються пластичні властивості, і дуже часто утворюються холодні тріщини.

Розміри ЗТВ залежать від багатьох факторів, але в основному визначаються способом і режимом зварювання, зокрема погонною енергією. Вони можуть змінюватися від часток міліметра при електронно-променевому зварюванні до декількох сантиметрів при електрошлаковому та газовому зварюванні.

Слід зазначити, що різких меж між окремими ділянками ЗТВ не існує, спостерігається плавний поступовий перехід від однієї структури до іншої.

Робоче завдання

1. Дослідити будову і властивості ЗТВ зварних з'єднань з маловуглецевої сталі і сталі, що гартується.
2. Визначити твердість різних ділянок ЗТВ.
3. Вивчити вплив способів і режимів зварювання на розміри, мікроструктуру і твердість ЗТВ.

Обладнання, пристрої та матеріали

1. Зварювальний автомат, флюс, зварювальний дріт.
2. Пластини з маловуглецевої сталі і сталі, що гартується.
3. Відрізний, фрезерний, шліфувальний верстати. Шліфувальна машина. Клеймо з цифрами, молоток. Реактиви для виявлення макро- і мікроструктури.
4. Мікроскоп, твердомір.

Порядок виконання роботи

1. На мікрошліфах зварних з'єднань визначити лінійні розміри ЗТВ.
2. Дослідити будову ЗТВ зварних з'єднань з маловуглецевої сталі.
3. Дослідити будову ЗТВ зварних з'єднань зі сталей, що гартуються.
4. Визначити твердість різних ділянок ЗТВ.
5. Проаналізувати вплив способів і режимів зварювання на розміри, мікроструктуру і твердість ЗТВ.
6. Проаналізувати вплив хімічного складу сталей на будову і властивості ЗТВ.

Контрольні питання

1. Що являє собою зона термічного впливу в сталевих зварних з'єднаннях?
2. Особливості термічних циклів зварювання.

3. Охарактеризуйте будову ЗТВ у зварних з'єднаннях із маловуглецевої сталі.
4. Розкажіть про зміну структури і механічних властивостей ділянки неповної перекристалізації у зварних з'єднаннях з маловуглецевої сталі.
5. Розкажіть про зміну структури і механічних властивостей у ділянці нормалізації у зварних з'єднаннях з маловуглецевої сталі.
6. Розкажіть про зміну структури і механічних властивостей в ділянці перегріву у зварних з'єднаннях з маловуглецевої сталі.
7. Особливості будови ЗТВ у зварних з'єднаннях зі сталей, що гартуються.

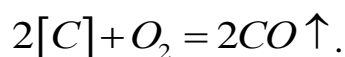
14 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 14

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТАЛУРГІЙНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ АВТОМАТИЧНОМУ ЗВАРЮВАННІ ПІД ШАРОМ ФЛЮСУ

Мета роботи: експериментальне дослідження кремне- і марганцевідновлювальних процесів при автоматичному зварюванні сталей під шаром флюсу.

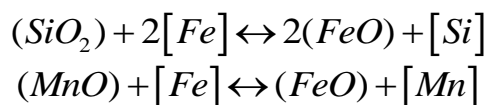
Загальні вказівки

Кипляча маловуглецева сталь, яка широко використовується для виготовлення металоконструкцій, містить кремнію – до 0,03 % (сліди), марганцю – від 0,30 до 0,50 % (сталі марок МСт1, МСт2, МСт3), кисню – від 0,2 до 0,04 %. Відсутність інших сильних розкислювачів у такій сталі призводить до того, що при високій температурі у зварювальній ванні і на електродному дроті, який розплавляється, відбувається інтенсивне окислення вуглецю за реакцією:



Оскільки реакція окислення вуглецю продовжується в задній (хвостовій) частині зварювальної ванни, що кристалізується, з утворенням нерозчинного в металі газу, у звареному шві можуть виникнути пори. Щоб запобігти процесу пороутворення через окислення вуглецю, необхідно мати у зварювальній ванні 0,1...0,2 % кремнію, який пригнічує реакцію окислення вуглецю в період кристалізації ванни (тобто є в цих умовах більш сильним розкислювачем, ніж вуглець).

Для попередження гарячих (кристалізаційних) тріщин при зварюванні маловуглецевих сталей в металі шва повинно бути не менше 0,6...0,8 % марганцю. Необхідний приріст кремнію (0,1...0,2 %) і марганцю (0,2...0,5 %), в порівнянні з їх вмістом в основному металі, можна забезпечити за рахунок застосування електродного дроту, легованого даними елементами. Однак при зварюванні киплячих маловуглецевих сталей це економічно і технологічно більш доцільно виконати за рахунок застосування висококременистого високомарганцевистого флюсу. У цьому випадку перехід кремнію і марганцю зі шлаку в метал здійснюється за рахунок кремне- і марганцевідновлювальних процесів за реакціями:



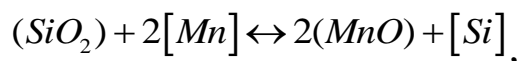
Перехід кремнію в шов у значній мірі залежить від вмісту двоокису кремнію у флюсі. Якщо зварювання виконується звичайними маловуглеце-

вими дротами Св-08 або Св-08А, які містять лише сліди кремнію, то для отримання в наплавленого металі 0,1...0,2 % кремнію, вміст SiO_2 у флюсі має становити не менше 40 %, тобто флюси повинні бути висококременистими, кислими.

Для забезпечення в металі шва марганцю в кількості 0,6...0,8 % при зварюванні киплячої сталі маловуглецевим дротом флюс повинен містити не менше 35 % закису марганцю MnO .

Отже, при зварюванні киплячої маловуглецевої сталі маловуглецевим зварювальним дротом, щоб уникнути утворення пор і гарячих тріщин, треба застосовувати висококременисті високомарганцевисті флюси.

При вмісті у флюсі одночасно окислів марганцю і кремнію буде протікати реакція:



константа рівноваги якої буде дорівнює:

$$K = \frac{(\text{MnO})^2 [\text{Si}]}{[\text{Mn}]^2 (\text{SiO}_2)}.$$

Якщо припустити, що протікання реакції мало змінить вміст MnO і SiO_2 в шлаку, то можна вважати, що:

$$K' = \frac{[\text{Si}]}{[\text{Mn}]^2},$$

або

$$[\text{Si}] = K' [\text{Mn}]^2.$$

Звідси випливає, що підвищення вихідної концентрації кремнію у зварювальній ванні повинно привести до більш енергійного відновлення марганцю.

Обладнання, пристрої та матеріали

1. Автомат для зварювання під флюсом і вимірювальними приладами і джерелом живлення.

2. Твердомір ТШ-2 з мікроскопом оптичним МПБ-2. Наждакове точило. Свердлильний верстат (з максимальним діаметром свердла до 8 мм). Вимірювальний і слюсарний інструмент, клейма цифрові сталеві.

3. Зразки сталеві 250x80 мм завтовшки від 8 до 12 мм. Флюси декількох марок: а) високо кремисті високомарганцевисті (типу АН-348А, ОСЦ-45); б) слабоокислювальні низькокремністі, що містять в підсумку не більше 30 % оксидів кремнію, марганцю (наприклад, ФЦ-П, АН-20, АН-22 та інші); в) низькокремністі сильноокислювальні флюси (типу АН-17, АН-17М). Зварювальні дроти декількох марок діаметрами від 2 до 4 мм (Св-08А, Св-08ГА, Св-08Г2СА і інші).

4. Секундомір. Ваги лабораторні (до 5 кг) з важками.

Порядок виконання роботи

1. Зібрати електричний ланцюг для зварювання автоматом.

2. Підібрати режими зварювання і зробити п'ятишарове наплавлення валиків на зразки.

Примітка. Склад металу шва залежить, в першу чергу, від складу основного і електродного (присадкового) металів і від частки участі основного металу в металі шва. Щоб зменшити кількість факторів, що впливають на остаточні результати, при дослідженні процесу відновлення кремнію і марганцю з флюсу необхідно аналізувати склад наплавленого металу, а не металу шва. Для цього слід провести наплавлення не менше ніж у 4...5 шарів.

3. Прошліфувати зовнішню поверхню і визначити твердість НВ наплавленого шару твердоміром ТШ-2.

4. Визначити хімічний склад наплавлення за допомогою спектрального або хімічних аналізів. При цьому потрібно визначити вміст у наплавленні трьох основних хімічних елементів: вуглецю, марганцю, кремнію.

5. Дослідити вплив вмісту двоокису кремнію SiO_2 і закису марганцю MnO у флюсі на перебіг кремне- і марганцевідновлювального процесу.

6. Дослідити вплив режиму на розвиток кремне- і марганцевідновлювального процесу.

7. Визначити вплив режиму зварювання на величину відносної ваги розплавленого флюсу.

8. Отримані дані внести в табл. 14.1.

Таблиця 14.1 – Результати дослідження металургійних процесів при зварюванні під флюсом

№ шару	Марка флюсу	Марка електродного дроту	Режим зварювання		Хімічний склад, %			Твердість HRC
			$I_{зв}, A$	$U_{д}, B$	C	Si	Mn	

Оброблення результатів експерименту

1. Розрахувати зміну вмісту наведених елементів у наплавленні в порівнянні з вмістом їх у дроті:

$$\Delta[R] = [R_n] - [R_{др}],$$

де $[R_n]$ – вміст елемента R в наплавленні, %;

$[R_{др}]$ – вміст елемента R в дроті, %.

Якщо $\Delta[R] > 0$, це свідчить про відновлення даного елемента з флюсу і легуванні їм наплавленого металу. Якщо $\Delta[R] < 0$, це говорить про вигорання і випаровування даного елемента зі зварювальної ванни або на стадії розплавленої краплі, що знаходиться на кінці присадковго дроту. При $\Delta[R] = 0$ можна зробити висновок про нейтральний характер впливу газової або шлакової фази на металеву фазу.

2. Крім хімічного складу металу і шлаку на інтенсивність протікання кремне- і марганцевідновлювальних процесів впливає і режим зварювання. Зі зміною режиму зварювання змінюється відносна маса розплавленого флюсу, тобто відношення розплавленого флюсу до розплавленого металу. При наплавленні часткою основного металу, який проплавляється, можна знехтувати, тоді відносна маса ψ розплавленого флюсу буде дорівнювати:

$$\psi = \frac{g_{фл}}{g_e},$$

де g_e – кількість розплавленого електродного дроту;

$g_{фл}$ – кількість розплавленого флюсу.

Вагу розплавленого флюсу визначають за вагою шлакової кірки $P_{шл}$ і її довжині $l_{шл}$:

$$g_{фл} = \frac{P_{шл}}{l_{шл}} V_{зв},$$

де $V_{зв}$ – швидкість зварювання, см/с.

Вагу розплавленого електродного металу можна визначити за швидкістю його подачі $V_{пд}$:

$$g_e = V_{пд} \cdot \rho \cdot \frac{\pi d_{ел}^2}{4},$$

де ρ – щільність металу, г/см³;

$d_{ел}$ – діаметр електродного дроту, см.

Більшій напрузі дуги відповідає і відносно більша кількість розплавленого флюсу – шлаку, що припадає на одиницю ваги рідкого металу, що підсилює дію між флюсом – шлаком і металеву ванною.

Збільшення струму дуги призводить до її поглиблення, збільшення кількості електродного металу, який розплавляється, тобто зменшує відносну вагу шлаку.

3. На підставі отриманих даних побудувати графіки залежності твердості наплавленого металу від режиму зварювання, вмісту елементів в металі шва або їх оксидів у флюсі. Проаналізувати залежність відносної ваги розплавленого флюсу від режиму зварювання.

Контрольні питання

1. При якому вмісті закису марганцю у флюсі останній іменується високомарганцевистим?

2. При якому змісті двоокису кремнію у флюсі останній іменується висококремнистим?

3. Скільки кремнію міститься в киплячій маловуглецевій сталі?

4. Скільки марганцю міститься в киплячій маловуглецевій сталі?

5. З якою метою необхідно вводити кремній у зварювальну ванну при зварюванні маловуглецевої киплячій сталі?

6. З якою метою необхідно легувати зварювальну ванну марганцем при зварюванні маловуглецевої киплячій сталі?

7. Яку мінімальну кількість кремнію необхідно ввести у зварювальну ванну при зварюванні маловуглецевої киплячій сталі, щоб запобігти утворенню пор в металі шва?

8. Яку мінімальну кількість марганцю необхідно ввести у зварювальну ванну, щоб запобігти утворенню гарячих тріщин в металі шва?

9. Який вміст двоокису кремнію необхідно мати у флюсі, щоб отримати приріст кремнію 0,1...0,2 % в наплавленні при зварюванні киплячої сталі дротом Св-08А?

10. Який зміст закису марганцю треба мати у флюсі, щоб отримати приріст марганцю в наплавленні не менше 0,3...0,4 % при зварюванні киплячої сталі дротом Св-08А?

11. Що таке відносна вага розплавленого флюсу?

15 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 15 ОЦІНКА РІВНОМІРНОСТІ ШЛАКОВОГО ПОКРИТТЯ НАПЛАВЛЕНОГО ВАЛИКА

Мета роботи: визначити зварювально-технологічні характеристики електродних матеріалів на основі оцінки здатності шлаків рівномірно покривати наплавлений метал.

Загальні вказівки

Основні функції зварювальних шлаків – ізоляція розплавленого металу від повітря, формування шва, металургійне оброблення розплавленого металу (його розкислення і легування).

Якість виконання цих функцій багато в чому залежить від криючої здатності шлаку, що утворюється при плавленні різних електродних матеріалів. Ця здатність шлаків залежить від фізико-хімічних властивостей, до яких відносяться температура плавлення, в'язкість, поверхневий натяг.

Зварювальні шлаки являють собою багатокомпонентні системи з різними температурними інтервалами кристалізації. Кислі шлаки є переохолодженими рідинами, що не мають певних температур плавлення. При підвищенні температури в'язкість таких шлаків падає поступово. У цьому випадку шлакова кірка виходить товстою і розміщена, в основному, у центрі валика (рис. 15.1).

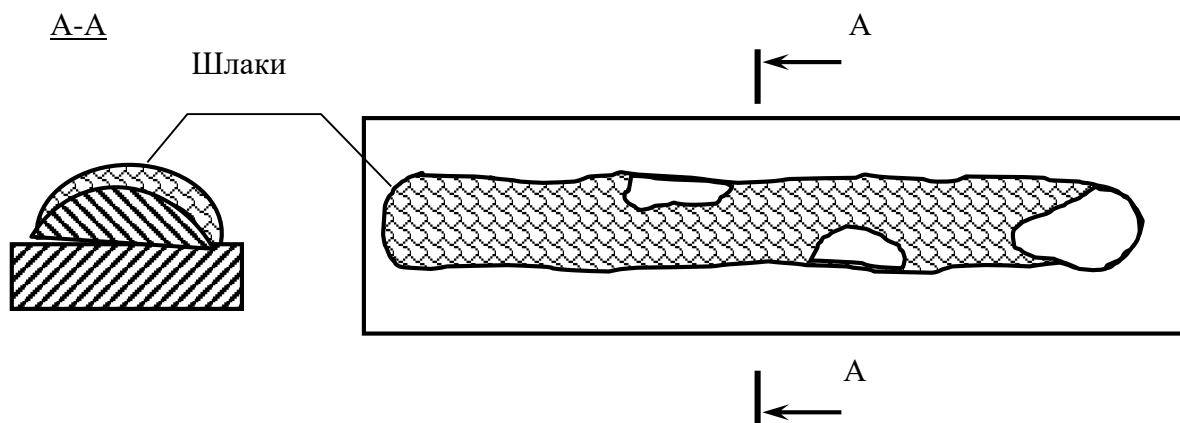


Рисунок 15.1 – Можливе розташування шлакової кірки при використанні кислих шлаків

Основні шлаки за характером зміни в'язкості залежно від температури відносять до «коротких». При підвищенні температури в'язкість шлаків різко знижується, шлакова кірка виходить тонкою, стікає по краях валика і тому не забезпечує необхідної якості захисту зварювальної ванни (рис. 15.2).

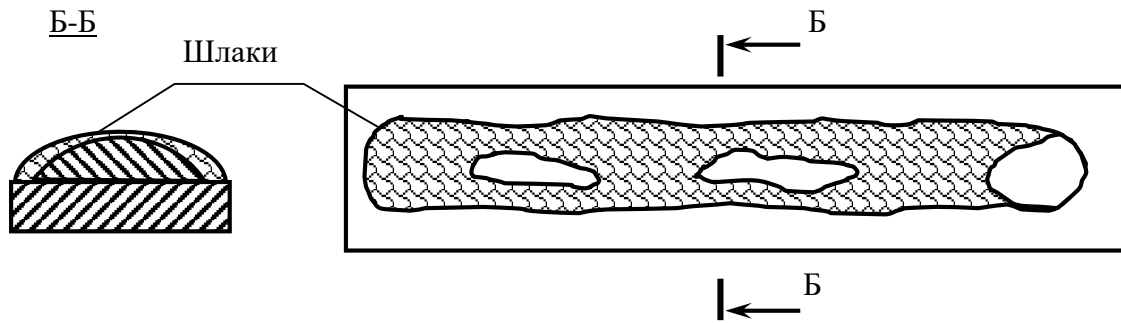


Рисунок 15.2 – Можливе розташування шлакової кірки при використанні основних шлаків

Для оцінювання криючої здатності шлаку застосовують спосіб, при якому піддослідними електродними матеріалами проводиться наплавлення валика на пластину без коливань і рівномірність покриття шлакової кірки оцінюють на рівні експертних оцінок: рівномірне покриття, нерівномірне покриття. Однак суб'єктивність і відсутність кількісної оцінки, характерні для даного способу, не дозволяють порівнювати результати, отримані в різних умовах.

Більш надійною і точною виходить оцінка криючої здатності зварювального шлаку, який утворюється при використанні зварювальних матеріалів, що містять шлакоутворювальні компоненти, при застосуванні іншого способу. Відповідно до цього способу виконують наплавлення валика на пластину з використанням зварювальних матеріалів, які випробовуються, і вимірюють товщину шлакової кірки на вершині наплавленого валика і в місці переходу валика в основний метал і площі поверхонь наплавленого валика і шлаку, а в якості критерію рівномірності покриття металу шлаком приймають вираз:

$$K = \frac{\Delta_1}{\Delta_2} \cdot \frac{S_{ш}}{S_{в}} \quad (15.1)$$

де Δ_1 – товщина шлакової кірки на вершині валика;

Δ_2 – товщина шлакової кірки в місці переходу валика до основного металу;

$S_{ш}$ – площа поверхні шлаку;

$S_{в}$ – площа поверхні валика.

Урахування товщини шлакової кірки на вершині шва і біля основи (місце переходу його в основний метал) обумовлений тим, що ці величини, що залежать від фізико-хімічних властивостей шлаків і режимів зварювання, в основному неоднакові. Для шлаків, що характеризуються високим показником поверхневого натягу і низькою в'язкістю, наприклад коротких, товщина кірки на вершині шва більше, ніж в місці його переходу в основ-

ний метал. Таким чином, захисні властивості шлаків залежать від співвідношення цих величин. Чим ближче це співвідношення до одиниці, тим краще захисні властивості шлаків.

При плавленні різних електродних матеріалів у залежності від режиму наплавлення можуть змінюватися фізичні властивості шлаків, що може привести до появи ділянок шва, не покритих шлаком. Подібне явище можливо при заміні партії газшлакоутворювальних компонентів зварювальних матеріалів в умовах масового виробництва. Наявність цих ділянок свідчить про погіршення захисних властивостей шлаку. У зв'язку з цим важливим є визначення відносної площі валика, покритого шлаком, здійснюване за даними вимірів площі шва і площі шлаку, що покриває валик.

Робоче завдання

1. Оволодіти методикою проведення експерименту.
2. Вивчити вплив шлакової основи на товщину шлакового покриття, площу покриття і показник криючої здатності.

Обладнання, пристрої та матеріали

1. Зварювальний пост постійного струму, обладнаний вимірювальними приладами – вольтметром і амперметром.
2. Епідіаскоп.
3. Мікрометр.
4. Зварювальні флюси 2–3 марок різних шлакових систем. Зварювальний дріт Св-08А.
5. Пластини з низьковуглецевої сталі розміром $(10...12) \times (80...120) \times (200...300)$ мм.

Порядок проведення роботи

1. На сторонній пластині підбирається режим наплавлення, що забезпечує стабільне плавлення електродного матеріалу, гарне формування валика.

2. По черзі провести наплавлення дослідних зразків при використанні флюсів різних шлакових систем, пластини попередньо замаркірувати. Для кожної марки флюсу виконати наплавлення двох валиків.

3. Режим наплавлення контролювати приладами, в всіх випадках режим встановлюється однаковим.

4. Провести виміри площі валика і шлаку, який покриває його.

Для цього слід межі ділянок, вільних від шлаку, покрити барвником, що залишає чіткі відбитки на папері або кальці, після чого щільно накласти на поверхню шва кальку (папір) і окреслити його межі. Потім за допомо-

гою епідіаскопа поверхня шва з відбитками, відповідними ділянкам, вільним від шлаку, переноситься на щільний папір при відповідному збільшенні (наприклад 10:1). Збільшене розгорнуте зображення поверхні зважується на аналітичних терезах, в результаті чого отримують S'_e . Після цього слід видалити відбитки, що відповідають ділянкам, вільним від шлаку, та повторити зважування. Отримуємо S'_u . Відношення $S'_u / S'_e = S_u / S_e$.

5. Легкими ударами молотка зі зворотного боку пластини відокремити шлак з поверхні шва. Провести виміри товщини шлакової кірки по центру валика Δ_1 і у його заснування Δ_2 (рис. 15.3) в п'яти точках кожного наплавлення і взяти середнє значення.

6. Повторити переходи 4 і 5 для всіх складів.

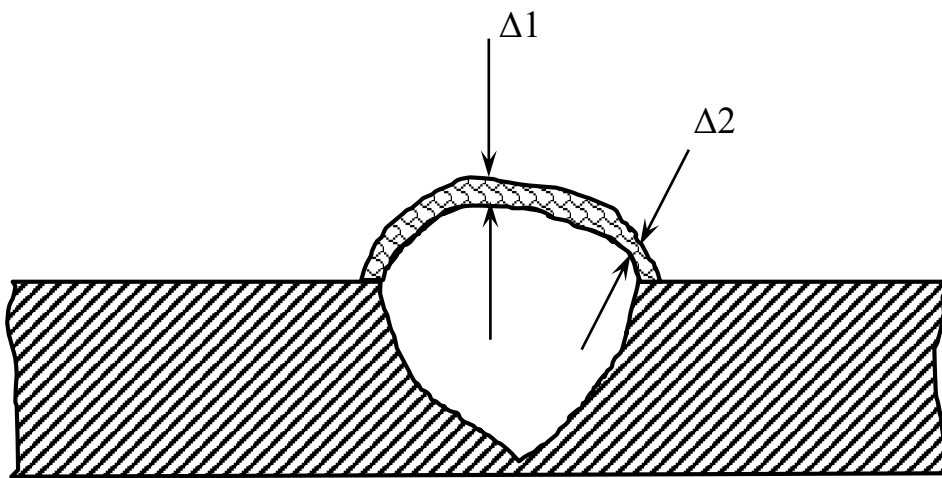


Рисунок 15.3 – Схема вимірювання товщини шлакової кірки

Оброблення результатів експерименту

1. Внести середнє значення відносних товщин Δ_1/Δ_2 і площ до табл. 15.1.

Таблиця 15.1 – Результати експериментів

Електроодні матеріали	Умови дослідуд	Відносна площа шлаку	Товщина шлакової кірки, мм		Показник криючої здатності, К
			Δ_1	Δ_2	

2. Розрахувати показник криючої здатності шлаку за формулою:

$$K = \frac{\Delta_1}{\Delta_2} \cdot \frac{S_{ш}}{S_e}$$

3. Характер графічної інтерпретації та математичного оброблення результатів експерименту залежить від конкретно поставленого завдання.

Контрольні питання

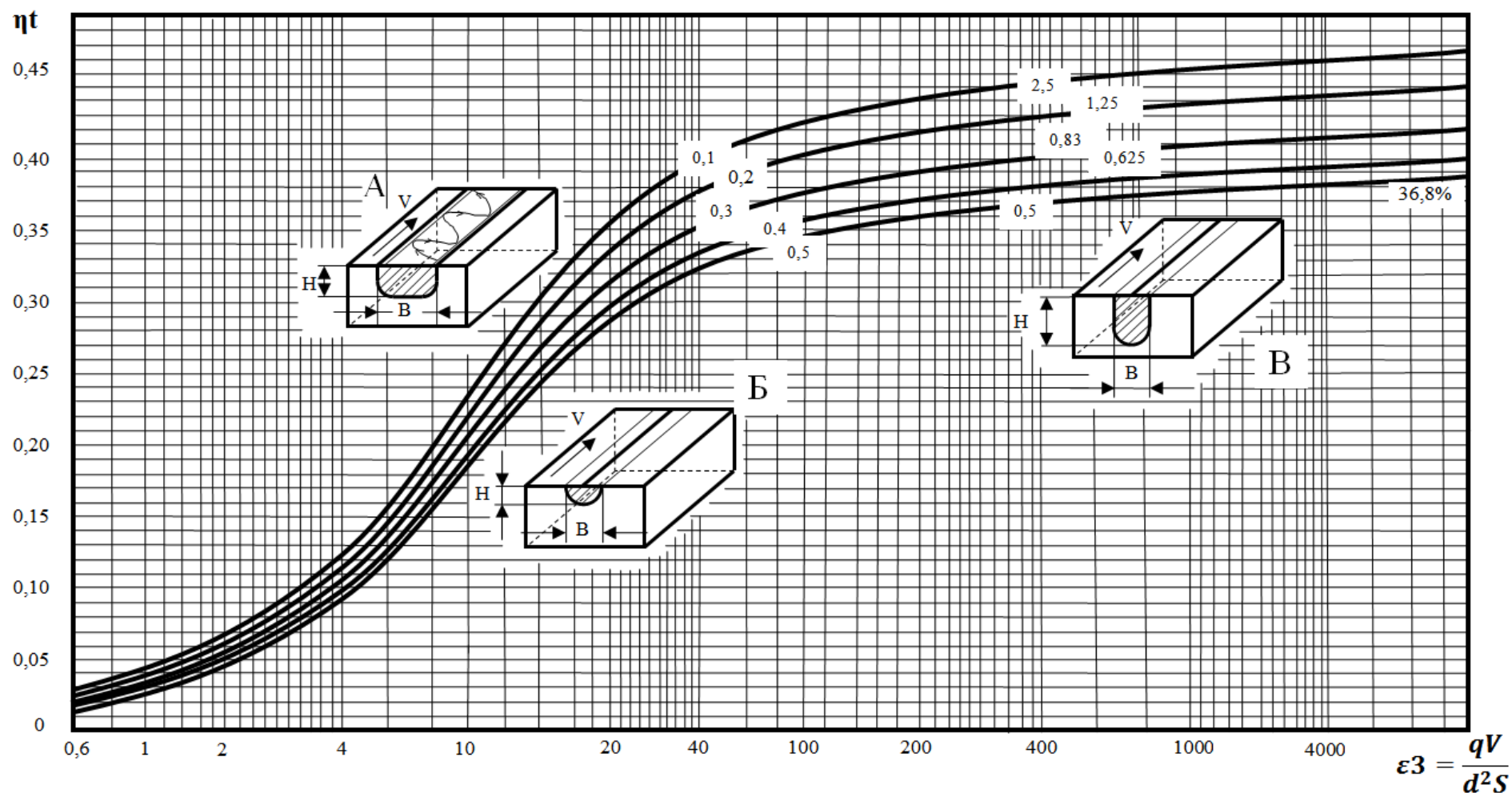
1. Що являють собою зварювальні шлаки?
2. Функції зварювальних шлаків.
3. Будова зварювальних шлаків.
4. Як визначається кислотність зварювальних шлаків?
5. Що таке температурний інтервал плавлення шлаків?
6. Способи визначення температурного інтервалу плавлення.
7. Як впливають властивості зварювальних шлаків на поведінку шлаку при зварюванні?
8. Як визначається криюча здатність шлаку?
9. Рафінування металу зварювальної ванни.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Теорія процесів зварювання : навчальний посібник, Ч. 1. / В. М. Карпенко, О. А. Богуцький, О. Г. Гринь, С. В. Жаріков. – Краматорськ : ДГМА, 2012. – 192 с.
2. **Багрянський, К. В.** Теорія зварювальних процесів / К. В. Багрянський, З. А. Добротіна, К. К. Хренов. – К. : Вища школа, 1976. – 424 с.
3. **Березін, Л. Я.** Теорія зварювальних процесів : навчальний посібник для студентів спеціальності 6.092300 – «Технологія та устаткування зварювання» / Л. Я. Березін, М. М. Хоменко. – Чернігів : НМЦ ВО, 2002. – 268 с.
4. **Підгаєцький, В. В.** Пори, включення і тріщини в зварних швах / В. В. Підгаєцький. – К. : Техніка, 1970. – 224 с.
5. **Грабін, В. Ф.** Металознавство зварювання низько-і середньолегованих сталей / В. Ф. Грабін. – Київ : Наук. думка, 1981. – 280 с.
6. **Квасницький, В. В.** Теорія зварювальних процесів. Дослідження фізико-хімічних і металургійних процесів та здатності металів до зварювання : навчальний посібник / В. В. Квасницький. – Миколаїв : УДМТУ, 2002. – 181 с.
7. **Коперсак, В. М.** Теорія процесів зварювання-1. Джерела нагрівання та теплові процеси при зварюванні : текст лекцій / В. М. Коперсак. – Київ : НТУУ «КПІ», 2011. – 384 с.
8. **Деєв, Г. Ф.** Дефекти зварних швів / Г. Ф. Деєв, И. Р. Пацкевич. – К. : Наукова Думка, 1984. – 208 с.
9. **Роянов, В. О.** Дефекти та якість при зварюванні і споріднених процесах : підруч. для студ. зварюв. та машинобуд. напрямків вищ. навч. закл. / В. О. Роянов, В. Я. Зусін, С. С. Самотугін. – Маріуполь : Рената, 2010. – 226 с. – ISBN 978-966-7329-91-4
10. **Биковський, О. Г.** Довідник зварника / О. Г. Биковський, І. В. Піньковський. – К. : Техніка, 2002. – 336 с. – ISBN 966-575-168-9
11. **Палаш, В. М.** Металознавчі аспекти зварності залізобуглецевих сплавів : навч. посіб. / В. М. Палаш. – Львів : КІНПАТРІ ЛТД, 2003. – 236 с. – ISBN 966-95090-5-X
12. ДСТУ 3491-96 (ГОСТ 30242-97). Державний стандарт України. Дефекти з'єднань при зварюванні металів плавленням. Класифікація, позначення та визначення. – К. : Держстандарт України, 1997. – 14 с.
13. **Негрич, В. В.** Термодинаміка і теплові процеси зварювання / В. В. Негрич, Л. І. Гаєва, Я. М. Дем'янчук – Режим доступу : <http://studcon.org/termodynamika-i-teplovi-procesy-zvayuvannya>
14. **Сливінський, О. А.** Теорія процесів зварювання : лабораторний практикум / О. А. Сливінський, В. М. Коперсак – Режим доступу : chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/56152/3/TPZ_Laboratory_praktykum.pdf

Додаток А

Графік для розрахункового визначення термічного ККД при наплавленні на масивне тіло



*A – розширена зона – $H/B < 0,5$; B – напівкругла зона – $H/B = 0,5$; V – поглиблена зона – $H/B > 0,5$
Рисунок А.1 – Графік для розрахункового визначення термічного ККД при наплавленні на масивне тіло*

Додаток Б
Теплофізичні властивості маловуглецевої сталі

Температура Т, К	Коефіцієнт теплопровідності λ , Дж/(см·с·К)	Питома теплоємність, с, Дж/г·К	Щільність ρ , г/см ³	Коефіцієнт температуропровідності а, см ² /с	Коефіцієнт повної поверхневої тепловіддачі b, Дж/(см ² ·с·К)	Тепломісткість металу S, Дж/г
273	0,640	0,430	7,8	0,186	–	0
473	0,550	0,485	–	0,130	20,0 10 ⁻⁴	109
573	0,505	0,540	–	0,108	27,0 10 ⁻⁴	162
663	0,460	0,595	–	0,093	34,5 10 ⁻⁴	225
773	0,415	0,650	–	0,078	45,0 10 ⁻⁴	292
873	0,375	0,770	–	0,063	57,0 10 ⁻⁴	362,5
973	0,340	0,960	–	0,047	73,0 10 ⁻⁴	437,5
1040	0,330	1,330	–	0,034	95,0 10 ⁻⁴	492
1801 (температура плавлення)	–	–	7,0	–	354,0 10 ⁻⁴	1380 (включаючи приховану теплоту плавлення)

Додаток В
Номограма для розрахунку процесу нагрівання струмом електрода з маловуглецевого сталевого дроту

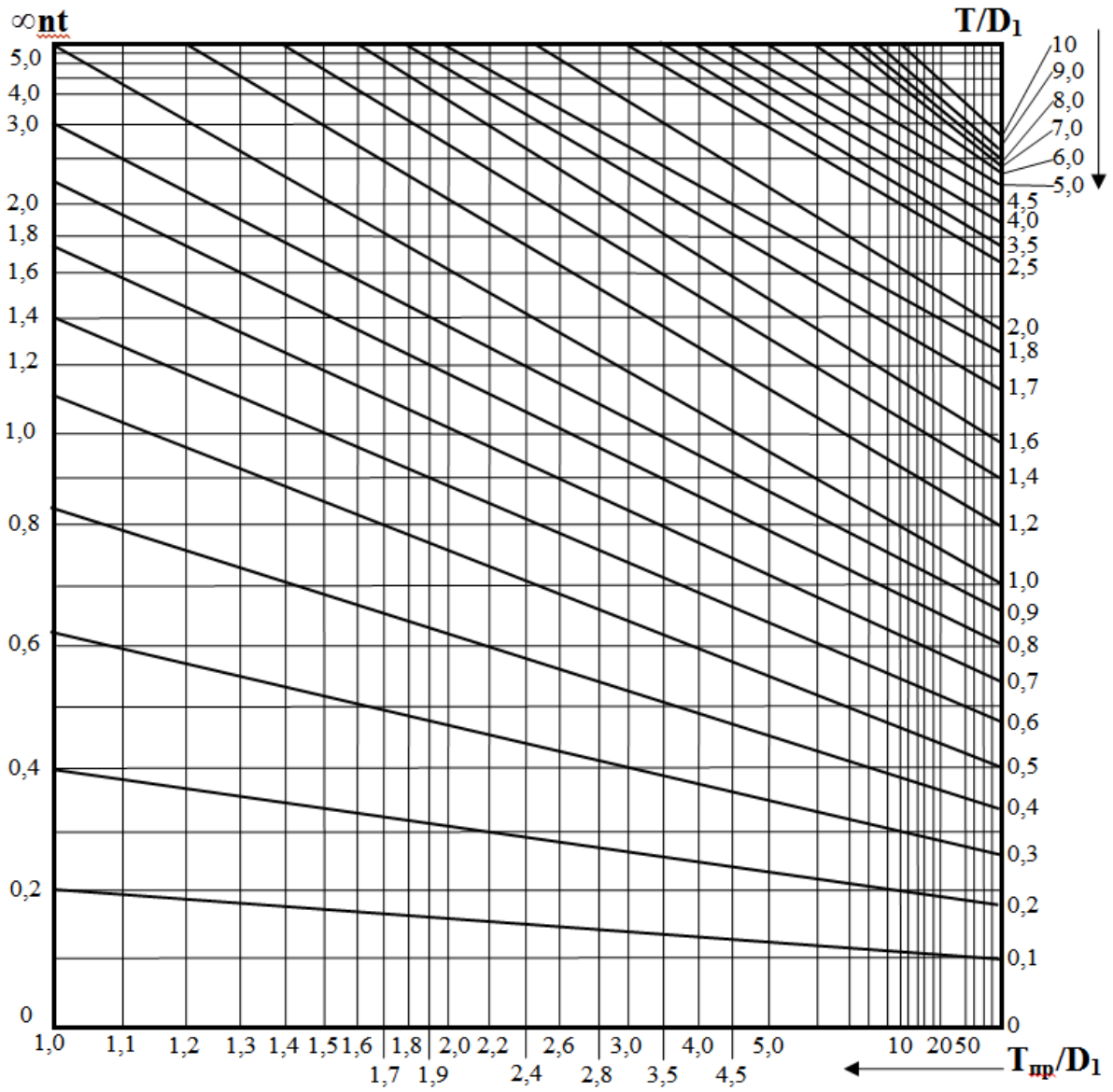


Рисунок В.1 – Номограма для розрахунку процесу нагрівання струмом електрода з маловуглецевої сталевого дроту

Навчальне видання

ЖАРИКОВ Сергій Володимирович,

ГРИНЬ Олександр Григорович,

ГОЛУБ Денис Михайлович

ТЕОРІЯ ПРОЦЕСІВ ЗВАРЮВАННЯ

Практикум до лабораторних робіт

**для здобувачів першого (бакалаврського) рівня
вищої освіти спеціальності 131 «Прикладна механіка»
освітніх програм «Прикладна механіка»,
«Зварювання і споріднені процеси»**

Редагування, комп'ютерне верстання Я. О. Бершацька

42/2023. Формат 60 × 84/16. Ум. друк. арк. 5,55.
Обл.-вид. арк. 6,64. Тираж 100 пр. Зам. № 2.

Видавець і виготівник

Донбаська державна машинобудівна академія
84313, м. Краматорськ, вул. Академічна, 72.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК №1633 від 24.12.2003