

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Донбаська державна машинобудівна академія

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

*до виконання самостійної роботи з дисципліни
«Теорія зварювальних процесів»
для студентів спеціальності 6.050504
«Технології та устаткування зварювання»*

Затверджено
на засіданні кафедри ОіТЗВ
протокол № 20 від 05.06.2012

Краматорськ 2012

УДК 621.791

Методичні вказівки до виконання самостійної роботи з дисципліни “Теорія зварювальних процесів” для студентів спеціальності 6.050504 “технології та устаткування зварювання” / Укл. Карпенко В.М., Богуцький О.А. – Краматорськ, ДДМА, 2012. - 32 с.

Укладачі

Богуцький О.А.

Відповід. за випуск

Макаренко Н.О., проф.

ВСТУП

Особисте завдання з дисципліни «Теорія зварювальних процесів»- один із видів обов'язкової самостійної позааудиторної роботи студентів, яка передбачається навчальною програмою дисципліни.

Курс “Теорія зварювальних процесів” (теоретичні основи зварювання), присвячений вивченню фізичних і фізико-хімічних явищ, що протікають під час зварювання металів. Ця дисципліна є першою і основоположною в підготовці інженера-зварника. Загальна теорія зварювальних процесів знаходиться в стадії розробки.

Розділ “Розрахунки теплових процесів при зварюванні” дає можливість оцінити продуктивність процесу зварювання, вплив параметрів режиму зварювання на протікання зварювальних процесів, визначити оптимальні режими зварювання для заданих властивостей металу шва та навколошовної зони.

Представлені в цій роботі задачі показують, як можливо використовувати теоретичний матеріал курсу “Теорія зварювальних процесів” при розв'язанні практичних задач, виникаючих перед працівниками зварювальної науки і техніки в процесі їх виробничої діяльності не тільки в різних підрозділах науково-дослідного характеру, а й у заводських умовах.

Задачі систематизовані по основним розділам “Розрахунки теплових процесів при зварюванні”.

До розв'язання задач потрібно підступати після вивчення відповідного теоретичного матеріалу теми й знайомства з даними методичними вказівками.

При вивченні теоретичного матеріалу з ціллю перевірки знання потрібно відповісти на основні запитання, зазначені для кожної теми.

ЗАГАЛЬНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ВИБОРУ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ РЕЖИМУ ЗВАРЮВАННЯ

При розв'язанні задач студентам дуже часто потрібно із заданої погонної енергії (чи з інших даних) вибрати режими будь-якого з найбільш розповсюджених способів зварювання плавленням.

Режимом зварювання називається сукупність основних характеристик зварного процесу, що забезпечують отримання зварних швів заданих розмірів, форми та якості.

Параметрами режиму ручного дугового зварювання є діаметр електрода d_e , полярність та величина струму зварювання $I_{зв}$, напруга на дузі U_d . Окрім зазначених параметрів часто необхідно знати число проходів n під час виконання багатошовного зварного шва, площу поперечного перерізу шва, здійсненого за один прохід F_{III} та інше.

Початковою величиною до розрахунку й вибору режиму зварювання є товщина зварних елементів S при зварюванні в стик або катет шва при зварюванні таврових кутових з'єднань.

Відповідно до ДСТУ 5264-80 стикові з'єднання товщиною елементів, що стикуються, $S = 1-6$ мм радять зварювати без розділення кромки. При $S > 6$ мм шви виконуються, як правило, із розділенням кромки і в декілька шарів (проходів).

Площа поперечного перерізу наплавленого металу F залежить від типу шва (при заданій товщині листа згідно з ДСТУ 5264-80).

Визначення режиму зварювання починають із вибору діаметра електрода d_e . Практичні рекомендації з вибору діаметра електрода в залежності від товщини S чи катета K приведені в табл. 1.

Таблиця 1

Товщина деталі при зварюванні встик, мм	1,5-2,0	3,0	4,0-8,0	9,0-12,0	13,0-15,0	16,0-20,0	Більш 20
Діаметр електрода, мм	1,0-2,0	3,0	4,0	4,0-5,0	5,0	5,0-6,0	6,0
Катет шва, мм	3,0		4,0-5,0		9,0		
Діаметр електрода, мм	3,0		4,0		5,0		

Максимальна площа поперечного перерізу одного проходу стикового шва визначається за емпіричними формулами:

- першого проходу

$$F_{H1} = (6 - 8)d_e;$$

- кожного наступного проходу

$$F_H = (8-12)d_e.$$

При зварюванні кутових та таврових з'єднань за один прохід виконуються шви катетом не більш 6 мм (при зваренні “в кут”) і не більш 8 мм (при зваренні “у човник”). Таким чином, загальне число проходів має бути розраховане згідно з формулою

$$n = \frac{F - F_{H1}}{F_H} + 1.$$

При зварюванні багатопрохідних стикових швів перший прохід має бути виконаний електродом діаметром не більш 4,0 мм. Це пов'язано з тим, що засто-

сування електродів більшого діаметра не дозволить в необхідній ступені проникнути в глибину розділки кореня шва. Крім того, бажано отримати перший наплавлений шар як можна меншої площі поперечного перерізу.

Рекомендуємо для даної марки електрода значення зварного струму, його рід та полярність вибирати згідно з паспортом електрода. В більшості випадків належить використовувати постійний струм зворотної полярності. Сила зварювального струму має бути розрахована в залежності від діаметра електрода та допустимого значення густини струму (табл. 2):

$$I_{зв} = \frac{\pi d_e^2}{4} j.$$

Таблиця 2

Тип покриття	Допустиме значення густини струму, А/мм ²			
	3	4	5	6
Діаметр електрода, мм				
Основне (фтористо-кальцієве)	13,0-18,5	10,0-14,5	9,0-12,5	9,5-12,0
Кисле (рутилове)	13,0-20,0	11,5-16,0	10,0-13,5	9,5-12,5

Крім зазначеного способу розрахунку при приблизних підрахунках величину зварювального струму можна визначити згідно з емпіричним виразом

$$I_{зв} = d_e(20+6d_e).$$

Напруга на дузі U_d при ручному дуговому зварюванні змінюється в порівняно вузькій межі. Його величина визначається як приелектродним падінням напруги, так і градієнтом стовпа дуги. При зварюванні сталевими електродами $U_d = (18-30)$ В. Менші значення відповідають малим значенням струму й зварюванні в положенні, відмінному від нижнього. Швидкість ручного дугового зварювання $V_{зв} = (15-18)$ м/г.

Головними параметрами режиму механізованого зварювання металевим плавленням електродом (під флюсом і в середовищі захисних газів, перед усім в CO_2) є: діаметр d_e , марка електродного дроту, виліт електроду L_B , зварювальний струм $I_{зв}$, напруга на дузі U_d , швидкість зварювання $V_{зв}$, витрата флюсу G_F (при зварюванні під флюсом), витрата CO_2 (при зварюванні у вуглекислому газі). Похідними (залежними від головних) параметрами режиму зварювання є: швидкість подачі електрода V_P , напруга джерела живлення U_d , коефіцієнт наплавлення α_H , основний час T_0 .

Діаметр зварювального дроту обирається в залежності від товщини S деталей, що зварюються, ступеня механізації та автоматизації процесу, наявності

обладнання, хімічного складу матеріалу та ряду інших факторів. При цьому слід пам'ятати, що при механізованому (напівавтоматичному) зварюванні діаметр електродного дроту не повинен перевершувати 2 мм. Орієнтувальні значення діаметрів дроту зазначені в табл. 3.

Таблиця 3

Товщина металу, мм	0,8-2,0	3,0-6,0	6,0-8,0	8,0-12,0	більш 12,0
Діаметр електрода, мм	0,8-1,2	1,2-1,6	1,4-2,0	1,6-2,5	1,6-5,0

Величина вильоту L_B визначається потрібною продуктивністю наплавлення, впливає на стабільність процесу й формування шва. При збільшенні вильоту електрода при постійному значенні зварювального струму збільшується коефіцієнт розплавлення за рахунок зростання температури підігріву електрода. В звичайних умовах зварювання величина вильоту визначається співвідношенням $L_B \approx (10-12)d_e$.

При механізованих способах зварювання металевим дротом належить говорити про мінімальний та максимальний струм для даного діаметра електрода, що визначає стабільність процесу зварювання. В загальному випадку максимальний струм є функцією багатьох параметрів режиму зварювання та зварювального ланцюга: напруги на дузі, діаметра, вильоту та густоти матеріалу електрода, нахилу зовнішньої характеристики джерела живлення, індуктивності зварювального кола. При інших рівних умовах можливо привести такі співвідношення:

$$I_{\max} \approx 0,9 \cdot 10^3 d_e \sqrt{\frac{\pi}{L_B}},$$

де d_e – діаметр електрода, мм;

L_B – виліт електрода, мм.

Мінімальний струм у першому приближенні можна визначити як функцію мінімальної густоти струму:

$$I_{\min} = j_{\min} F_e,$$

де F_e – площа поперечного перерізу електрода, мм²;

$j_{\min} = 17 + 70/d_e$ – при зваренні у вуглекислому газі;

$j_{\min} = 20 + 64/d_e$ – при зваренні під флюсом – мінімальна густість струму, А/мм².

При механізованому (напівавтоматичному) зварюванні неможливо використання струму більш 500А із-за швидкого нагріву держака, трудностю його керуванням, а також яскравого випромінювання дуги (при зварюванні в захисних газах).

При зварюванні в CO_2 і під флюсом напруга на дузі змінюється в діапазоні (17,5-46)В. В першому приближенні слід користуватися такими співвідношеннями:

$$U_D = 20 + 0,05 I_{3B} \quad - \text{при зваренні в } \text{CO}_2;$$

$$U_D = 25 + 0,018 I_{3B} \quad - \text{при зваренні під флюсом.}$$

Для зварення в CO_2 і під флюсом мінімальна швидкість зварювання дорівнює біля 15 м/г.

При механізованому (напівавтоматичному) зварюванні швидкість більш 50 м/г зварник не має можливості здійснювати.

Тема 1. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТА ЗАКОНИ В РОЗРАХУНКАХ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ЗВАРЮВАННІ

Зміст теми

Поняття термічного циклу. Процеси, що протікають при нагріві та охолодженні металу. Вплив теплових процесів на продуктивність зварювання, її економічну ефективність, технологічну та експлуатаційну міцність зварного з'єднання. Основні фактори, що визначають характер нагріву та охолодження металу. Поняття теплових основ зварювання як складової частини науки "Теорія зварювальних процесів". Роль академіка Рикаліна М.М. та його співробітників у розробці теплових основ зварювання.

Поняття про передачу тепла за рахунок теплопровідності, конвективного та променевого теплообміну. Температурне поле, ізотерма, градієнт температури, термічний цикл точки. Тепловміст, теплоємність, об'ємна теплоємність.

Закон теплопровідності Фур'є, коефіцієнт теплопровідності, диференційне рівняння теплопровідності. Вихідні припущення для виводу цього рівняння. Фізичне поняття рівняння. Коефіцієнт температуропроводності. Часткові випадки диференційного рівняння теплопровідності. Тепловіддача з поверхні. Природний та вимушений конвективний теплообмін. Визначення питомого конвективного теплового потоку за правилом Ньютона. Коефіцієнт конвективної тепловіддачі. Променевий теплообмін, його природа. Подвійне перетворення енергії при променевому теплообміні. Визначення питомого теплового потоку випромінювання. Повна тепловіддача з поверхні. Питомий тепловий потік повної тепловіддачі, співвідношення між конвективним та променевим теплообміном у залежності від температури нагрітого тіла.

Крайові умови та методи розрахунку термічного циклу точки. Початкові умови. Граничні умови. Аналітичний метод розв'язання задач по розповсюдженні тепла в нагрітому тілі.

Література [1,2,3]

Методичні вказівки до вивчення матеріалу

Необхідно засвоїти сутність теплопровідності, коефіцієнта теплопровідності, теплоємності, тепловмісту, температуропроводності, температурного поля, градієнта температури. Вивчити рівняння, які дозволяють визначити теплоємність, температуропровідність.

Питання для самоперевірки

- 1 Які фізичні основи розповсюдження теплоти?
- 2 Як визначається масова та об'ємна теплоємність?
- 3 Що являє собою температурне поле?
- 4 Як розраховується інтенсивність радіаційного та променевого теплообміну тіла за навколишньою середою?
- 5 Коли в практичних розрахунках можливо зневажати поверхневою тепловіддачею?
- 6 Що таке температурний градієнт?
- 7 Які методи розрахунку процесів розповсюдження теплоти використовуються?

Тема 2. РОЗРАХУНКИ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ НАГРІВІ ТІЛ ДЖЕРЕЛОМ ТЕПЛОТИ

Зміст теми

Основні розрахункові схеми тіла, що нагрівається: напівнескінченне тіло, плоский шар, тонка пластина, стрижень.

Миттєве зосереджене джерело: миттєве точечне джерело, миттєве плоске джерело.

Вплив обмеженості розмірів тіла на процес розповсюдження тепла.

Розподілені та безперервно діючі джерела. Принцип накладення. Періоди теплонасичення та вирівнювання температур при нагріві тіл рушійними джерелами теплоти. Поняття квазістаціонарного стану.

Теплові характеристики зварної дуги: повна потужність, ефективна теплопотужність нагріву виробу. Ефективний ККД нагріву виробу.

Значення ефективного ККД для різних способів зварювання. Розподіл тепла дуги. Розподіл питомого теплового потоку. Поняття плями нагріву. Коефіцієнту зосередженості теплового потоку, нормально-колове джерело, погонної енергії, питомої погонної енергії.

Нагрів виробів рушійною дугою свавільної потужності. Спрощені формули для розрахунку температури граничного стану точки при зварюванні потуж-

ною швидкорухомою дугою. Термічний цикл та максимальна температура точки виробу. Вплив режимів зварювання, теплофізичних властивостей металу на характеристики температурних полів граничного стану.

Теплові характеристики газового полум'я. Розподіл питомого теплового потоку газового полум'я. Розрахункові схеми процесу нагріву металу газовим полум'ям для рушійного однополуменевих пальників. Можливості приведення нормально-колового джерела тепла до зосередженого. Формули для розрахунку температурного циклу при використанні простого однополуменевих пальників.

Література [1,2,3]

Методичні вказівки до вивчення матеріалу

Необхідно чітко з'ясувати поняття про схеми тіла (напівнескінченне тіло, плоский шар, пластину, стрижень) у зв'язку зі схематизацією джерела енергії, яка залежить від його потужності, часу дії, швидкості руху і т.д.

Необхідно знати визначення ефективної потужності дуги, загальний тепловий баланс дугового розряду та фактори, від яких залежить ККД дуги.

Слід вивчати використання розрахункових схем для конкретних типових випадків дугового зварювання з ціллю визначення температур та температурних полів, наприклад, при наплавленні валика на масивне тіло, однопрохідного зварювання пластин у стик.

Питання для самоперевірки

- 1 Які схеми тіл та джерел використовуються в теплових розрахунках?
- 2 Які особливості нагріву металу електричною дугою та газовим полум'ям?
- 3 Чим відрізняється джерело, яке рухається, від швидкорухомого?
- 4 Чим відрізняються між собою точечне, лінійне та плоске джерело тепла?
- 5 Коли електрична дуга може вважатися: точечним джерелом тепла, плоским джерелом тепла?
- 6 Як урахується розподіленість джерела теплоти в теплових розрахунках?
- 7 Чому при зварюванні графітовим електродом ефективне ККД нагріву виробу менше, ніж при зварюванні сталевим електродом?

Вказівки до розв'язання задач

Потужним джерелом звичайно можна вважати дугу у випадку механізованого та автоматичного зварювання металевим електродом в середовищі захисних газів чи під флюсом.

Швидкорухоме джерело відповідає швидкостям зварювання більш 25 м/г (7 мм/с). Прийняття такої розрахункової схеми значно спрощує розрахунок температурних полів у випадку наплавки валика на масивне тіло чи однопрохідного зварювання пластин в стик.

При механізованому та автоматичному зварюванні металевим електродом розрахунок по цій схемі дає добрі результати, близькі до експериментальних.

При ручному дуговому зварюванні по цій схемі можна з достатньою точністю розрахувати процес охолодження металу шва та біляшовної зони.

Розв'язання задач цього розділу дозволяє студентам уявити приблизні розміри зон термічного впливу, стабілізує їх знання теплофізичних величин, значення ККД нагріву виробу дугою та газовим полум'ям.

Значення теплофізичних величин наведені у додатку А.

Умови задач

1 На поверхню масивного тіла із нержавіючої сталі під флюсом наплавляють валик із режимом: $I_{зв} = 800$ А, $U_d = 32$ В, $V_{зв} = 10$ м/г. Визначити максимальну температуру, яка буде досягнута на поверхні деталі на відстані 15, 20, 25 мм від осі шва.

2 Листи із низьколегованої загартованої сталі товщиною 8 мм зварюються за один прохід автоматичною зварюванням із режимом: $I_{зв} = 500$ А, $U_d = 30$ В, $V_{зв} = 23$ м/г. Визначити ширину зони, котра знаходиться між 500-800 °С.

3 На поверхню масивного сталевих виробу автоматичним зварюванням під флюсом наплавляється валик. Струм змінний. Параметри режиму : $I_{зв} = 800$ А, $U_d = 40$ В, $V_{зв} = 18$ м/г. Визначити відстань від осі шва, на якій буде досягнута максимальна температура 800 °С. За який час це відбудеться?

4 Автоматичним зварюванням під флюсом зварюються пластини з міді товщиною 12 мм за один прохід. Режим зварювання при цьому: $I_{зв} = 700$ А, $U_d = 32$ В, $V_{зв} = 20$ м/г. Визначити максимальні температури, які будуть досягнуті на відстані 15, 20, 30 мм від осі шва.

5 На поверхню масивного виробу з нержавіючої сталі здійснюється автоматична наплавлення с параметрами режиму : $I_{зв} = 800$ А, $U_d = 28$ В, $V_{зв} = 22$ м/г. Визначити зону поверхні, яка нагрівається від 400 до 800 °С.

6 Здійснюється автоматичне зварювання пластин із низьковуглецевої сталі товщиною 14 мм за один прохід і наплавлення валика на масивне тіло з тієї ж сталі. Для однакового режиму зварення: $I_{зв} = 1000$ А, $U_d = 38$ В, $V_z = 28$ м/г. Розрахувати температуру поверхні на відстані 30 мм від осі шва. Струм змінний.

7 Здійснюється автоматичне зварювання пластин з аустенітної сталі товщиною 12 мм за один прохід і наплавлення масивного виробу з тієї ж сталі. Для однакового режиму зварювання: $I_{зв} = 900$ А, $U_d = 38$ В, $V_{зв} = 20$ м/г. Розрахувати ширину ділянки поверхні (в обох випадках), нагрітої вище 400 °С.

8 Автоматичним зварюванням під флюсом зварюється пластина з технічного титану товщиною 14 мм за один прохід. Режим зварення: $I_{зв} = 900$ А, $U_d = 34$ В, $V_{зв} = 13$ м/г. Визначити максимальні температури, які будуть досягнуті на відстані 20, 25, 35 мм від осі шва.

9 Листи із міді товщиною 5 мм зварюються за один прохід автоматичним зварюванням із режимом: $I_{зв} = 500$ А, $U_d = 30$ В, $V_{зв} = 18$ м/г. Визначити шири-

ну зони, яка знаходиться між 500 і 1000 °С. Тепловіддачею з поверхні знехтувати.

10 Зварюються пластини товщиною 16 мм із низьковуглецевої сталі. Струм змінний. Режим автоматичного зварювання: $I_{зв} = 1200$ А, $U_d = 42$ В, $V_{зв} = 25$ м/г. Визначити відстань від осі зварення, на якій буде досягнута максимальна температура 600 °С, і час, за який це відбудеться.

11 Здійснюється автоматичне зварювання в середовищі аргону пластин товщиною 6 мм за один прохід і наплавлення масивного виробу з алюмінію. При швидкості зварення 18 м/г визначити ефективну теплову потужність, потрібну для нагріву поверхневих точок, віддалених від осі шва на відстань 25 мм до температури 500 °С в одному та другому випадку.

12 Розрахувати термічний цикл в масивному тілі для точки з координатами $y = z = 8$ мм у випадку автоматичної наплавлення валика на нержавіючу сталь товщиною 25 мм на такому режимі: $I_{зв} = 450$ А, $U_d = 32$ В, $V_{зв} = 25$ м/г. Побудувати графік.

13 Визначити максимальну температуру в біляшовній зоні ($y = z = 10$ мм) при наплавленні валика на масивний виріб ($S = 20$ мм), якщо наплавлення під флюсом на низьколеговану сталь, мідь та титан здійснюється на однакових режимах: $I_{зв} = 450$ А, $U_d = 32$ В, $V_{зв} = 25$ м/г, $d_e = 3$ мм. Зробити висновок.

14 Визначити розмір ділянки неповної перекристалізації, якщо наплавлення на низьковуглецеву сталь товщиною 25 мм виконується в CO_2 дротом діаметром 2 мм на максимально допустимому струмі при швидкості зварювання 54 м/г.

15 Розрахувати розмір ділянки гарту при наплавленні в CO_2 дротом діаметром 1,2 мм на струмі 180 А, при напруженні на дузі 22 В. Сталь 20ХГСА. Швидкість наплавлення 24 м/г.

16 Розрахувати розмір ділянки неповного гарту при зварюванні в стик пластин товщиною 3 мм із сталі 40Х, якщо наплавлення здійснюється в CO_2 дротом діаметром 1,2 мм із швидкістю 18 м/г, струм 190 А, напруження на дузі 22 В.

17 Розрахувати термічний цикл точки $y = 10$ мм при зварюванні в CO_2 у стик пластин із низьковуглецевої сталі товщиною 3 мм, якщо зварювання йде на такому режимі: $I_{зв} = 160$ А, $U_d = 21$ В, $V_{зв} = 24$ м/г, $d_e = 1,2$ мм. Тепловіддачею з поверхні знехтувати. Побудувати графік.

18 Розрахувати термічний цикл точки, розташованої на відстані 10 мм від осі шва, при ручному дуговому зварюванні в стик листів із нержавіючої сталі товщиною 3 мм. Швидкість зварювання дорівнює 15 м/г. Тепловіддачею з поверхні знехтувати. Побудувати графік.

19 Розрахувати максимальну температуру для точки, розташованої на відстані 20 мм від осі шва в зоні термічного впливу, якщо зварювання в стик пластин із низьковуглецевої сталі товщиною 12 мм здійснюється під флюсом елект-

родом діаметром 3 мм на максимально допустимому струмі із швидкістю 64 м/г. Тепловіддачею з поверхні знехтувати.

20 Пластини із низьколегованої сталі товщиною 8 мм зварюють із підігрівом до 200 °С дуговим зварюванням під флюсом на такому режимі: $I_{зв} = 350$ А, $U_d = 34$ В, $V_{зв} = 24$ м/г. Коефіцієнт поверхньої тепловіддачі $\alpha = 2,1 \cdot 10^{-3}$ Дж/см²·°С. Побудувати термічний цикл точки $y = 10$ мм.

21 Розрахувати термічний цикл точки $y = 10$ мм, якщо зварювання в CO₂ здійснюється на такому режимі: $I_{зв} = 450$ А, $U_d = 38$ В, $V_{зв} = 36$ м/г, $d_e = 2$ мм. Однопрохідне зварювання в стик пластин товщиною 8 мм із низьковуглецевої сталі. Коефіцієнт температуровіддачі $b_1 = 0,01$ °С/сек. Побудувати графік.

22 Визначити максимальну температуру зони термічного впливу, що лежить на відстані 5 мм від лінії сплавлення при наплавленні валика на масивне тіло, якщо здійснюється ручне дугове зварювання електродом з покриттям основного типу діаметру 5 мм, $V_{зв} = 10$ м/г. Основний метал – сталь типу 12Х1МФ.

23 Розрахувати термічний цикл точки $Z = 0$, $y = 14,2$ мм, при автоматичному наплавленні під флюсом валика на лист товщиною 20 мм із низьковуглецевої сталі на такому режимі: $I_{зв} = 700$ А, $U_d = 38$ В, $V_{зв} = 36$ м/г.

24 Визначити ширину ділянки рекристалізації при ручному дуговому зварюванні пластин із низьковуглецевої сталі товщиною 5 мм, електродом діаметром 5 мм на номінальному струмі, якщо $V_{зв} = 14$ м/г. Тепловіддачею з поверхні знехтувати.

25 Розрахувати термічний цикл точки $r=8$ при наплавленні в CO₂ валика на лист товщиною 25 мм із нержавіючої сталі, якщо $d_1 = 1,2$ мм, $I_{зв} = 200$ А, $U_d = 20$ В, $V_{зв} = 24$ м/г. Побудувати графік розподілу температур.

26 Розрахувати розмір зони термічного впливу, в якій відбудуться структурні зміни при автоматичному зварюванні під флюсом листів товщиною 12 мм із сталі 20Х на максимально можливому режимі, що задовольняє умовам стабільності процесу, якщо $V_{зв} = 36$ м/с, $d_e = 3$ мм. Тепловіддачею з поверхні знехтувати.

27 Розрахувати розмір ділянки нормалізації при ручному дуговому зварюванні Ст3 електродом діаметром 5 мм на номінальному струмі, якщо $S = 4$ мм, а $V_{зв} = 12$ м/г. Тепловіддачею з поверхні знехтувати.

28 Розрахувати термічний цикл точки ($y = 8$ мм, $Z = 0$) при наплавленні на лист із нержавіючої сталі товщиною 25 мм. Побудувати графік розподілення температури за часом. Зварення в CO₂. Режим зварювання: $d_e = 1,4$ мм, $I_{зв} = 300$ А, $U_d = 25$ В, $V_{зв} = 24$ м/г.

29 Визначити максимальну температуру в точці $y = 10$ мм при ручному дуговому зварюванні листів у стик товщиною 5 мм із міді електродом діаметром 5 мм на номінальному струмі, якщо $V_{зв} = 12$ м/г.

30 Визначити максимальну температуру для точки, розташованої на відстані 3 мм від лінії сплавлення в зоні термічного впливу, якщо при зварюванні під флюсом низьковуглецевої сталі в стик електродом діаметром 3 мм використовують максимально допустимий струм, що задовольняє стійкості процесу зварювання. Товщина листів 12 мм, $V_{зв} = 60$ м/г. Тепловіддачею з поверхні знехтувати.

31 Розрахувати розмір ділянки перегріву при ручному дуговому зварюванні електродом діаметром 5 мм на номінальному струмі у випадку наплавлення валика на низьколеговану сталь, якщо $V_{зв} = 10$ м/г.

32 Розрахувати розмір ділянки нормалізації при автоматичному зварюванні в CO_2 на максимально допустимому струмі, якщо зварювання сталей листів $S = 12$ мм із низьковуглецевої сталі виконується електродом діаметром 3 мм із швидкістю 60 м/г. Тепловіддачею з поверхні знехтувати.

33 Визначити розмір ділянки гарту при зварюванні сталі 45, якщо при наплавці валика в CO_2 . Режим зварення: $d_e = 1,2$ мм, $I_{зв} = 180$ А, $U_d = 22$ В, $V_{зв} = 24$ м/г.

34 Розрахувати розмір ділянки неповної перекристалізації при ручному дуговому зварюванні низьковуглецевої сталі електродом діаметром 5 мм на номінальному струмі, якщо $V_{зв} = 12$ м/г, зварювання в стик $S = 4$ мм. Тепловіддачею з поверхні знехтувати.

35 Для випадку граничного теплового стану, отриманого в результаті дії точечного джерела, що рухається, на півнескінченне тіло з: 1- низьковуглецевої сталі; 2 - високолегованої аустенітної сталі, розрахувати розподілення температур на поверхні по прямій паралельній осі ОХ, яка відстоїть від неї на задану величину У. Координатами Х задаватися по обидві сторони від 0, причому частота точок має бути високою в районі дії джерела теплоти і низькою в районі охолодження. Побудувати графік отриманої залежності. Розрахункові данні прийняти з табл. 4.

Таблиця 4

Показники	Варіант											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Потужність джерела, кВт	2,2	2,1	2,0	2,0	2,2	2,3	2,4	2,5	2,7	2,8	2,9	3,0
Швидкість перемщення джерела, см/с	0,2	0,4	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2	0,3	0,2	0,5	0,3	0,4
У, см	1,1	1,3	1,2	1,0	1,7	1,8	1,9	2,0	2,5	2,8	2,9	3,0

Тема 3. НАГРІВ ТА ПЛАВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОДНОГО МЕТАЛУ ПРИ ДУГОВОМУ ЗВАРЮВАННІ

Зміст теми

Два основних джерела нагріву електрода в процесі зварювання. Основні закономірності нагріву електрода струмом. Особливості нагріву штучних електродів та дроту при неперервній подачі.

Приблизний метод розрахунку процесу нагріву електрода струмом. Розрахунок температури нагріву вильоту електрода при механізованих способах зварювання. Розрахункові формули, номограми, порядок розрахунку. Необхідність обмеження температури нагріву електрода при зварюванні покритими електродами.

Теплопотужність, запроваджувана дугою в електрод. ККД нагріву електрода дугою, його чисельна величина. Миттєва продуктивність процесу розплавлення електрода. Вплив температури підігріву електрода протікаючим струмом на продуктивність процесу розплавлення електрода. Коефіцієнт розплавлення, його чисельне значення в різних умовах. Взаємозв'язок між балансом енергії у приелектродних ділянках, ефективний ККД нагріву електрода дугою й коефіцієнтом розплавлення. Нерівномірність плавлення електрода при ручному дуговому зварюванні покритими електродами. Коефіцієнт нерівномірності плавлення електрода. Можливість збільшення продуктивності розплавлення електрода за рахунок збільшення вильоту при механізованих способах зварювання. Граничні величини струму при механізованих способах зварювання металевим електродом.

Коефіцієнт утрат: поняття про нього, чисельні значення в різних умовах. Коефіцієнт виплавки, його чисельні значення при різних способах зварювання. Миттєва й середня продуктивність наплавлення.

Література [1,2,3]

Методичні вказівки до вивчення матеріалу

Необхідно засвоїти роль нагріву електрода проходжуючим струмом у підвищенні продуктивності процесів розплавлення й наплавлення, причини обмеження величини струму як при ручному, так і при механізованих способах зварювання, можливості збільшення продуктивності процесу за рахунок використання великого вильоту при механізованих засобах зварювання. Знати математичний зв'язок між миттєвою та середньою продуктивністю процесу розплавлення й наплавлення.

Запитання для самоперевірки

- 1 Розкажіть про тепловий баланс нагріву й плавлення електрода.
- 2 Розкажіть про дві схеми нагріву електродного металу протікаючим струмом.

- 3 Чому обмежується величина струму при зварюванні покритими електродами?
- 4 Дайте визначення коефіцієнта розплавлення, наплавлення. Розмірність коефіцієнтів, їх значення для дугового зварення. Взаємозв'язок між коефіцієнтами.
- 5 Розкажіть про нерівномірність плавлення електрода.
- 6 Розкажіть про заходи підвищення продуктивності плавлення штучних електродів, дроту при механізованих способах зварення.
- 7 Які фактори впливають на коефіцієнт утрати металу?

Вказівки до розв'язання задач

Розрахунок нагріву електрода протікаючим по ньому струмом слід робити наближеним методом чи з використанням номограми (рис. 76 [1]). Значення величин A , D_1 та m для дроту з низьковуглецевої чи низьколегованої сталі можна взяти з таблиці (додаток А).

За максимальну температуру нагріву дугою краплі на кінці електрода з низьковуглецевої сталі треба брати 2500°C . Це відповідає тепловмісту (ентальпії) металу—2080-2085 Дж/г. Тепловміст металу при всіх температурах слід визначати згідно з графіком (рис. 49 [1]).

В тих випадках, коли при механізованому зварюванні не задана величина часу t нагріву електрода вильоту проходжуваним струмом, то цей параметр треба визначати, виходячи зі значення вильоту та швидкості подачі електрода.

Миттєва продуктивність розплавлення електрода визначається швидкістю його подачі, діаметром електрода, густістю металу.

Починаючи з третього курсу, студент - майбутній інженер-зварник - повинен знати, що коефіцієнт наплавлення є одним із основних показників продуктивності процесу зварення й наплавлення.

Умови задач

1 Розрахувати характер розподілення температур біля оплавленого торця електрода на початку горіння дуги та в кінці плавлення, яке триває 60 с. Електрод із покриттям УОНИ-13 діаметром 5 мм, зварення ведеться на номінальному струмі, довжина огарка 45 мм. Прийняти $T_0=0$.

2 Розрахувати, до якої температури нагріється електрод на вильоті, якщо при зварюванні під флюсом на змінному струмі: $d_e = 4$ мм, $I_{зв} = 800$ А, $L_B = 80$ мм, $V_{п} = 0,035$ м/с. Зробити висновок про стійкість процесу.

3 Визначити миттєву g_p та питому α_p продуктивність розплавлення електрода при автоматичному зварюванні в CO_2 на максимально допустимому струмі, якщо діаметр електрода 3 мм, напруження на дузі 40 В, ступінь використання тепла дуги $\eta_e = 25\%$.

4 Визначити миттєву g_p та питому α_p продуктивність розплавлення електрода при ручному дуговому зварюванні електродом із покриттям основного типу діаметром 5 мм на номінальному струмі, якщо ступінь використання тепла дуги електродом $\eta_e = 20 \%$, час плавлення електрода — 60 с.

5 Визначити миттєву продуктивність розплавлення електрода при зварюванні під флюсом електродом діаметром 3 мм, на максимально допустимому струмі, якщо ККД використання тепла дуги електрода $\eta_e = 25 \%$.

6 Визначити температуру нагріву електрода протікаючим струмом при ручному дуговому струмі електродом 4 мм до кінця його плавлення ($t = 60$), якщо зварювання ведеться на струмі 220 А. Розрахувати коефіцієнт нерівномірності плавлення. Зробити висновок.

7 Розрахувати, до якої температури нагріється електрод на вильоті, якщо при зварюванні в CO_2 дротом діаметром 1,6 мм величина вильоту — 35 мм, струм — 330 А, напруження на дузі — 36 В, швидкість подачі дроту — 150 м/г. Зробити висновок про стійкість процесу.

8 Розрахувати характер розподілення температур біля оплавленого торця електрода на початку горіння дуги і в кінці плавлення, яке триває 65 с. Електрод із покриттям типу УОНІ-13 діаметром 4 мм, $I_{зв} = 180$ А, довжина огарка — 40 мм. Прийняти $T_0 = 0$.

9 Визначити, до якої температури нагріється електрод діаметром 2 мм на вильоті протікаючим струмом, якщо при автоматичному зварюванні під флюсом на постійному струмі $I_{зв} = 300$ А, $L_v = 20$ мм, $V_{п} = 180$ м/г, $T_0 = 0^\circ\text{C}$. Зробити висновок про стійкість процесу.

10 Визначити миттєву g_p та питому α_p продуктивність розплавлення електрода діаметром 6 мм при ручному дуговому зварюванні на номінальному струмі, якщо $\eta_e = 25 \%$, $T_0 = 0^\circ\text{C}$, час плавлення електрода - 60 с.

11 Визначити, чи рівномірно здійснюється плавлення електрода діаметром 2 мм, якщо при зварюванні в CO_2 величина вильоту 40 мм, струм — 700 А.

12 Визначити, до якої температури нагрівається електрод діаметром 4 мм протікаючим струмом величиною 220 А, якщо час плавлення електрода - 50 с. Зварювання ручне дугове, струм змінний. Розрахувати коефіцієнт нерівномірності плавлення електрода.

13 Визначити швидкість подачі електрода діаметром 2 мм, якщо при максимально допустимому струмі при зварюванні в CO_2 коефіцієнт розплавлення електрода дорівнює 15 г/А·год.

14 Визначити швидкість подачі електродного дроту діаметром 1,6 мм при зварюванні на максимально допустимому струмі, якщо $\eta_e = 25 \%$.

15 Визначити коефіцієнт нерівномірності плавлення електрода УОНІ-13/45 діаметром 5 мм при ручному дуговому зварюванні, якщо $I_{зв} = 300$ А, час плавлення електрода - 50 с.

16 Визначити змінну потребу в зварному дроті при автоматичному зваренні в CO_2 , якщо час зварення дорівнює 50 % від довжини зміни. Зварення здійснюється дротом діаметром 3 мм на максимально допустимому струмі, $\eta_e = 25\%$, $S_{400}^0 \approx 333$ Дж/г.

17 Визначити швидкість подачі електрода діаметром 2 мм, якщо при струмові 500 А і коефіцієнті втрат 7 % коефіцієнт наплавлення дорівнює 21,8 г/А·год.

18 Вибрати максимально допустимий струм та визначити часову продуктивність плавлення електрода (кілограмах за годину) при ручному дуговому зварюванні електродом діаметром 4 мм, якщо $\eta_e = 0,15$, середня температура нагріву електродного стержня -300°C .

19 Визначити стійкість протікання процесу плавлення електрода при автоматичному зварюванні під флюсом, якщо при: $d_e = 2$ мм, $I_{зв} = 600$ А, $L_B = 60$ мм, $V_{\Pi} = 360$ м/г.

20 Зробити висновок про якість зварювання та допустимість використання струму величиною 310 А при ручному дуговому зварюванні на змінному струмі електродом діаметром 5 мм, якщо електродний стрижень у кінці його плавлення нагрівається до 1000°C ($S_{1000}^0 \approx 600$ Дж/г), $T_0 = 0$. Визначити коефіцієнт нерівномірності плавлення.

21 Визначити, чи рівномірно здійснюється плавлення електрода діаметром 2 мм при автоматичному зварюванні в CO_2 , якщо його виліт дорівнює 40 мм, а величина струму – 800 А.

22 Визначити максимально допустимий режим автоматичного зварювання в CO_2 дротом діаметром 2 мм. Знайти значення миттєвої g_p та питомої α_p продуктивності наплавлення, при цьому прийняти коефіцієнт втрат металу $\psi_y = 8\%$. ККД нагріву електрода дугою $\eta_e = 0,25$, $T_0 = 0$.

23 Визначити температуру нагріву електрода діаметром 2 мм протікаючим струмом при автоматичному зварюванні в CO_2 , якщо $I_{зв} = 300$ А, $L_B = 40$ мм, $V_{\Pi} = 0,06$ м/с.

24 Розрахувати миттєву g_p та питому α_p продуктивність розплавлення електродного дроту діаметром 1 мм при зварюванні в CO_2 , якщо $I_{зв} = 300$ А, $S_T \approx 330$ Дж/г, електрода 3 мм, напруга на дузі 40 В, ступінь використання тепла дуги $\eta_e = 25\%$, $\eta_t = 0,2$. Визначити швидкість подачі електродного дроту.

25 Визначити, до якої температури нагрівається при ручному дуговому зварюванні електрод діаметром 6 мм при протіканні по ньому змінного струму величиною 300 А, якщо час його плавлення 50 с, $T_0 = 0$. Розрахувати коефіцієнт нерівномірності плавлення електрода.

26 Визначити температуру нагріву електродного дроту Св-08Г2С діаметром 1,6 мм протікаючим струмом при автоматичному зварюванні в CO_2 , якщо

$I_{зв} = 450 \text{ А}$, $L_B = 28 \text{ мм}$, $V_{п} = 12,4 \text{ м/с}$, $T_0 = 20 \text{ }^{\circ}\text{С}$. Визначити миттєву g_p та питому α_p продуктивність розплавлення електрода.

27 Розрахувати швидкість подачі електродного дроту діаметром 2 мм, щоб при величині струму 200 А мати коефіцієнт розплавлення електроду $\alpha_p = 12 \text{ г/А}\cdot\text{год}$.

28 Визначити потрібну кількість електродного дроту діаметром 4 мм на зміну, якщо час зварювання дорівнює 50 % від часу зміни. Зварювання – автоматичне під флюсом. Величина струму - максимально допустима, $\eta_e = 25 \text{ \%}$.

29 Розрахувати, скільки потрібно електродів зварнику на зміну, якщо зварювання здійснюється електродами діаметром 45 мм на номінальному струмі. Чистий час зварювання – 40 % від всієї зміни, $\alpha_H = 9 \text{ г/А}\cdot\text{год}$, $\psi_y = 20 \text{ \%}$. Відносна вага електродного покриття – 30 %.

30 Визначити, з якою швидкістю треба подавати електродний дріт Св-08Г2С діаметром 2 мм, щоб при зварюванні мати коефіцієнт наплавлення 16,8 г/А·год при величині струму 400А .

31 Розрахувати температуру нагріву електрода протікаючим струмом по таким даним : $d_e = 1,2 \text{ мм}$, $I_{зв} = 360 \text{ А}$, $L_B = 25 \text{ мм}$, $T_0 = 0$, $\alpha_p = 20 \text{ г/А}\cdot\text{год}$.

32 Чи відбуваються періодичні зміни параметрів дуги в процесі автоматичного зварювання під флюсом дротом діаметром 3 мм, якщо $I_{зв} = 850 \text{ А}$, $L_B = 75 \text{ мм}$.

33 Визначити, з якою швидкістю зварювальник подає сталевий електрод діаметром 4 мм в зварювальну ванну при ручному дуговому зварюванні, якщо $I_{зв} = 200 \text{ А}$, $\alpha_H = 8,6 \text{ г/А}\cdot\text{год}$, $\psi_B = 20 \text{ \%}$.

34 Розрахувати значення коефіцієнта розплавлення, якщо при зварюванні в CO_2 дротом діаметром 1,6 мм при струмі 400 А продуктивність наплавлення дорівнює 6 кг/г, а коефіцієнт на угар та розбризкування $\psi_y = 15 \text{ \%}$.

35 Розрахувати, скільки кілограмів електродів діаметром 6 мм потрібно зварнику на зміну при ручному дуговому зварюванні на номінальному струмі, якщо втрати на угар, розбризкування та угар $\psi_B = 20\%$, чиста година зварювання – 50 %, відношення ваги електроду до ваги стрижня – 1,45, коефіцієнт наплавлення $\alpha_H = 10,2 \text{ г/А}\cdot\text{год}$.

36 Розрахувати по першій схемі нагріву розподілення температури по низьковуглецевому електродному стрижню до ручного дугового зварювання, $T_0 = 300 \text{ К}$. Температуру визначати в точках із координатами при X , рівному 0,1; 0,2; 0,3; 0,5; 1,0 см. Побудувати графік отриманої залежності. Розрахункові данні прийняти з табл. 5.

37 Розрахувати по другій схемі нагріву приріст температури в хромонікелевому електродному дроті від підігріву дугою. Визначення температур провес-

ти для точок із координатами при X, рівному 0,1; 0,2; 0,3; 0,5; 1,0 см. Побудувати графік отриманої залежності. Розрахункові данні прийняти з табл. 6.

Таблиця 5

Показники	Варіант											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Температура, К	2200	2225	2250	2300	2325	2350	2400	2425	2450	2500	2550	2600
Приріст температури від підігріву електрода струмом, К	200	225	250	275	300	325	350	400	450	500	550	600
Швидкість плавлення електрода, см/хв	0,7	0,72	0,75	0,78	0,8	0,82	0,85	0,87	0,9	0,93	0,97	1,0

Таблиця 6

Показники	Варіант											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Швидкість подачі дроту, м/г	80	85	90	95	100	45	50	55	60	65	70	75
Виліт електрода, мм	40	38	36	34	32	30	28	26	24	22	20	21
Температура краплин, К	2700	2710	2720	2730	2740	2740	2760	2770	2780	2785	2730	2800
Максимальний приріст температури від підігріву струмом, що проходить, К	235	230	235	240	245	250	245	240	235	230	235	230

Тема 4. ПЛАВЛЕННЯ ОСНОВНОГО МЕТАЛУ ПРИ ЗВАРЮВАННІ. ПРОДУКТИВНІСТЬ ПРОЦЕСУ ЗВАРЮВАННЯ

Зміст теми

Основні параметри зварювальної ванни, зони проплавлення, наплавлення. Різні форми шва. Розрахунок довжини й ширини зварювальної ванни, час існування ванни, глибина проплавлення.

Теплова ефективність процесу проплавлення. Розподіл ефективної теплової потужності виробу. Поняття термічного ККД процесу проплавлення. Способи його визначення, повного ККД проплавлення, ККД зварювання. Продуктивність процесу проплавлення. Можливості збільшення площі проплавлення. Способи підвищення продуктивності зварювання при виконанні швів заданою глибиною проплавлення.

Шляхи регулювання процесів зварення та наплавлення.

Література [1,2,3]

Методичні вказівки по вивченню матеріалу

Необхідно мати навички розрахункового визначення ширини зони проплавлення, довжини зварювальної ванни.

Необхідно знати основні формули для термічного, повного теплового ККД процесу проплавлення, вміти визначати їх значення за геометричними розмірами шва при заданих параметрах режиму зварювання і розрахувати їх значення за методом М.М.Рикаліна.

Треба вміти розрахувати площі наплавлення й проплавлення за заданими параметрами режиму зварювання. Вміти розробляти заходи для підвищення продуктивності процесу зварювання шва із заданими параметрами зон проплавлення й наплавлення.

Питання для самоперевірки

- 1 Якими параметрами характеризується зона проплавлення ?
- 2 Запишіть розрахункові формули для визначення довжини ванни. При наплавленні валика на масивний виріб, при зварюванні тонких пластин у стик потужним швидкодіючим джерелом.
- 3 Запишіть розрахункові формули для визначення параметрів зони проплавлення при зварюванні подушною дугою, що швидко рухається.
- 4 Які параметри визначають час існування ванни ?
- 5 Як впливає температура основного металу на розміри зварювальної ванни ?
- 6 Як впливають умови й параметри режиму зварювання на величину термічного ККД процесу проплавлення?
- 7 Як підвищити продуктивність процесу зварювання швів, утворених переважно за рахунок проплавлення основного металу?

Умови задач

1 Розрахувати довжини зварювальних ванн при наплавленні на масивне тіло із низьковуглецевої та нержавіючої сталей, алюмінію, міді та технічного титану. Наплавлення ведеться на однаковому режимі: $I_{зв} = 800$ А, $U_d = 36$ В. Прийняти ефективний ККД в усіх випадках однаковим $\eta_i = 0,6$.

2 Розрахувати час знаходження в рідкому стані елементів металу зварювальної ванни при наплавленні валика на масивний виріб із нержавіючої сталі та міді на однаковому режимі: $I_{зв} = 700$ А, $U_d = 30$ В, $V_{зв} = 22$ м/г. Прийняти ефективний ККД однаковим.

3 Розрахувати площу поперечного перерізу шва при ручному дуговому зварюванні низьковуглецевої сталі $S_{пл} \approx 1354$ Дж/г електродом діаметром 6 мм на номінальному струмі зі швидкістю 12 м/г, якщо в стик зварюються пластини товщиною 6 мм, $\alpha_H = 9$ г/А·год.

4 Визначити повний ККД процесу зварення $\eta_{зв}$, якщо при зварюванні в CO_2 на режимі: $I_{зв} = 400$ А, $U_d = 33$ В, $V_{зв} = 25$ м/г одержані відповідно до площі наплавлення й проплавлення 28 і 60 мм².

5 Визначити частку участі основного металу в металі шва, якщо при зварюванні в CO_2 дротом діаметром 1,6 мм, $I_{зв} = 400$ А, $U_d = 38$ В, $V_{зв} = 36$ м/г, $\alpha_H = 20$ г/А·год, $S = 8$ мм. Зварювання в стик за один прохід.

6 Розрахувати параметри зварювальної ванни та зони проплавлення при ручному дуговому зварюванні низьковуглецевої сталі електродом діаметром 6 мм на номінальному струмі, якщо $V_{зв} = 12$ м/г.

7 Розрахувати, скільки кілограмів електродів витрачає зварник за зміну при ручному дуговому зварюванні електродом діаметром 4 мм на номінальному струмі, якщо $\alpha_H = 9,5$ г/А·год, чистий час зварювання – 40 %. Відношення ваги електроду до ваги стрижня – 1,35.

8 Визначити термічний ККД при зварюванні в CO_2 дротом діаметром 2 мм, якщо $I_{зв} = 500$ А, $U_d = 36$ В, $V_{зв} = 24$ м/г, площа проплавлення $F_{пр} = 86$ мм².

9 Визначити площі наплавлення та проплавлення при ручному дуговому зварюванні електродом діаметром 5 мм на номінальному струмі, якщо зварювання пластин товщиною 6 мм здійснюється в стик, $\alpha_H = 8,5$ г/А·год, $V_{зв} = 15$ м/г.

10 Визначити ККД зварювання $\eta_{зв}$ та коефіцієнт наплавлення, якщо при зварюванні в CO_2 дротом діаметром 2 мм, $I_{зв} = 500$ А, $U_d = 36$ В, $V_{зв} = 24$ м/г, площа наплавлення $F_H = 60$ мм², площа проплавлення $F_{пр} = 106$ мм².

11 Розрахувати параметри зварювальної ванни та зони проплавлення при ручному дуговому зварюванні сталі електродом діаметром 4 мм на номінальному струмі, якщо $V_{зв} = 10$ м/г.

12 Вибрати режим зварювання ($I_{зв}$, U_d) під флюсом, щоб отримати катет шва 8 мм при швидкості зварювання 60 м/г, якщо при діаметрі електрода 4 мм, $\alpha_H = 20$ г/А·год.

13 Розрахувати швидкість ручного дугового зварювання електродом діаметром 5 мм на номінальному струмі, щоб забезпечити катет шва 5 мм, $\alpha_H = 8,5$ г/А·год.

14 Визначити коефіцієнт форми шва при автоматичному зварюванні сталі в CO_2 дротом діаметром 3 мм на максимально допустимому струмі, якщо $V_{зв} = 60$ м/г.

15 Визначити відносну глибину проплавлення при ручному дуговому зварюванні сталі електродом діаметром 6 мм на номінальних режимах, якщо $V_{зв} = 12$ м/г.

16 Визначити α_H та $\eta_{зв}$ при автоматичному зварюванні в CO_2 дротом діаметром 2 мм, якщо $I_{зв} = 400$ А, $U_d = 35$ В, $V_{зв} = 24$ м/г, площа наплавлення $F_H = 28$ мм², площа проплавлення $F_{пр} = 52$ мм².

17 Визначити коефіцієнт форми ванни, якщо при автоматичному зварюванні сталі під флюсом електродом діаметром 3 мм на максимально допустимому струмі, якщо $V_{зв} = 60$ м/г.

18 Розрахувати швидкість зварювання, щоб одержати при ручному дуговому зварюванні сталі електродом діаметром 5 мм на номінальному струмі площу наплавлення $F_H = 15$ мм², якщо $\alpha_H = 8,8$ г/А·год.

19 Знайти параметри зварювальної ванни та зони проплавлення при автоматичному зварюванні сталі під флюсом електродом діаметром 4 мм на максимально допустимому струмі, якщо $V_{зв} = 60$ м/г.

20 Визначити коефіцієнт форми ванни при автоматичному зварюванні в CO_2 електродом діаметром 1,2 мм, якщо при наплавленні на сталь на максимально допустимому струмі $V_{зв} = 54$ м/г.

21 Знайти частку участі основного металу в металі шва при наплавленні якісним електродом діаметром 5 мм на номінальному струмі, якщо $V_{зв} = 12$ м/г, $\alpha_H = 8,5$ г/А·год, відносна глибина проплавлення $h/e = 0,3$.

22 Вибрати розмір вильоту та максимально допустимі значення $I_{зв}$ та U_d при автоматичному зварюванні сталі під флюсом електродом діаметром 4 мм. Визначити площу наплавлення, якщо $V_{зв} = 60$ м/г, $\eta_e = 0,25$, $\psi_y = 3$ %.

23 Вибрати величини параметрів режиму автоматичного зварювання сталі під флюсом електродом діаметром 4 мм, щоб одержати площу наплавлення $F_H = 30$ мм, якщо $V_{зв} = 60$ м/г, $\alpha_H = 20$ г/А·год.

24 Вибрати величини максимально допустимих $I_{зв}$ та U_d при зварюванні під флюсом електродом діаметром 2 мм. Визначити площу проплавлення при зварюванні сталі в стик товщиною 10 мм, якщо $V_{зв} = 90$ м/г.

25 Розрахувати площу наплавлення та проплавлення при ручному дуговому зварюванні сталі електродом діаметром 4 мм на номінальному струмі, якщо $V_{зв} = 10$ м/г, $\alpha_H = 20$ г/А·год; відносна глибина проплавлення $h/e = 0,3$.

26 Визначити параметри зварювальної ванни та зони проплавлення при ручному дуговому зварюванні сталі електродом діаметром 3 мм на номінальному струмі, якщо $V_{зв} = 10$ м/г.

27 Визначити ККД наплавлення та α_H , якщо при зварюванні в CO_2 дротом Св-08Г2С діаметром 2 мм $I_{зв} = 500$ А, $U_d = 36$ В, $V_{зв} = 36$ м/г, площа наплавлення $F_H = 45$ мм².

28 Визначити частку участі основного металу в металі шва при ручному дуговому зварюванні сталі електродом діаметром 6 мм на номінальному струмі, якщо $V_{зв} = 12$ м/г, $\alpha_H = 8,5$ г/А·год. Зварювання в стик, товщина металу—6 мм.

29 Визначити площу поперечного перерізу шва при зварюванні в CO_2 сталі товщиною 8 мм в стик дротом діаметром 1,6 мм. Режим зварювання: $I_{зв} = 350$ А, $U_d = 36$ В, $V_{зв} = 36$ м/г, $\alpha_H = 16$ г/А·год.

30 Вибрати режим ручного дугового зварювання ($I_{зв}$, U_d , $V_{зв}$, d_e), щоб при зварюванні сталі забезпечити катет шва 6 мм при $\alpha_H = 8,5$ г/А·год.

31 Визначити ККД зварювання $\eta_{зв}$ під флюсом в стик сталених пластин товщиною 6 мм, якщо $I_{зв} = 300$ А, $U_d = 30$ В, $\alpha_H = 12$ г/А·год.

32 Розрахувати параметри зварювальної ванни та зони проплавлення при автоматичному зварюванні сталі під флюсом на максимально допустимому струмі електродним дротом діаметром 3 мм при $V_{зв} = 60$ м/г.

33 Встановити залежність між довжиною зварювальної ванни та потужністю джерела при наплавленні валика на півнескінченне тіло, $T_0 = 295$ К. Розрахункові дані приведені в табл. 7.

34 Визначити термічний ККД процесу проплавлення основного металу для заданих умов. Тепловміст сталі $S_{пл} = 1360$ Дж/г. Розрахункові дані приведені в табл. 8.

Таблиця 7

Показники	Варіант											
Зварюваний метал	Низьковуглецева сталь		Низьколегована сталь		Аустенітна сталь		Мідь		Алюміній		Титан	
Потужність джерела, кВт	1	2	1,5	0,75	1	1,5	3	5	4	3	1	2
	2	4	3	1,5	2	3	6	10	8	6	2	4
	3	6	4,5	2,55	3	4,5	9	15	12	9	3	6
	4	8	6	3	4	6	12	20	16	12	4	8
	5	10	7	3,75	5	7,5	15	25	20	15	5	10

Таблиця 8

Показники	Варіант											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Потужність джерела, кВт	2	3	4	30	12	15	13	9	8	9	16	7,5
Швидкість зварювання, см/хв	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,1	0,9	0,7	0,5	0,3	0,1
Площа проплавлення, см ²	0,31	0,24	0,22	1,25	0,41	0,44	0,41	0,34	0,38	0,59	1,7	0,25

Тема 5. ТЕРМІЧНИЙ ЦИКЛ ОСНОВНОГО МЕТАЛУ ПРИ ЗВАРЮВАННІ

Зміст теми

Тепловий вплив джерел тепла на біляшовну зону металу зварного з'єднання. Нерівномірність розподілення температури та структурних змін.

Схема розподілення максимальних температур по перерізу зварного з'єднання. Основні фактори термічного циклу – швидкість охолодження металу при температурі мінімальної стійкості аустеніту, тривалість нагріву вище температури початку інтенсивного зростання зерна аустеніту. Визначення максимально допустимої швидкості охолодження металу. Торцева проба, валкова проба МВТУ.

Шляхи регулювання простого термічного циклу при зварюванні. Розрахунок тривалості нагріву металу при зварюванні вище заданої температури. Ідеальний термічний цикл при зварюванні сталей.

Засоби зменшення ділянки нагріву зони термічного впливу та його крупнозернистості. Попередження утворення структур гартування в зоні термічного впливу. Розрахунок погонної енергії при зварюванні, що забезпечує втримання

рівноважних структур у зоні термічного впливу. Запобігання загартовування металу в зоні термічного впливу за допомогою попереднього та супутнього підігріву.

Розрахунок необхідної температури підігріву. Поліпшення структури за рахунок складного термічного циклу при багатошаровому зварюванні.

Література: [1,2,3]

Методичні вказівки по вивченню матеріалу

При вивченні матеріалу цієї теми слід отримати уявлення про дефекти, виникаючі в зоні термічного впливу в результаті теплового впливу зварювального джерела нагріву. Уміти розрахувати миттєву швидкість охолодження в конкретних умовах зварювання, по заданій критичній швидкості охолодження знайти режими зварювання чи температуру попереднього підігріву. Треба вміти розраховувати параметри режиму багатошарового зварювання “довгими” та “короткими” ділянками.

Запитання для самоперевірки

- 1 Що таке термічний цикл зварювання ?
- 2 На які зварювальні процеси впливає термічний цикл?
- 3 Що таке температура мінімальної стійкості аустеніту?
- 4 Що таке критична швидкість охолодження металу ?
- 5 Які маються шляхи регулювання простого термічного циклу при зварюванні?
- 6 Як по заданій швидкості охолодження розрахувати погонну енергію?
- 7 Як по заданій швидкості охолодження розрахувати температуру попереднього підігріву?
- 8 Які особливості термічного впливу на метал при виконанні зварних з'єднань багатошаровими швами та “довгими” ділянками ?
- 9 В чому суть багатошарового зварювання з відпалюючим валиком?
- 10 Які особливості термічного впливу на метал при виконанні зварних з'єднань багатошаровими швами, “короткими” ділянками?

Вказівки до розв'язання задач

При розв'язанні задач цього розділу необхідно розрізняти критичну швидкість охолодження $V_{кр}$, нижче якої виключається утворення холодних тріщин та допустиму швидкість охолодження $V_{доп}$, при якій забезпечується потрібний комплекс механічних характеристик зварного з'єднання.

В тих випадках, коли в умовах задач не застережена швидкість охолодження біляшовної зони зварного з'єднання, обумовлена термічним циклом дугового зварювання, слід скористуватися даними, наведеними в додатку В.

Умови задач

1 Розрахувати, яку температуру попереднього підігріву слід назначити при зварюванні пластин товщиною 10 мм із сталі 55Х для попередження утворення

структур гарту? Режим зварювання під флюсом: $I_{зв} = 500$ А, $U_d = 34$ В, $V_{зв} = 30$ м/г. Критична швидкість охолодження при 700°C дорівнює 12°C/хв .

2 Визначити тривалість перегріву металу, який знаходиться поблизу лінії сплавлення, при наплавленні кутового шва на масивне тіло з низьковуглецевої сталі, якщо відбувається зварювання в CO_2 дротом діаметром 1,4 мм на максимально допустимому струмі при $V_{зв} = 36$ м/г, $T_0 = 0^\circ\text{C}$.

3 Визначити тривалість перегріву металу, який знаходиться поблизу лінії сплавлення, при зварюванні в стик пластин товщиною 8 мм із низьковуглецевої сталі, якщо відбувається зварювання в CO_2 дротом діаметром 1,6 мм на максимально допустимому струмі при $V_{зв} = 45$ м/г, $T_0 = 0^\circ\text{C}$.

4 Вибрати режим зварювання ($I_{зв}$, U_d , $V_{зв}$, d_e), котрий забезпечив би одержання зварного з'єднання зі сталі 30ХМ без тріщин, якщо $\delta = 25$ мм, $V_{зв} = 36$ м/г, $K = 8$ мм, зварення в CO_2 , $\alpha_H = 16$ г/Аг.

5 Встановити, при якому мінімальному значенні ефективної погонної енергії в зварному з'єднанні із сталі 45 не виникає холодних тріщин, якщо $S = 25$ мм.

6 Розрахувати, чи потрібен підігрів при наплавленні валика на пластину товщиною 8 мм із сталі 20ХГС із погонною енергією 6200 Дж/см.

7 Визначити, чи потрібен підігрів листа товщиною 6 мм сталі 40Х при ручному дуговому зварюванні електродом діаметром 6 мм, якщо потрібно одержати якісне зварне з'єднання без холодних тріщин із площею наплавлення 155 мм^2 , зварювання в стик, $\alpha_H = 8,8$ г/Агод.

8 Вибрати режим зварювання ($I_{зв}$, U_d , $V_{зв}$, d_e), котрий забезпечив би одержання площі наплавлення 26 мм^2 при $\alpha_H = 15$ г/Агод, $V_{зв} = 36$ м/г, щоб швидкість охолодження не перевищувала допустиму. Сталь 35ХГСА, товщина листа 25 мм.

9 Виходячи із критичної швидкості охолодження сталі 45, знайти режим ручного дугового зварювання в стик листів товщиною 8 мм.

10 Для металу, прилягаючого до лінії сплавлення, розрахувати тривалість перебування при температурах більш 1100°C , якщо при зварюванні листів товщиною 6 мм, із низьковуглецевої сталі погонна енергія дорівнювала 10000 Дж/см, $T_0 = 0$.

11 Знайти тривалість перегріву сталі 23Г поблизу лінії сплавлення при зварюванні в стик листів товщиною 10 мм при значенні погонної енергії 85000 Дж/см, вважаючи $T_0 = 0$. Зробити висновок про можливий перегрів сталі, якщо інтенсивне зростання зерна у цієї сталі спостерігається при $t_H > 10$ с.

12 Знайти тривалість перегріву сталі 12ХНФ поблизу лінії сплавлення при наплавленні валика з погонною енергією 85000 Дж/см, вважаючи $T_0 = 0$. Зробити висновок про можливий перегрів сталі, якщо інтенсивне зростання зерна у даної сталі спостерігається при $t_H > 15$ с.

13 Встановити, при якому мінімальному значенні погонної енергії при зварюванні листів у стик товщиною 10 мм у сталі 35ХГСА не виникає холодних тріщин, якщо $T_0 = 0$.

14 Як зміниться швидкість охолодження при підігріві до 200°C листів товщиною 6 мм із сталі 40 перед ручним дуговим зварюванням електродом діаметром 4 мм на номінальному струмі, якщо $V_{зв} = 12$ м/г, $T_0 = 0$?

15 Визначити режим ручного дугового зварювання ($I_{зв}$, U_d , $V_{зв}$, d_e , T_0), щоб забезпечити катет шва 6 мм при товщині листів 25 мм із сталі 35ХГСА, якщо $\alpha_H = 8,7$ г/Аг, $V_{зв} = 12$ м/г. Режим зварювання повинен забезпечити оптимальне сполучення механічних властивостей металу шва в ЗТВ.

16 Визначити, на якому режимі потрібно виконувати ручне дугове зварювання в стик листів товщиною 10 мм із сталі 45, щоб при $V_{зв} = 10$ м/г забезпечити $F_H = 20$ мм² при $\alpha_H = 9$ г/Агод. Швидкість охолодження не повинна перевищувати критичну.

17 Визначити, чи потрібен підігрів сталі 23Г перед ручним дуговим зварюванням електродом 6 мм на номінальному струмі, якщо при наплавленні валика на пластину товщиною 25 мм $V_{зв} = 10$ м/г.

18 Визначити мінімальну погонну енергію при зварюванні в стик листів 6 мм із сталі 35ХМ, щоб запобігти холодних тріщин при зварюванні.

19 Знайти тривалість перебування сталі 20ХГС вище температури 900°C в точці, розташованій поблизу лінії сплавлення, якщо наплавлення валика здійснюється з погонною енергією 6500 Дж/см. Зробити висновок про можливий перегрів сталі, якщо інтенсивне зростання зерна спостерігається при $t_H > 15$ с, $T_{\min} = 500^\circ\text{C}$, $T_0 = 0$.

20 Знайти тривалість перебування сталі 12ХН2 вище температури 900°C в точці, розташованій поблизу лінії сплавлення, якщо зварювання листів товщиною 6 мм у стик здійснюється з погонною енергією 15000 Дж/см. Зробити висновок про можливий перегрів сталі, якщо інтенсивне зростання зерна спостерігається при $t_H > 20$ с, $T_{\min} = 500^\circ\text{C}$, $T_0 = 0$.

21 Знайти тривалість перебування металу біляшовної зони в інтервалі температур ($T_{пл} = 0 \dots 1100^\circ\text{C}$), якщо зварювання сталі 40Х товщиною 12 мм в стик здійснюється з погонною енергією 1000 Дж/см. Зробити висновок про можливий перегрів сталі, якщо інтенсивне зростання зерна спостерігається при $t_H > 15$ с, $T_{\min} = 500^\circ\text{C}$, $T_0 = 0$.

22 Знайти тривалість перегріву металу, розташованого поблизу лінії сплавлення, якщо в стик у середовищі CO_2 зварюються пластини товщиною 10 мм із низьколегованої сталі. Режим зварювання: $V_{зв} = 45$ м/г, $d_e = 2$ мм, $T_0 = 0$, струм максимально допустимий з умов стійкості процесу.

23 Знайти тривалість перебування металу, розташованого поблизу лінії сплавлення при температурі 1100°C , якщо ручне дугове наплавлення валика на

сталю пластину здійснюється електродом діаметром 5 мм на номінальному струмі $V_{зв} = 10$ м/г, $T_0 = 0$.

24 Знайти тривалість перегріву сталі поблизу лінії сплавлення, якщо наплавлення валика здійснюється в CO_2 електродом діаметром 4 мм на максимально допустимому струмі, задовольняючи умовам стійкості процесу $V_{зв} = 90$ м/г, $T_0 = 0$.

25 Вибрати режим зварювання ($I_{зв}$, U_d , T_0), який забезпечує отримання якісного зварного з'єднання з катетом $K = 6$ мм при $V_{зв} = 36$ м/г. Зварювання під флюсом, $S = 25$ мм, $\alpha_H = 12,4$ г/А·год, $T_{min} = 300$ °C, $V_{кр} = 25$ °C.

26 Вибрати режим зварювання ($I_{зв}$, U_d , T_0), який забезпечує отримання якісного зварного з'єднання при $V_{зв} = 54$ м/г, $F_H = 20$ мм². Зварювання пластин товщиною 8 мм із сталі 20ХГС, $\alpha_H = 12,4$ г/А·год.

27 Встановити, при якій мінімальній погонній енергії на сталі 40Х не виникає холодних тріщин при наплавленні валика товщиною 25 мм, якщо $T_0 = 0$.

28 Знайти тривалість перегріву металу, розташованого поблизу лінії сплавлення при автоматичному зварюванні під флюсом сталей пластин товщиною 8 мм при $V_{зв} = 36$ м/г, $d_e = 1,6$ мм, $T_{min} = 500$ °C, $T_0 = 0$, величина струму максимально допустима.

29 Знайти тривалість перегріву металу, розташованого поблизу лінії сплавлення при наплавленні валика на лист з $V_{зв} = 54$ м/г, зварювання в CO_2 , $d_e = 2$ мм, $T_{min} = 500$ °C, $T_0 = 0$, величина струму максимально допустима.

30 Визначити мінімальну погонну енергію, забезпечуючи отримання якісного зварного з'єднання при зварюванні в стик листів товщиною 8 мм із сталі, якщо $V_{доп} < 6$ °C/с, $T_{min} = 600$ °C, $T_0 = 0$.

31 Вибрати режим зварювання ($I_{зв}$, U_d , T_0) сталі 30ХГСА товщиною 25 мм, який забезпечує отримання катету 6 мм при $V_{зв} = 36$ м/г та швидкості охолодження не більше 6 °C/с, якщо $\alpha_H = 15$ г/А·год, $T_{min} = 500$ °C.

32 Вибрати режим зварювання ($I_{зв}$, U_d , T_0) листів товщиною 8 мм із сталі 35, якщо при $V_{зв} = 54$ м/г треба забезпечити $F_H = 25$ мм², $\alpha_H = 14$ г/А·год, швидкість охолодження не повинна перевищувати 16 °C/с, $T_{min} = 500$ °C.

33 Розрахувати, при якій мінімальній погонній енергії при зварюванні в металі шва та біляшовної зони пластин товщиною 12 мм із сталі 30, що зварюються в стик за один прохід, не виникнуть структури гарту, якщо $T_0 = 100$ °C.

34 Розрахувати миттєву швидкість охолодження при наплавленні масивного виробу з технічного титану для $T = 600$ °C. Режим наплавлення: $I_{зв} = 500$ А, $U_d = 24$ В, $T_0 = 200$ °C, $V_{зв} = 26$ м/г.

35 Розрахувати, яку температуру попереднього підігріву слід назначити при автоматичному наплавленні масивного виробу зі сталі 25ХГСА для отримання зварного з'єднання, якщо $I_{зв} = 800$ А, $U_d = 35$ В, $V_{зв} = 12$ м/г.

36 Розрахувати, при якій мінімальній погонній енергії в металі шва та біляшовної зони при наплавленні масивного сталюого виробу не виникнуть структури гарту, якщо критична швидкість охолодження для цієї сталі $V_{кр} = 8$ °С/с. Зварювання ведеться з попереднім підігрівом 200 °С.

37 На режимі $I_{зв} = 700$ А, $U_d = 36$ В, $V_{зв} = 26$ м/г ведеться зварювання пластин товщиною 12 мм із низьколегованої сталі. Розрахувати миттєву швидкість охолодження металу шва з температури $T = 700$ °С для трьох випадків: а) зварювання без підігріву; б) зварювання з підігрівом до 100 °С; в) зварювання з підігрівом до 200 °С.

38 Розрахувати, яку температуру попереднього підігріву слід назначити при однопрохідному односторонньому зварюванні пластин із сталі 15Х12ВНФ у стик для отримання якісного зварного з'єднання, якщо $I_{зв} = 500$ А, $U_d = 24$ В, $V_{зв} = 22$ м/г.

29 Визначити величину погонної енергії, котра здатна забезпечити швидкість охолодження при температурі найменшої стійкості аустеніту $T = 830$ К в оптимальному інтервалі W для заданої сталі при зварюванні півнескінченного тіла, $T_0 = 293$ К.

30 Визначити температуру підігріву півнескінченного тіла для забезпечення швидкості охолодження, яка знаходиться в заданому інтервалі значень, для зазначеної сталі $I_{зв} = 350$ А, $U_d = 26$ В, $T = 830$ К, $\eta_i = 0,85$, $V_{зв} = 40$ м/г. Розрахункові данні прийняти з табл. 9.

Таблиця 9

Показники	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Марка сталі	09Г2	16ГС	14ХГС	14ХГ2	15ХСНД	40Х
Оптимальний інтервал швидкостей охолодження, К/с	1,0-15,0	1,0-12,0	0,8-2,6	1,2-5,5	1,8-9,0	4,0-14,0
Оптимальний інтервал швидкостей охолодження, К/с	1,9-12,0	1,5-7,0	0,1-10,0	1,0-5,0	1,6-6,0	1,0-6,0

ДОДАТОК А

Теплофізичні сталі металів та сплавів, рекомендовані для розрахунків

Матеріал	Температура плавлення $T_{пл}, ^\circ\text{C}$	Коефіцієнт теплопровідності λ , Вт/м•град	Об'ємна теплоємність $C_p, 10^6$ Дж/м ³ •град	Коефіцієнт температуропроводності $\alpha \cdot 10^{-6}$, м ² /с
Низьковуглецеві та низьколеговані сталі	1500	41,9	5,0	8,7
Нержавіючі аустенітні сталі	1500	25,1	4,7	6,0
Мідь	1100	376,0	3,9	96,0
Сплави алюмінію	650	251,2	2,7	93,0
Технічний титан	1660	16,7	2,8	6,0

ДОДАТОК Б

Значення сталих величин A , D_1 та m

Спосіб зварювання	Род струму	A , мм ⁴ $^\circ\text{C}/\text{A}$	D_1 , $^\circ\text{C}$	m , мм ³ $^\circ\text{C}/\text{A}^2$
Механізована, металевим електродом	Змінний	0,37	300	2,65
	Постійний	0,031	400	2,65
Ручна, якісним електродом	Змінний	0,027	240	2,5
	Постійний	0,024	200	2,5

ДОДАТОК В

Критичні та допустимі швидкості охолодження для сталей

Марка сталі	$V_{кр}$ при 500°C , $^\circ\text{C}/\text{с}$	$V_{доп}$ при 500°C , $^\circ\text{C}/\text{с}$
35ХГСА	-	6,0-2,5
40Х	10	3,7-2,5
20ХГС	15	3,7-1,2
45	13	3,8-2,0
23Г	22	7,0-3,0
12ХН2	-	3,7-2,0
25Н3	-	11,0-8,0
30ХН	14	8 ^х
15Х12ВМФ	-	20 ^х
30	15	-

ЛІТЕРАТУРА

- 1 Багрянский К.В., Добротина З.А., Хренов К.К. Теория сварочных процессов. – К.: Вища школа, 1978. – 424 с.
- 2 Петров Г.Л., Тумарев А.С. Теория сварочных процессов: Учебн. для вузов. – М.: Высшая школа, 1977. – 392 с.
- 3 Теория сварочных процессов: Учебн. для студ. вузов / Под рук. В.В.Фролова. – М.: Высшая школа, 1988. – 559 с.
- 4 Беляев Н.М., Рядно А.А. Методы теории теплопроводности. В 2 ч. Ч.2. – М.: Высшая школа, 1982. – 304 с.
- 5 Волченко В.Н. Источники энергии сварочных процессов. – М.: Машиностроение, 1971. – 75 с.
- 6 Карслоу Г.С., Егер Д. Теплопроводность. – М.: Наука, 1964. – 487 с.
- 7 Махненко В.И. Тепловые процессы при сварке // Сварка в СССР. – М.: Наука, 1981. – Т.2, гл.2, с. 27-44.
- 8 Лебедев Б.Д. Розрахунки з теорії зварювальних процесів: Навч. посібник. – К.: НМК, 1992. – 320 с.

З М І С Т

Вступ.....	3
Загальні рекомендації по вибору основних параметрів.....	3
Тема 1. Основні поняття та закони в розрахунках теплових процесів при зварюванні.....	7
Тема 2. Розрахунки теплових процесів при нагріванні тіл джерелом теплоти.....	8
Тема 3. Нагрівання та плавлення електродного металу при дуговому зварюванні.....	14
Тема 4. Плавлення основного металу при зварюванні. Продуктивність процесу зварювання.....	20
Тема 5. Теоретичний цикл основного металу при зварюванні.....	24
Додаток А. Теплофізичні сталі металів та сплавів, рекомендовані для розрахунків.....	30
Додаток Б. Значення сталих величин A , D_1 та m	30
Додаток В. Критичні та допустимі швидкості охолодження для сталей..	30
Література.....	31

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

*до виконання самостійної роботи з дисципліни
«Теорія зварювальних процесів»
для студентів спеціальності 6.050504
«Устаткування та технологія зварювання»*

Укладачі

Олександр Андрійович Богуцький

Редактор

Наталія Володимирівна Єрємін

Підп. до друку.

Формат 60x84/16. Офсетний друк.

Ум. друк. арк.

Обл.-вид.арк.

Тираж 40 прим.

ДДМА. 84313, м. Краматорськ, вул. Шкадінова, 72