3.13.4 Тривалість перебування металу вище даної температури

Тривалість перебування металу вище заданої температури Т виражається на рисунку 3.31 відрізком *t_н*.



Рисунок 3.31 – Схема термічного цикла при однопрохідному зварюванні

Визначимо залежність *t_н* від параметрів режиму зварювання для двох випадків:

а) наплавлення валика на масивне тіло;

б) однопрохідне зварювання листів у стик.

Математичні перетворення виконаємо для обох випадків одночасно, використовуючи теорію потужних швидкорухомих джерел теплоти без обліку тепловіддачі, тобто b = 0.

Тривалість нагрівання може бути виражена через безрозмірні критерії часу τ_2 і τ_3 :

$$t_{3\mu} = \tau_{3\mu} \frac{r^2}{4a},$$

$$t_{2\mu} = \tau_{2\mu} \frac{y^2}{4a}.$$
 (3.106)

де

$$\tau_{3H} = \frac{4at_{3H}}{r^2},$$

$$\tau_{2H} = \frac{4at_{2H}}{y^2}.$$

Значення r^2 і y^2 виразимо з рівнянь максимальних температур і підставимо у вирази (3.106):

$$t_{3_{H}} = \frac{\tau_{3_{H}}}{4\pi e} \frac{2q}{9\lambda (T_{m} - T_{0})},$$
(3.107)

$$t_{2\mu} = \frac{\tau_{2\mu}}{64\pi e} \frac{8}{\lambda c\rho} \left[\frac{q}{\vartheta \delta (T_m - T_0)} \right]^2.$$
(3.108)

У свою чергу безрозмірні величини τ_3 і τ_2 виражаються залежно від режиму зварювання. Шляхом ділення рівнянь (3.69) і (3.75) на рівняння максимальних температур знаходимо:

$$\frac{T - T_0}{T_m - T_0} = \frac{r^2}{4at} e^{1 - \frac{r^2}{4at}},$$
(3.109)

$$\frac{T - T_0}{T_m - T_0} = \sqrt{2e} \frac{y}{\sqrt{4at}} e^{-\frac{y^2}{4at}}.$$
(3.110)

Безрозмірні величини $\tau_{3H} = \frac{4at_{3H}}{r^2}$ і $\tau_{2H} = \frac{4at_{2H}}{y^2}$ виражаються в рівняннях (3.109) і (3.110) через безрозмірні величини $\frac{T-T_0}{T_m-T_0}$. на підставі залежностей (3.109) і (3.110) можна побудувати номограму для визначення коефіцієнтів $k_1 = \frac{\tau_{3H}}{4\pi e}$ і $k_2 = \frac{\tau_{2H}}{64\pi e}$, які містяться у виразах (3.107) і (3.108) (рис. 3.32).

Для визначення тривалості перебування тіла вище даної температури необхідно обчислити величину $\frac{T-T_0}{T_m-T_0}$ для точки тіла, яка цікавить, відкласти її на горизонтальній осі номограми на рис. 3.32 [2], а потім по відповідній кривій знайти на вертикальній осі $\frac{\tau_{3H}}{4\pi e}$ або $\frac{\tau_{2H}}{64\pi e}$ Підставивши зазначені значення у вираз (3.107) або (3.108), знаходимо чисельне значення τ_{2H} або τ_{3H} .



Рисунок 3.32 – Номограми для визначення $\frac{\tau_{3H}}{4\pi e}$ і $\frac{\tau_{2H}}{64\pi e}$ при однопрохідному зварюванні

Приклад [2]. Визначити тривалість перебування вище 1 000° С точок навколошовної зони, які лежать біля границі сплавлення (T = 1 500° C) при електрошлаковому зварюванні плит $\delta = 800$ мм, q = 130 000 Дж / с, $\vartheta = 0,3$ м/г = 0,0083 см/с. Розв'язання. Теплофізичні коефіцієнти: $\lambda = 0,40$ Дж/(см·с·град), с $\rho = 5$ Дж/(см³·град).

Якщо наведені вище залежності отримані на основі використання теорії швидкорухомих джерел теплоти, то визначення тривалості нагрівання при електрошлаковому зварюванні є орієнтовним. Використовуємо схему лінійного джерела теплоти в пластині. Визначаємо безрозмірний критерій

$$\frac{T - T_0}{T_m - T_0} = \frac{1000 - 20}{1500 - 20} = 0.662$$

На рисунку 3.32 знаходимо:

$$\frac{\tau_{2_{H}}}{64\pi e} = 0.018$$
.

Для визначення тривалості перебування металу понад T = 1 000° C використовуємо формулу (3.108):

$$t_{2_{H}} = 0.18 \frac{8}{0.45 \cdot 5} \left[\frac{130000}{0.0083 \cdot 80 \cdot (1500 - 20)} \right]^{2} = 1255c = 21xe.$$

3.13.5 Алгоритм розрахунків швидкості охолодження першого шару при зварюванні стикових, напусткових і таврових швів

1. Встановлюються значення вихідних величин, тобто: погонної енергії q_i / g_{36} ; коефіцієнта теплопровідності λ ; об'ємної теплоємності сү, температури найменшої стійкості аустеніту T_{min} ; товщини δ і так далі.

2. За формулою (3.105) знаходимо $\frac{1}{\Theta}$. У формулу, для визначення $\frac{1}{\Theta}$, замість дійсних значень погонної енергії і товщини металу слід підставляти їхні приведені значення, які отримують при множенні дійсних значень на поправкові коефіцієнти, які враховують вплив форми конструкції на розповсюдження теплоти (табл. 3.2).

3. За графіком (див. рис. 3.30) знаходимо ω.

4. За формулою (3.104) розраховуємо швидкість охолодження.

	TC 1 ' '		•	•		,
$120\pi M$	- Коефінісити	ппирелеция пп	ด ทาวบนข	ДИЛ1Д	2DOUDING 2	CURATE
1 ao m n J.2	Косфіцісній	приведения дл	л різнил	. Бидіб 🤇	sbapining s	сдпапь
	1 '	1	1		1	

	Кое	фіцієнт приведення			
Вид зварного з'єднання	Перший шар стикового з'єднання. Кут розроблення – 60 ⁰	Наплавлення та однопрохідне зварювання у стик	Перший шар при зварюванні в тавр або в напустку		
$q_{_i}$ / $\mathcal{G}_{_{_{36}}}$	3/2	1	2/3		
δ	3/2	1	1		

3.13.6 Розрахунок критичної швидкості охолодження

Розрахунок режиму зварювання ведеться, виходячи з того, що перетворення аустеніту повинно бути завершене в перлітній області. Для цього повинна виконуватися умова:

$$W \leq W_{\kappa p}$$

де W – середня швидкість охолодження в інтервалі температур найменшої стійкості аустеніту, при якій для сталі даного хімічного складу забезпечується закінчення перетворення аустеніту в перлітній області і усувається можливість утворення в навколошовній зоні гартівних структур (рис. 3.33);

W_{кр} – критична швидкість охолодження в інтервалі температур найменшої стійкості аустеніту при зварюванні на контрольованому режимі:

$$W_{KP} = \frac{T_{A_{r_{l}}} - T_{min}}{Kt_{min}} = \frac{T_{Ar_{l}} - (T_{min} - 55K)}{K1, 5t_{min}},$$
(3.111)

де T_{min} – температура найменшої стійкості аустеніту у верхньому субкритичному інтервалі температур при ізотермічному розпаді, яка визначається за кривою ізотермічного розпаду для даної марки сталі;

T[′]_{min} – температура найменшої стійкості аустеніту при безперервному охолоджені. Експериментальні дані показують, що Т[′]_{min} на 55 К нижче Т_{min};

t_{min} – мінімальна тривалість повного перетворення аустеніту при ізотермічному розпаді. Визначається за кривою ізотермічного розпаду аустеніту для даної марки сталі;

 t'_{min} — мінімальна тривалість повного перетворення аустеніту при безперервному охолодженні. Експеримент показує, що $t'_{min} = 1,5 t_{min}$;

К – коефіцієнт, що враховує зріст зерна аустеніту, в умовах зварювального нагрівання K = 2.

Критична швидкість охолодження визначається або за кривими ізотермічного чи термокінетичного розпаду аустеніту, або експериментальним шляхом за допомогою валикової або торцевої проби.



крива 1 — ізотермічний розпад аустеніту; крива 2 — розпад аустеніту при безперервному охолодженні

Рисунок 3.33 – Зміна в розташуванні С-подібних кривих при неперервному охолодженні

3.13.7 Визначення критичної швидкості охолодження на підставі експериментальних даних

Для кожної сталі існує графік залежності: твердість, як функція швидкості охолодження. Його легко можна побудувати (рис. 3.34).



Рисунок 3.34 – Вплив швидкості охолодження сталі, схильної до загартування, на її твердість

Задавшись приблизним процентним вмістом мартенситу в навколошовній зоні, можна судити про твердість зони термічного впливу.

Знаючи необхідну твердість навколошовній зони Н_{нт}, за графіком визначається W_{кр} для даного випадку, і розрахунки режиму зварювання ведуться, виходячи з того, що реальна швидкість охолодження повинна бути менше визначеної на підставі графіка.

Існують два способи побудови кривої залежності H = f(W).

1. Торцева проба.

Схема установки для торцевої проби наведена на рисунку 3.35.



1 – зразок; 2 – затискач; 3 – струмінь води; 4 – вода в ємності; 5 – термопара з гальванометром; 6 – трубопровід; 7 – кран для заливання води

Рисунок 3.35 – Схема установки для експериментального визначення необхідної швидкості охолодження металу зварного з'єднання

Зразок 1, виготовлений з основного металу, попередньо нагрівається в печі до температури A_{C3} . Потім він встановлюється в затискачі установки 2 і з торця охолоджується струменем води 3, яка подається з ємності 4 при постійному тиску і температурі. Після закріплення зразка за довжиною бічної поверхні встановлюються термопари 5 для вимірів зміни температури від часу в кожній із заданих точок зразка. За даними вимірів температури будуються залежності температури від часу на різній відстані від торця. Миттєві швидкості охолодження визначаються, як тангенси кутів нахилу дотичних до залежності T = f(t).

На кожній відстані від торця дані вимірів швидкості охолодження усереднювалися і наносилися на графік (рис. 3.36). На нього ж наносились дані вимірів твердості металу проби залежно її відстані від торця.



Рисунок 3.36 – Залежність твердості металу та середньої швидкості охолодження від відстані до торця проби

Недоліком торцевої проби є необхідність мати спеціальне устаткування для проведення дослідження торцевої проби і спеціальні зразки.

2. Валикова проба МВТУ.

Для виконання валикової проби необхідно мати зварювальний пост і твердомір. Пробу можна виконати на зразку будь-якого розміру і товщини безпосередньо в цеху. Беруть зразок з досліджуваної сталі і наплавляють кілька валиків при різних значеннях погонної енергії. Відстань між валиками вибирається таким чином, щоб термічні цикли наступних валиків не впливали на навколошовну зону раніше наплавлених валиків.

За поперечним шліфом валика і його зоною термічного впливу на лінії найбільшої твердості, яка відстоїть від лінії сплавлення на відстані 1…1,5 мм, роблять виміри твердості, і для кожного валика береться її середнє значення. Дані вимірів заносять до таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Твердість валикових проб і розрахункова швидкість їх охолодження

Номер валика	HB _{cp} за виміром	W з розрахунку
1	HB_1	\mathbf{W}_1
2	HB ₂	W_2
3	HB_3	W ₃
4	HB_4	W_4

Знаючи значення погонної енергії для кожного валика, здійснюють розрахунок середньої швидкості охолодження кожного валика. Потім будують графік (рис. 3.37, а).



Рисунок 3.37 – Залежність твердості металу торцевої проби від середньої швидкості його охолодження

Практично, наплавлення валика роблять не на цільну пластину, а на складну, що скзадається з окремих, заздалегідь підготовлених прошліфованих брусків (рис. 3.38). Їх затискають струбциною і роблять наплавлення валиків. Потім струбцина відпускається, бруски розбиваються, шліфуються в місцях зварювання і проводяться виміри твердості.



Рисунок 3.38 – Схема складаної валикової проби

3.13.8 Розрахунки режиму зварювання за заданою твердістю навколошовної зони

Задаючись твердістю навколошовної зони за наявними графіками залежності H = f(W), визначаємо $W_{\kappa p}$.

У методі підбирання (рис. 3.39) умовно задається величина ω і, знаючи $W_{\text{кр}}$, розраховується $q_i/9_{3B}$. За розрахованою погонною енергією обчислюють критерій $\frac{1}{\Theta}$ і за номограмою визначають критерій ω .



Рисунок 3.39 – Залежність $W_{cp} = f(q_n)$ для різних товщин основного металу та різниці $T_{min} - T_0 = 300 \ K$

Якщо значення ω збігається зі значенням, заданим на початку, то це підтверджує правильність знайденого значення q_i / ϑ_{3B} . Якщо ні, то треба задатися проміжним значенням ω і всі розрахунки повторити знову.

3.14 Регулювання термічного циклу при наплавленні, а також однопрохідному і багатопрохідному зварюванні в стик

Простий термічний цикл навколошовної зони при однопрохідному зварюванні або при наплавленні валика залежить від погонної енергії дуги, яка в першому наближенні пропорційна площі поперечного перерізу зони наплавлення або розроблення шва.

Зі збільшенням перерізу шва, тобто зі збільшенням його погонної енергії, збільшується тривалість нагрівання і зменшується швидкість охолодження.

Якщо для даної марки сталі швидкість охолодження дуже велика, то, збільшуючи перетин валика, можна сповільнити охолодження і цим самим послабити або виключити загартування. Але при цьому збільшується тривалість нагрівання навколошовної зони і виникає небезпека значного зростання зерна, яке, у свою чергу, може знизити показники пластичних властивостей зварного з'єднання (рис. 3.40).

При однопрохідному зварюванні або одношаровому наплавленні можна змінити загальний обрис кривої ізотермічного циклу, але не можна переломити цю криву на необхідному рівні температури і додати їй доцільну характеристику умовного термічного циклу.

Для того щоб наблизитися до такого циклу, необхідно або застосувати додатковий підігрів, або перейти до складного впливу дуги, тобто до багатошарового зварювання або наплавлення.



1 – простий термічний цикл; 2 – термічний цикл при зварюванні на великій погонній енергії; 3 – термічний цикл при зварюванні з підігрівом виробу

Рисунок 3.40 – Термічний цикл точки зварного з'єднання залежно від величини погонної енергії зварювання й підігріву виробу

При багатошаровому зварюванні проектний переріз шва заварюють у кілька проходів. Тому навколошовна зона зазнає багаторазове нагрівання.

Розрізняють два граничних типи теплового впливу багатошарового зварювання:

- багатошарове зварювання довгими ділянками;

- багатошарове зварювання короткими ділянками.

3.14.1 Термічний цикл при багатошаровому зварюванні довгими ділянками

При зварюванні довгими швами ділянка кожного шару має значну довжину (1...1,5 м).

На той час, коли заварюється кінець шару, початок його встигає майже повністю охолонути і тому термічний цикл наступного шару не залежить від укладання попередніх шарів.

При зварюванні вуглецевої або низьколегованої конструкційної сталі навколошовна зона може зазнати загартування з подальшим відпусканням. Навколошовна зона попереднього шару при укладанні наступного шару може нагріватися до температури, що не перевищує A_{C1}. При цьому відбувається відпускання загартованої зони з утворенням трооститу і сорбіту.

Тепловий вплив наступних шарів поліпшує структуру навколошовної зони основного металу, а також раніше наплавленого металу.

При зварюванні високовуглецевої, середньо- і високолегованої сталей у загартованій зоні першого шару і зоні термічного впливу можливо утворення тріщин ще до накладення наступних шарів.

В основу розрахунків режиму зварювання довгими ділянками покладена швидкість охолодження навколошовної зони першого шару у верхньому субкритичному інтервалі температур.

Наступні шари при однакових поперечних перерізах охолоджуються повільніше першого, і тому умову їх охолодження можна не перевіряти.

Швидкість охолодження розраховується за відомою методикою і у деяких випадках перевіряється за допомогою валикової проби.

3.14.2 Термічний цикл при багатошаровому зварюванні короткими ділянками

Довжина ділянки *l*, що накладається за один раз, становить від 50 до 400 мм, тому кожний наступний шар укладають на ще невстигнувший охолонути попередній шар, тобто тепловий вплив кожного шару накладається один на одного. При цьому складний термічний цикл складається з теплових впливів окремих шарів.

Розглянемо термічний цикл точки навколошовної зони першого і останнього шарів (рис. 3.41).



а – поперечний перетин шва; б – поздовжній перетин шва; в – накладення швів каскадом

Рисунок 3.41 — Схема накладення швів при багатопрохідному зварюванні короткими швами

Тепло другого шару не дасть металу навколошовної зони першого шару охолоджуватися нижче визначеної температури.

При накладенні другого шару температура навколошовної зони першого шару знову підвищується. Після заварювання другого, третього і т. д. шарів навколошовна зона першого шару, що випробовує спільний вплив тепла всіх накладених шарів, охолоджується все повільніше.

Процес прагне до стану, при якому навколошовна зона першого шару підтримується при малозмінній температурі. Після укладання всіх шарів навколошовна зона повільно охолоджується, тому що за час зварювання було введено багато тепла. Тобто термічний цикл навколошовної характеризується зони першого шару швидким нагріванням, швидким охолодженням до температура витримки Т_в і наступною витримкою протягом порівняно тривалого часу понад цю температуру.

Багатошарове зварювання виконується шарами або валиками (рис. 3.42).







Рисунок 3.42 – Термічні цикли точок, що перебувають у зоні термічного впливу

Режим зварювання можна підібрати таким чином, щоб навколошовна зона не охолоджувалася нижче температури початку мартенситного перетворення $T_{\rm H}$. При цьому $T_{\rm H} = 473...623$ К. Тоді переохолоджений аустеніт, що витримується в нижньому субкритичному інтервалі температур протягом визначеного часу, який залежить від марки сталі, розпадається. При цьому утворюється голчастий троостит, який має високу пластичність при високій міцності. Цей процес називається ізотермічним загартуванням. Режим багатошарового зварювання короткими ділянками доцільний при зварюванні сталей, здатних до різкого загартування і чутливих до росту зерна при перегріванні.

Температура навколошовної зони останнього шару підвищується поступово. Останній шар укладають на метал, підігрітий теплом попередніх шарів. Температура його навколошовної зони зростає вище T_{AC3} і потім падає зі швидкістю, значно меншою швидкості охолодження першого шару.

Тривалість нагрівання $t_{\rm H}$ навколошовної зони останнього шару, що нагрівався вище температури $T_{A_{C33}}$, більше, чим для зони першого шару. Тому зріст зерна в сталі, чутливої до перегріву, більш імовірний в навколошовній зоні останнього шару.

Після заварювання останнього шару в шов більше не надходить тепло, яке могло б сповільнити охолодження навколошовної зони або продовжити перебування переохолодженого аустеніту вище температури мартенситного перетворення T_н.

Охолодження зони трохи вповільнюється укладанням на поверхню шва так званого відпалюючого валика, який збільшує тривалість перебування металу навколошовної зони в аустенітній фазі (t_в' > t_в).

3.14.3 Розрахунки режимів багатошарового зварювання короткими ділянками

При багатошаровому зварюванні короткими ділянками можна зазначити два основні розрахункові параметри, що визначають вплив термічного циклу на структуру шва:

а) температура охолодження першого шару Т_в;

б) тривалість нагрівання t_в (вище T_в).

Температуру охолодження першого шару практично зручніше виразити через довжину ділянки, що одноразово заварюється l, при якій навколошовна зона першого шару в металі з початковою температурою T_0 охолоджується до $T_{\rm B}$:

$$\ell = \frac{0.04\kappa_{\Gamma}\kappa_{3}^{2}q_{i}^{2}}{\delta^{2} \mathcal{G}_{36}(T_{B} - T_{0})^{2}},$$
(3.112)

де κ_r – коефіцієнт чистого горіння дуги: $\kappa_r = 0,6-0,8 - для$ ручного багатошарового зварювання, $\kappa_r = 1 - для$ автоматичного зварювання під флюсом;

 κ_3 — поправковий коефіцієнт, що враховує тип з'єднання: для стикового з'єднання $\kappa_3 = 1,5$, для таврового з'єднання $\kappa_3 = 0,9$, для хрестоподібного з'єднання $\kappa_3 = 0,8$;

q_i – ефективна теплова потужність дуги;

δ-товщина металу, м;

9_{зв} – швидкість зварювання, м/с;

T_в – температура витримки; приймається відповідно до T_н або відповідно до температури ймовірного утворення холодних тріщин;

Т₀ – початкова температура металу.

Після цього проводиться розрахунок часу перебування металу при температурі, вищій за Т_в:

а) визначимо значення розрахункової потужності дуги q_p:

$$q_P = \kappa_\Gamma \kappa_{\mathcal{A}} q_i \,, \tag{3.113}$$

де κ_{d} – коефіцієнт приведення потужності дуги, що враховує тип з'єднання: $\kappa_{d} = 1 - для$ стикового з'єднання, $\kappa_{d} = 0,67 - для$ з'єднання втавр та внапустку, $\kappa_{d} = 0,6 - для$ хрестового з'єднання;

б) визначимо відносну температуру:

$$\Theta_{I} = \frac{2\lambda\delta l\sqrt{\frac{b}{a}}}{q_{P}} (T_{B} - T_{0}), \qquad (3.114)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності;

а – коефіцієнт температуропровідності;

δ-товщина металу;

l – довжина одноразово завареної ділянки;

b – коефіцієнт температуровіддачі з поверхні;

в) визначимо відносну розрахункову відстань навколошовної зони:

$$\rho_1 = \sqrt{\frac{b}{a}} |X|, \qquad (3.115)$$

де |X| – розрахункова відстань навколошовної зони від плоского джерела, яка дорівнює: для стикових з'єднань півширини розроблення кромок, для кутових швів половині довжини катета шва;

г) визначаємо відносну тривалість дії джерела, яка приймається за тривалість повного заварювання розглянутого шва, включаючи і перерви:

$$bt_c = b \frac{l}{\mathcal{G}_{_{36}}} \left(\frac{n-l}{\kappa_{_{\Gamma}}} + l\right), \qquad (3.116)$$

де n – кількість шарів;

д) за знайденими значенням bt_c , ρ_1 , Θ_1 за номограмами знаходимо відносну тривалість нагрівання bt_B навколошовної зони першого шару вище температури витримки (рис. 3.43) [2].



 $a - \rho_l = 0; \, \delta - \rho_l = 0, 1; \, \epsilon - \rho_l = 0, 2$

Рисунок 3.43 — Номограма для визначення тривалості перебування t_в вище визначеної температури T_в точок навколошовній зони залежно від тривалості дії t_c джерела

Знаходимо час витримки першого шару:

$$(t_{\mathfrak{g}})_l = \frac{bt_{\mathfrak{g}}}{b} . \tag{3.117}$$

е) тривалість нагрівання (t_в)_п навколошовної зони останнього шару вище температури витримки можна приблизно розрахувати з такого співвідношення:

$$(t_{_{\theta}})_{_{n}} \approx (t_{_{\theta}})_{_{l}} + \frac{l}{\mathcal{G}_{_{3\theta}}\kappa_{_{\Gamma}}} - t_{_{c}}$$
 (3.118)

Після цього отриману тривалість $(t_B)_n$ порівнюємо із тривалістю розпаду аустеніту t_c для даної марки сталі. Якщо розрахункова величина виявляється більшою за знайдену з діаграми розпаду аустеніту, то режим розрахований правильно.

Якщо $(t_{\rm B})_{\rm n}$ менше, чим $t_{\rm c}$, то потрібно зменшити довжину ділянки l.

3.15 Розрахунки плавлення основного металу при зварюванні 3.15.1 Зварювальна ванна. Зона проплавлення

Тепло зварювальної дуги корисно витрачається на розплавлення електродів і на проплавлення основного металу виробу.

Унаслідок високої концентрації тепла в плямі нагрівання зварювальна дуга миттєво нагріває поверхневий шар металу і перегріває його до температури кипіння. Безпосередньо під дугою утворюється зварювальна ванна. При цьому дуга натискає на поверхню ванни рідкого металу, унаслідок чого під дугою утворюється кратер. Глибина кратера, а отже і зварювальної ванни, залежить від інтенсивності дуття дуги, яка у свою чергу, визначається величиною зварювального струму, діаметром електрода, складом газової атмосфери, складом шлаків і т. д.

На практиці зустрічаються дуги з різним ступенем занурення у зварювальну ванну.

Крайніми прикладами є поверхнева дуга (рис. 3.44, а) і заглиблена дуга (рис. 3.44, б).



1 – основний метал; 2 – зварний шов; 3 – рідкий метал зварювальної ванни а – поверхнева дуга; б – заглиблена дуга

Рисунок 3.44 – Форми зварювальної ванни

При поверхневій дузі кратер неглибокий, пляма дуги мало заглиблюється щодо поверхні металу. Глибина проплавлення невелика, рідкий метал майже повністю перебуває під активним п'ятном дуги.

При зануренні дуги рідка ванна відтискується тиском дуги. Пляма і стовп дуги повністю або частково поринають в основний метал і більш ефективно оплавляють дно ванни і її передню ділянку.

Під дугою залишається лише досить тонкий шар рідкого металу.

Така дуга спостерігається при зварюванні на підвищених щільностях струму (при зварюванні під флюсом або в середовищі захисних газів), і при ручному зварюванні – при так званому способі зварювання обпертим електродом.

Якщо розрізати зварювальний шов, то в поперечному перерізі ми одержимо зону проплавлення, або слід переміщення зварювальної ванни.

Зона проплавлення, або зварювальна ванна, характеризується такими геометричними параметрами (рис. 3.44 та 3.45).



Рисунок 3.45 – Зварювальна ванна

L – довжина зварювальної ванни;

Н – глибина проплавлення;

В – ширина шва або ширина зони проплавлення;

А – величина перевищення наплавленого металу над основним металом;

F_н – величина площі наплавлення;

F_{ПР} – величина площі проплавлення.

Обрис зони проплавлення залежить від режиму зварювання й способу ведення дуги. Зона проплавлення характеризується і такими показниками:

a) μ – коефіцієнт повноти $\mu = \frac{F_{\Pi P}}{HB}$, який показує, яка частина прямокутника НВ зайнята зварним швом.

Коефіцієнт повноти є найбільш стійким показником для даного способу зварювання. Наприклад, при ручному дуговому зварюванні $\mu = 0, 6...0, 7;$

б)
$$\psi = \frac{H}{B}$$
 – відносна глибина проплавлення;

в) $\phi = \frac{B}{H}$ – коефіцієнт форми шва.

Ці коефіцієнти дуже важливі. Вони визначають технологічну міцність шва, а також схему кристалізації наплавленого металу. Тому, при накладанні шва, насамперед потрібно задатися коефіцієнтом форми шва φ . Теоретичний обрис зварювальної ванни розплавленого металу повинний відповідати миттєвому обрису ізотерми плавлення основного металу.

Прямий розрахунок на підставі наявних залежностей граничної температури від координат і часу надає змоги оцінити розміри зварювальної ванни та зони проплавлення тільки у випадку потужного швидкодіючого джерела.

Довжина зварювальної ванни визначається з формул процесів поширення тепла в пластині і напівнескінченному тілі:

а) при автоматичному наплавленні валика на масивне тіло:

$$(T-T_0)_{(r,t)} = \frac{q_i / \vartheta_{_{36}}}{2\pi\lambda t} e^{-\frac{r^2}{4at}};$$

б) при автоматичному зварюванні листів у стик з повним проплавленням:

$$(T - T_0)_{(y,t)} = \frac{q_i / \vartheta_{3B}\delta}{\sqrt{4\pi\lambda c\gamma t}} e^{-\frac{y^2}{4at} - b_l t}$$

Найбільша довжина зварювальної ванни спостерігається за її віссю, тобто при r = 0 і y = 0. Для спрощення розрахунків приймаємо, що $b_1 \approx 0$.

Тоді при автоматичному наплавленні валика на масивне тіло

$$(T_{nn} - T_0)_{(0,t)} = \frac{q_i / \mathcal{G}_{36}}{2\pi\lambda t_{nn}},$$

а при автоматичному зварюванні листів у стик з повним проплавленням

$$(T_{n\pi} - T_0) = \frac{q_i / \mathcal{G}_{3e}\delta}{\sqrt{4\pi\lambda t_{n\pi}c\gamma}}.$$

Визначимо час, протягом якого зварювальна ванна перебуває в розплавленому стані:

– при автоматичному наплавленні валика на масивне тіло:

$$t_{nn} = \frac{q_i / \mathcal{G}_{36}}{2\pi\lambda(T_{nn} - T_0)};$$
(3.119)

– при автоматичному зварюванні листів у стик з повним проплавленням:

$$t_{n\pi} = \frac{(q_i / \mathcal{G}_{3_{\theta}} \delta)^2}{4\pi \lambda c \gamma (T_{n\pi} - T_0)^2} \,. \tag{3.120}$$

Довжина зварювальної ванни у загальному випадку визначається як добуток швидкості зварювання на час перебування металу в зоні розплавлювання:

З урахуванням виражень (3.119) і (3.120), довжина зварювальної ванни при автоматичному наплавленні валика на масивне тіло та автоматичному зварюванні листів у стик з повним проплавленням відповідно дорівнює:

$$L = \frac{q_i}{2\pi\lambda(T_{nn} - T_0)},$$
 (3.121)

$$L = \frac{q_i^2 / \mathcal{G}_{_{36}} \delta^2}{4\pi \lambda c \gamma (T_{_{nn}} - T_{_0})^2}.$$
(3.122)

З цих залежностей випливають такі висновки:

– при автоматичному наплавленні валика на масивне тіло довжина зварювальної ванни пропорційна ефективній тепловій потужності дуги і не залежить від швидкості зварювання. У реальних умовах спостерігається деяка залежність довжини зварювальної ванни від швидкості зварювання. Це пов'язано з тим, що при виводі вихідних формул була прийнята ціла низка допущень;

 при автоматичному зварюванні листів у стик з повним проплавленням довжина зварювальної ванни пропорційна квадрату питомої потужності нагрівання (q_i / δ)² і обернено пропорційна швидкості зварювання.

3.15.3 Розрахунки параметрів зони проплавлення

Схеми зварних швів для розрахунку параметрів зони проплавлення наведені на рисунку 3.46.



Рисунок 3.46 – Схеми зварних швів для розрахунків параметрів зони проплавлення

Розглянемо випадок наплавлення валика на напівнескінченне тіло.

$$(T_{max} - T_0)_{(x_0)} = \frac{2}{\pi e} \frac{q_i / \vartheta_{36}}{c \gamma r_0^2}$$

Приймаємо $T_{max} = T_{nn}$. Якщо зробити допущення, що в = 2 r_0 , тоді ширина шва визначиться з виразу:

$$B = 2\sqrt{\frac{2q_i / \mathcal{G}_{3\theta}}{\pi e c \gamma (T_{n\pi} - T_0)}}.$$
(3.123)

Відповідно глибина проплавлення:

$$H=\frac{B}{2}.$$

При цьому площа проплавлення:

$$F_{np} = \frac{\pi B^2}{8} = \frac{q_i / \vartheta_{_{36}}}{ec \,\gamma (T_{nn} - T_0)}.$$
(3.124)

Для зварювання листів у стик з повним проплавленням параметри зони з'єднання визначаються з формули

$$(T_{max} - T_0)_{(y_0)} = \sqrt{\frac{2}{\pi e}} \frac{q_i / \vartheta_{3e} \delta}{c \gamma 2 y_0}.$$

Якщо зробити допущення, що $\mathbf{b} = 2\mathbf{y}_0$, тоді параметри шва визначаться з виразів:

$$B = \sqrt{\frac{2}{\pi e}} \frac{q_i / \mathcal{G}_{_{3\theta}} \delta}{c\gamma(T_{_{n\pi}} - T_{_0})}, \qquad (3.125)$$
$$H = \delta.$$

$$F_{np} = \sqrt{\frac{2}{\pi e}} \frac{q_i / \mathcal{G}_{_{36}}}{c\gamma(T_{n\pi} - T_0)}.$$
(3.126)

На підставі наявних залежностей можна розрахувати і об'єм ванни рідкого металу. Отримані залежності відносяться до потужних швидкорухомих дуг. Для того щоб мати аналогічні залежності для джерела нагрівання будь-якої потужності, що рухається з довільною постійною швидкістю, необхідно скористатися поняттям термічного к.к.д. процесу проплавлення.

3.15.4 Теплова ефективність процесу проплавлення

Кількість тепла, що витрачається на проплавлення основного металу за одиницю часу, може бути розрахована за формулою

$$q_{np} = F_{np} \vartheta_{_{36}} \gamma S_{_{nn}}, \qquad (3.127)$$

де 9_{зв} – швидкість зварювання, м/с;

γ – густина рідкого метала, кг/м³;

F_{пр} – площа проплавлення, м²

S_{пл} – тепломісткість розплавленого металу, Дж/кг.

Для низьковуглецевої сталі з урахуванням скритої теплоти плавлення $S_{nn} = 1,358 \times 10^6 \text{ Дж/кг}.$

Кількість тепла, яка витрачається на проплавлення металу, являє собою частину ефективної потужності нагрівання виробу та характеризується термічним к.к.д. процесу проплавлення:

$$\eta_t = \frac{q_{np}}{q_i}.$$
(3.128)

Звідси

$$q_{np} = \eta_t \cdot q_i,$$

$$q_i = \eta_i \cdot q_{3a2} = \eta_i \cdot U_{\partial} \cdot I_{36}.$$

$$q_{np} = \eta_t \cdot \eta_i \cdot q_{3az} = \eta_{np} \cdot q_{3az} , \qquad (3.129)$$

де $\eta_{np} = \eta_t \cdot \eta_i$ – повний тепловий к.к.д. процесу проплавлення;

q_{заг} – загальна потужність нагрівання виробу.

Якщо відомі параметри режиму зварювання і величина η_{np} , можна розрахувати площу проплавлення основного металу за формулою (3.127)

$$F_{np} = \eta_t \frac{q_i / \vartheta_{_{36}}}{\gamma S_{n\pi}} , \qquad (3.130)$$

де γS_{nn} – об'ємна тепломісткість.

Якщо вважати $\gamma S_{nn} = \text{const}$, то площа проплавлення пропорційна термічному к.к.д. процесу проплавлення та погонній енергії зварювання.

3.15.5 Визначення величини термічного к.к.д. процесу проплавлення

Достатньо просто визначити термічний к.к.д. η_t у випадку потужного швидкорухомого джерела. Він розраховується на підставі формул для розрахунків максимальних температур – (3.94) і (3.99).

3 виразу (3.94) одержуємо:

$$(T_{nn} - T_0)_{(r_0)} = \frac{1}{e} \frac{q_i / \mathcal{G}_{36}}{c\gamma} \frac{1}{\pi r^2 / 2}$$

Звідки

$$c\gamma (T_{n\pi} - T_0) \frac{\pi r^2}{2} \mathcal{G}_{36} = \frac{1}{e} q_i , \qquad (3.131)$$
$$\frac{1}{e} = 0.368 .$$

У рівнянні (3.131) ліва частина дорівнює q_{пр}, а права 0,368q_і. Звідси

$$\frac{q_{np}}{q_i} = \eta_t = 0,368.$$
(3.132)

При наплавленні валика на масивне тіло потужною дугою η_t набуває максимального значення $\eta_t = 0,368$.

При автоматичному зварюванні листів у стик за один прохід (за аналогією з наплавленням) з виразу (3.99) одержуємо:

$$(T_{nn} - T_0) = \sqrt{\frac{2}{\pi e}} \frac{q_i}{c \gamma \mathcal{P}_{36} 2 y_0 \delta}$$

Звідки

$$2y_0 \delta \mathcal{G}_{_{36}} c \gamma (T_{_{n,n}} - T_0) = \sqrt{\frac{2}{\pi e}} q_i .$$

Ліва частина рівняння дорівнює q_{np} , а права, з урахуванням того, що $\sqrt{\frac{2}{\pi e}} = 0,484$, дорівнює 0,484 q_i . Отже,

$$\eta_t = \frac{q_{np}}{q_i} = 0,484 \,. \tag{3.133}$$

У випадку зварювання тонких листів у стик потужною швидкорухомою дугою термічний к.к.д. набуває максимального значення, яке дорівнює 0,484.

У загальному випадку при зварюванні і наплавленні дугою будь-якої потужності величина η_t визначається за спеціальними номограмами.

При наплавленні валика на масивний виріб користуються графічною залежністю термічного к.к.д., як функцією безрозмірного критерію ξ₃:

$$\eta_t = f(\xi_3), \qquad (3.134)$$

де

$$\xi_3 = \frac{q_i \mathcal{G}_{36}}{a^2 S_{nn}^{\prime}}$$

де a – коефіцієнт температуропровідності; S'_{nn} – об'ємна тепломісткість розплавленого металу.

Величина η_t пропорційна швидкості зварювання і потужності дуги, тобто: чим потужніше джерело ми маємо і чим швидше воно пересувається по поверхні виробу, тим більш ефективно використовується тепло зварювальної дуги.

Залежність (3.134) подана на номограмі (рис. 3.47) [8] для різних відносин H/B. Як бачимо на рисунку 3.47, та сама крива може використовуватися для різних відносин H/B, наприклад: 0,1 і 2,5; 0,2 і 1,25; 0,3 і 0,83; 0,4 і 0,625. При збільшенні ξ_3 величина η_t зростає. Для відношення H/B = 0,5 максимальне значення η_t становить 0,368.



Рисунок 3.47 – Номограма для визначення термічного ККД при наплавленні валика на масивне тіло

Для випадку зварювання тонких листів у стик величина η_t визначається функцією іншого безрозмірного критерію, який дорівнює

$$\xi_2 = \frac{q_i}{\delta \cdot a \cdot S_{nn}^{\prime}}.$$

Залежність η_t від ξ_2 подана на рисунку 3.48 [8]. Як бачимо, зі збільшенням ξ_2 величина термічного к.к.д. зростає, і максимальне значення η_t становить 0,484.



Рисунок 3.48 – Номограма для визначення термічного к.к.д. при зварюванні тонких листів у стик

3.16 Розрахунки плавлення присаджувального електродного металу

Електрод нагрівають два джерела:

 дуга, яка вводить тепло через пляму нагрівання на робочому торці електрода;

 розподілене за об'ємом електрода джерело, тобто тепло, виділюване електричним струмом за законом Джоуля – Ленца за всією довжиною електродного стрижня – від місця струмопідвідного контакту до дуги.

Дуга нагріває електрод на порівняно невеликій ділянці 2...3 мм на торці електрода.

Струм, що протікає електродом, нагріває його за всією довжиною вильоту. При невеликих вильотах електрода і малій щільності струму нагрівання електрода струмом можна не враховувати. Але зі збільшенням вильоту і щільності струму нагрівання струмом проявляється все сильніше.

При великій щільності струму, при автоматичному і напівавтоматичному зварюванні у вильоті електрода може виділятися до 25...40 % усієї кількості тепла, що витрачається на плавлення електрода.

3.16.1 Нагрівання електрода струмом. Тепловий баланс

При ручному дуговому зварюванні неможливо говорити про відновлення температурного поля, тому що електрод увесь час розплавляється, його довжина (виліт) увесь час зменшується, розміри температурного поля увесь час змінюються, але, тому що різні перерізи електрода нагріваються протікаючим у різний час через електрод струмом, то можна побудувати криву залежності температури за довжиною електрода L_Э (рис. 3.49).



Рисунок 3.49 – Залежність температури від нагрівання зварювальним струмом

При автоматичному або напівавтоматичному зварюванні максимальна температура досягається біля торця електрода, який нагрівається дугою (рис. 3.50).



Рисунок 3.50 – Залежність температури від довжини вильоту електрода при автоматичному зварюванні

Тепловий баланс від нагрівання електрода струмом при ручному дуговому зварюванні покритим електродом визначається в такий спосіб.

В електроді виділяється тепло Q.

Це тепло витрачається на підвищення тепломісткості електродного стрижня Q_1 , шару покриття Q_2 і на тепловіддачу в навколишнє середовище Q_3 :

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

При ручному дуговому зварюванні необхідно враховувати всі складові теплового балансу.

При цьому Q визначається із закону Джоуля – Ленца:

$$Q = I_{36}^2 \rho_T \cdot \frac{l_{e\pi}}{F_{e\pi}} dt, \qquad (3.135)$$

де ρ_T – питомий опір матеріалу електрода при температурі нагрівання електрода струмом T_T ;

F_{ел} – площа поперечного перерізу електродного металевого стрижня.

*l*_{ел} – довжина електродного металевого стрижня.

Підвищення тепломісткості електродного металевого стрижня визначається таким чином:

$$Q_I = (c\gamma)_{T_T}^{\prime} \frac{dT}{dt} F_{e\pi} l_{e\pi} dt, \qquad (3.136)$$

де $(c\gamma)_{T_T}^{/}$ – об'ємна теплоємність металу стрижня при температурі його нагрівання T_T.

Тепломісткість електродного покриття Q2 визначається за формулою

$$Q_2 = (c\gamma)_{T_T}^{//} \frac{dT}{dt} F_n l_{e_n} dt, \qquad (3.137)$$

де $(c\gamma)_{T_T''}^{/\prime}$ – об'ємна теплоємність покриття при температурі його нагрівання T_T ;

F_п – площа поперечного перерізу покриття електрода.

Тепловіддача в навколишнє середовище Q₃ визначається зі співвідношення

$$Q_{3} = \alpha_{n} (T'' - T_{0}) \pi d_{n} l_{en} dt , \qquad (3.138)$$

де α_n – коефіцієнт повної поверхневої тепловіддачі покриття електрода при температурі його нагрівання;

Т₀ – температура навколишнього середовища;

d_п – зовнішній діаметр покритого електрода.

У записаних рівняннях (у складових теплового балансу) утримується велика кількість змінних, які змінюються зі збільшенням температури нагрівання. Тому, навіть якщо прийняти цілий ряд допущень, розв'язати рівняння теплового балансу в загальному вигляді не вдасться. Його спрощують і вирішують чисельним методом: увесь інтервал температур нагрівання електрода поділяють на окремі відрізки; наприклад 0...50 °C; 50...100 °C; 100...150 °C і т. д.

У кожному інтервалі температур визначають змінні теплофізичні константи: ρ_T ; $(c \gamma)_T$; $(\alpha_n)_T$.

Після цього з рівняння теплового балансу розраховують параметр $\Delta T / \Delta t$.

Звідси визначають Δt і будують графік залежності T = f(t) (рис. 3.51).

Такий розрахунок дозволяє висновити:

1. При заданих діаметрі електрода і щільності струму в ньому існує гранична температура нагрівання T_{rp} , тому що втрати на тепловіддачу в навколишнє середовище зростають інтенсивніше виділення тепла від проходження струму.

2. Чим тонше електрод при заданій щільності струму, тим нижче гранична температура нагрівання і тим повільніше він буде нагріватися.

3. З підвищенням щільності струму нагрівання прискорюється.

4. Покритий електрод при рівній щільності струму нагрівається повільніше голого. Ця особливість пов'язана з накопиченням тепла в шарі покриття.



Рисунок 3.51 – Залежність температури нагрівання покриття від часу зварювання електродом

Ці висновки підтверджуються даними вимірів температури на поверхні покриття залежно від часу горіння дуги

3.16.2 Наближений метод розрахунків процесу нагрівання електрода струмом

Найцікавішим для практики діапазоном температур є 273...1 100 К. У цьому діапазоні спостерігається лінійна залежність між теплофізичними константами сγ, α, ρ і температурою. Тому розв'язання рівняння теплового балансу значно спрощується.

Після підстановки всіх лінійних залежностей у вихідне рівняння теплового балансу і проведення ряду математичних перетворень виходить наближене рівняння теплового балансу (формула для розрахунків нагрівання електрода струмом):

$$\frac{\mathcal{A}_{I} + T_{T}}{T_{\Gamma T} - T_{T}} = \frac{\mathcal{A}_{I} + T_{0}}{T_{\Gamma T} - T_{0}} e^{nt} , \qquad (3.139)$$

де Д₁ – постійна, яка залежить від типу електрода і роду струму;

T_т – розрахункова температура електрода, отримана внаслідок нагрівання струмом;

T₀ – початкова температура електрода (температура навколишнього середовища);

t – час нагрівання електрода, с;

 $T_{\Gamma T}$ – гранична температура нагрівання, що наступає при нескінченно тривалій дії струму, тобто при t $\rightarrow \infty$:

$$T_{\Gamma T} = m \cdot d_{e\pi} \cdot j^2 + T_0 , \qquad (3.140)$$

де m – постійна величина, яка залежить від типу електрода;

j – щільність струму, А/мм²;

d_{ел} – діаметр електродного стрижня, мм.

Для визначення безрозмірного часу нагрівання nt розраховують параметр n за формулою

$$n = \frac{A}{md_{s}} \left(\frac{T_{TT}}{\mathcal{A}_{1}} + 1\right), \qquad (3.141)$$

де А – постійна величина, яка залежить від типу електрода і роду струму, наведена в таблиці 3.4.

Розрахунки значно спрощуються, якщо користуватися номограмою М. М. Рикаліна, яка зв'язує безрозмірний час нагрівання електрода nt, безрозмірну граничну температуру нагрівання $T_{\Gamma\Gamma} / Д_1$ і безрозмірну температуру нагрівання електрода струмом $T_{\Gamma} / Д_1$ (рис. 3.52) [8].

empymy					
Електрод			А,	п «С	m,
Дріт	Покриття	Рід струму	$(\mathrm{MM}^{2} \cdot ^{\circ}\mathrm{C}) / (\mathrm{A}^{2} \cdot \mathrm{c})$	Д ₁ , °С	$(\mathrm{MM}^3 \cdot {}^{\circ}\mathrm{C}) / \mathrm{A}^2$
Низько- вуглецевий	Крейдове	Постійний	0,031	240	2,65
		Змінний	0,037	300	2,65
	Якісне	Постійний	0,024	200	2,5
		Змінний	0,027	240	2,5

Таблиця 3.4 – Постійні параметри для різних електродів і роду струму



Рисунок 3.52 – Номограма для розрахунків нагрівання сталевих електродів струмом

Для розрахунків повинні бути задані d_e і тип покриття; рід струму і його величина; початкова температура електрода; час, після закінчення якого необхідно визначити температуру (найчастіше це час розплавлення стандартного електрода).

Розрахунки виконують за наступним алгоритмом.

1. З таблиці 3.4 знаходять постійні коефіцієнти: А, Д₁, т.

2. Визначають щільність струму:

$$j = \frac{4I_{36}}{\pi d_{e_{\pi}}^2} \, .$$

3. Визначають граничну температуру нагрівання за формулою (3.140) і розраховують безрозмірну температуру нагрівання Т_{ПР} / Д₁.

4. Розраховують параметр n за формулою (3.141) і знаходять безрозмірний час нагрівання nt.

5. За номограмою знаходять безрозмірну температуру нагрівання електрода $T_{\rm T}/Д_{\rm I}$, після чого визначають температуру нагрівання електрода струмом $T_{\rm T}$.

3.16.3 Розрахунки нагрівання електрода струмом при автоматичному і напівавтоматичному зварюванні

У цьому випадку необхідно врахувати, що покриття на електроді немає, а тепловідводом з поверхні зневажаємо через малу величину вильоту електрода, тому $Q = Q_1$.

Таким чином, спрощене рівняння теплового балансу буде:

$$Q = Q_{1}$$

Тобто все тепло йде на підвищення тепломісткості стрижня електрода.

При цьому:

$$Q = I_{36}^2 \frac{\rho_T L_6}{F_{e^{7}}} dt,$$

$$Q_1 = (c\gamma)_T \frac{dT}{dt} F_{en} L_e dt.$$

Тепловий баланс має вигляд:

$$I_{3e}^{2} \frac{\rho_{T} L_{e}}{F_{e\pi}} dt = (c\gamma)_{T} \frac{dT}{dt} F_{e\pi} L_{e} dt . \qquad (3.142)$$

Оскільки

$$\frac{I_{_{36}}^2}{F_{_{e_{\pi}}}^2} = j^2 \, .$$

Після скорочень рівняння (3.142) набуде вигляду:

$$j^{2}\left(\frac{\rho}{c\gamma}\right)_{T} = \frac{dT}{dt}.$$
(3.143)

При цьому коефіцієнти р і су залежать від температури.

Якщо електрод нагрівається в інтервалі температур 273...1 100 К, то між цими коефіцієнтами для даної сталі при температурі нагрівання і цими ж коефіцієнтами при 273 К існує лінійна залежність:

$$(\frac{\rho}{c\gamma})_T = (\frac{\rho}{c\gamma})_0 (1 + \beta T),$$

де Т – температура нагрівання;

β – постійна величина для даної марки сталі.

Підставивши цю залежність у диференціальне рівняння (3.143), ми одержуємо лінійне диференціальне рівняння з постійними коефіцієнтами:

$$T = \left(\frac{1}{\beta} + T_0\right) e^{kj^2 t} - \frac{1}{\beta}, \qquad (3.144)$$

де k – постійна величина для даної сталі:

$$k = \left(\frac{\rho}{c\gamma}\right)_0 \beta$$

Час нагрівання t розраховується за рівнянням

$$t=\frac{L_{e}}{\mathcal{Q}_{n}},$$

де ϑ_{n} – швидкість подачі електродного дроту, м/с; L_в – довжина вильоту, м. У рівнянні (3.144) T = T₀ за умови, що t = 0.

3.16.4 Розплавлення електрода. Тепловий баланс процесу розплавлення. Продуктивність процесу розплавлення. Коефіцієнт розплавлення

Кількість тепла, що вводиться зварювальною дугою в електрод, являє собою частину загальної теплової потужності зварювальної дуги:

$$q_e = \eta_e q_{_{3a2}} = \eta_e I_{_{3e}} U_{_{\partial}} , \qquad (3.145)$$

де η_e – ефективний к.к.д. нагрівання електрода дугою, $\eta_e = 0,15...0,30.$

Ця кількість тепла витрачається на підвищення тепломісткості металу електрода від температури підігріву його струмом до температури крапель, що відриваються:

$$q_e = \vartheta_e \gamma F_e \left(S_\kappa - S_T \right) = q_p \left(S_\kappa - S_T \right), \qquad (3.146)$$

де ϑ_e – швидкість розплавлення електрода м/с;

γ − густина металу електрода кг/м³;

 F_{e} – площа поперечного перетину електрода, м²;

S_к – тепломісткість розплавленого металу електрода при температурі крапель, що відриваються (T_K), Дж/кг;

S_T – тепломісткість металу електрода при температурі підігріву електрода струмом, що протікає (T_т), Дж/кг;

 $q_P = \vartheta_e \gamma F_{en}$ – миттєва продуктивність розплавлення, кг/с.

Якби S_T була постійною за довжиною електрода, то миттєва продуктивність розплавлення теж залишалася б постійною.

Такою її можна вважати при автоматичному і напівавтоматичному зварюванні, якщо в процесі зварювання не міняється величина вильоту електрода.

При ручному дуговому зварюванні тепломісткість S_T увесь час зростає через розплавлювання електрода, і в результаті зросте й миттєва продуктивність розплавлювання електрода. Тому вводиться поняття середньої продуктивності розплавлення, яка при ручному дуговому зварюванні є дійсно якоюсь усередненою величиною, а при автоматичному і напівавтоматичному зварюванні вона дорівнює миттєвій продуктивності розплавлення.

Між миттєвою продуктивністю розплавлення і зварювальним струмом існує така залежність:

$$q_p = \alpha_p I_{_{36}},$$

де α_p – коефіцієнт пропорційності, який називається коефіцієнтом розплавлення.

Він являє собою масу електродного металу, що розплавляється за одиницю часу, яка припадає на кожний ампер зварювального струму, г/(A·c):

$$\alpha_p = \frac{q_p}{I_{36}}.$$

Практично користуватися такою залежністю незручно. Тому користуються залежністю:

$$\alpha_p = 3600 \frac{q_p}{I_{36}}.$$
 (3.147)

Величина коефіцієнта розплавлення залежить від способу зварювання, режиму зварювання, від роду і полярності струму.

При ручному зварюванні залежно від типу електрода $\alpha_p = 8...14 \ r/(A \cdot rog).$

При автоматичному і напівавтоматичному зварюванні відзначається дуже сильна залежність α_p від I_{3B} . При звичайних умовах однодугового зварювання $\alpha_p = 16-23$ г/(А·год) (автоматичне та напівавтоматичне зварювання). Існують різні способи підвищення коефіцієнта α_p до 40 г/(А·год).

Встановимо залежність між параметрами процесу зварювання і коефіцієнтом розплавлення. З урахуванням виразів (3.145) і (3.146) одержуємо:

$$\eta_e I_{3e} U_{\partial} = q_P (S_{\kappa} - S_T).$$

Звідки

$$q_P = \frac{\eta_e U_{\partial} I_{_{36}}}{S_{_{\kappa}} - S_T}.$$
(3.148)

Підставивши в рівняння (3.147) значення q_р згідно з (3.148), одержуємо:

$$\alpha_P = \frac{3600\eta_e U_{\partial}}{(S_{\kappa} - S_T)}.$$
(3.149)

Незважаючи на те, що в кінцевій формулі немає зв'язку між струмом дуги і коефіцієнтом розплавлення α_p , вони зв'язані між собою тісно, тому що зі зміною струму міняється добуток $\eta_e U_d$ і тепломісткість S_T

3.16.5 Нерівномірність розплавлювання електрода

При ручному дуговому зварюванні внаслідок підігріву електрода зварювальним струмом швидкість розплавлення електрода не залишається постійною, а збільшується через розплавлення електрода. Для характеристики нерівномірності плавлення електрода вводиться поняття коефіцієнта нерівномірності розплавлення електрода:

$$K_{H} = \frac{q_{p_{\text{max}}}}{q_{P0}} = \frac{\mathcal{G}_{e_{\text{max}}}}{\mathcal{G}_{e0}}, \qquad (3.150)$$

де q_{Pmax} – продуктивність розплавлення наприкінці плавлення електрода;

9_{етах} – швидкість розплавлення наприкінці плавлення;

q_{Po} і 9_{ео} – продуктивність розплавлення і швидкість розплавлення електрода в початковий момент його плавлення.

Зі збільшенням щільності струму коефіцієнт нерівномірного розплавлення електрода зростає:

$$q_{e} = \eta_{e} U_{\partial} I_{36} = q_{P_{max}} (S_{\kappa} - S_{T_{max}}).$$
(3.151)

3 рівняння (3.151) випливає:

$$q_{P_{max}} = \frac{\eta_e U_{\partial} I_{_{36}}}{S_{\kappa} - S_{T_{max}}},$$
(3.152)

де S_{Tmax} – тепломісткість електродного металу від нагрівання струмом наприкінці плавлення електрода.

Аналогічно можна записати продуктивність розплавлення електрода в початковий період плавлення:

$$q_{P_0} = \frac{\eta_e U_{\partial} I_{_{36}}}{S_{_{\kappa}} - S_{_{T_0}}},$$
(3.153)

де S_{т0} – тепломісткість електрода на початку плавлення електрода. Якщо вважати параметри режиму зварювання не мінливими в процесі плавлення електрода, то з урахуванням (3.150) одержимо:

$$K_{H} = \frac{S_{\kappa} - S_{T_{0}}}{S_{\kappa} - S_{T_{max}}}.$$
(3.154)

Це значить, що

$$S_{T_{max}} = f(T_{max}).$$

Коефіцієнт нерівномірності розплавлення залежить від температури, до якої нагрівається електрод струмом в кінці його плавлення.

Нерівномірність розплавлення електрода змінює параметри валика в процесі зварювання. Крім того, при значному перегріванні електрода (до 900 К і вище) руйнується електродне покриття.

Метал електрода може насититися шкідливими газами ще до розплавлення його дугою. Погіршується шлаковий захист зварювальної ванни, і якість металу шва різко падає. Тому бажано, щоб К_н був ближче до 1.

Для якісних електродів при паспортних значеннях струму $K_{\rm H} \approx 1,1$. У деяких випадках можна застосовувати підвищену щільність, але потрібно прагнути, щоб виконувалася умова $K_{\rm H} < 1,3$. Задаючись максимально допустимим значенням $K_{\rm H}$, можна визначити максимальну температуру нагрівання електрода струмом і на підставі цього розрахувати максимально допустимий струм для даного діаметра електрода, роду струму, типу покриття і т. д.

3.16.6 Продуктивність процесу наплавлення і проплавлення

При дуговому зварюванні і наплавленні одночасно протікають процеси проплавлення основного металу і розплавлення електрода. Співвідношення між наплавленим і проплавленим металом залежить від розподілу тепла дуги між електродом і виробом. При наплавленні доцільно, наприклад, збільшувати частку тепла, що витрачається на розплавлювання електрода. Але для заданого способу дугового зварювання регулювання розподілу тепла між електродом і виробом можливо в досить вузьких межах.

Для істотної зміни співвідношення між наплавленим і проплавленим металом необхідно різко міняти характеристики процесу.

Продуктивність процесу дугового зварювання і наплавлення визначається сумою мас наплавленого і проплавленого металу за одиницю часу:

$$q_{_{36}}=q_{_H}+q_{_{np}},$$

де q_н – продуктивність процесу наплавлення;

q_{пр} – продуктивність процесу проплавлення основного металу.

Очевидно, що продуктивності процесу наплавлення і проплавлення пов'язані із площами наплавлення і проплавлення:

$$q_{\mu} = F_{\mu} \vartheta_{36} \gamma, \qquad (3.155)$$

$$q_{np} = F_{np} \vartheta_{se} \gamma. \tag{3.156}$$

З іншого боку, продуктивність процесу наплавлення залежить від продуктивності розплавлення електрода та коефіцієнта втрат електродного металу на вигар і розбризкування:

$$q_{\mu} = q_{p} \left(l - \psi_{s} \right), \tag{3.157}$$

де $\psi_{\rm B}$ – коефіцієнт втрат електродного металу на вигар і розбризкування.

Цей коефіцієнт залежить від способу зварювання і режиму зварювання, складу газового середовища і складу електродного покриття, роду і полярності струму.

При зварюванні під флюсом $\psi_{\rm B} < (1-2)$ %. При ручному дуговому зварюванні для заданого типу електродного покриття і при правильно обраному режимі зварювання $\psi_{\rm B}$ є величиною приблизно постійною і перебуває в межах від 7 до 12 %.

При зварюванні в середовищі захисних газів розбризкування залежить від характеру переносу електродного металу. Найбільше розбризкування спостерігається при великокрапельному переносі розплавленого електродного металу через розрядний проміжок.

За аналогією із продуктивністю розплавлення можна зв'язати продуктивність процесу наплавлення зі струмом дуги за допомогою коефіцієнта наплавлення:

$$q_{\rm H} = \alpha_{\rm H} I_{\rm 36} ,$$

де $\alpha_{\rm H}$ – коефіцієнт наплавлення, г/А·с.

Коефіцієнт наплавлення являє собою масу наплавленого металу за одиницю часу, що припадає на кожний ампер зварювального струму, г/(A·c):

$$\alpha_{H} = \frac{q_{H}}{I_{36}}$$

Цією розмірністю користуватися незручно. Тому обирають час зварювання, який дорівнює 1 год, при якому виходять більш зручні значення $\alpha_{\rm H}$, г/(А·год):

$$\alpha_{H} = \frac{q_{H}}{I_{36}} 3600 \qquad (3.158)$$

За аналогією з вираженням (3.157) можна записати:

$$\alpha_{\mu} = \alpha_{p} \left(l - \psi_{s} \right), \qquad (3.159)$$

де α_P – коефіцієнт розплавлення, г/А·с.

Коефіцієнт наплавлення є тим показником, на підставі якого здійснюється нормування зварювальних робіт.

3.16.7 Розрахунки площ наплавлення і проплавлення

З виразу (3.155) для коефіцієнта наплавлення можна визначити площу наплавленого металу:

$$F_{\mu} = \frac{q_{\mu}}{\vartheta_{36}\gamma} = \frac{\alpha_{\mu}I_{36}}{3600\vartheta_{36}\gamma} = \frac{\alpha_{P}(1-\psi_{s})I_{36}}{3600\vartheta_{36}\gamma}.$$
 (3.160)

Якщо $I_{36} = \frac{q_{3a2}}{U_{\partial}}$, то

$$F_{\mu} = \frac{\alpha_{P} (1 - \psi_{\theta}) q_{3a2}}{U_{\theta} 3600 \vartheta_{3\theta} \gamma}, \qquad (3.161)$$
$$F_{H} = m_{I} \frac{q_{3a2}}{\vartheta_{3\theta}},$$

де
$$m_1$$
 – постійний коефіцієнт.

ефіцієнт.
$$m_1 = \frac{\alpha_P (1 - \psi_s)}{U_{\partial} 3600 \gamma}.$$

Таким чином, площа наплавленого металу є величиною прямо пропорційною потужності дуги і зворотньо пропорційною швидкості зварювання.

Площа проплавлення визначається з рівнянь (3.127) і (3.128):

$$F_{np} \vartheta_{36} \gamma S_{nn} = \eta_t q_i \; .$$

Звідки:

$$F_{np} = \eta_t \frac{1}{\gamma S_{n\pi}} \frac{q_i}{\vartheta_{36}} = m_2 \eta_t \frac{q_i}{\vartheta_{36}}, \qquad (3.162)$$
$$m_2 = \frac{1}{\gamma S_{n\pi}},$$

де m₂ – постійний коефіцієнт.

Площа проплавлення пропорційна погонній енергії зварювання і термічному к.к.д. процесу проплавлення. Важливим показником є коефіцієнт площ:

$$\frac{F_{np}}{F_{H}} = \frac{m_2 \eta_t q_i / \vartheta_{36}}{m_1 q_{3a2} / \vartheta_{36}} = m \eta_t \eta_i .$$

Цей показник характеризує проплавлюючу здатність дуги. Чим він вище, більше проплавленого і менше наплавленого тим металу у звареному шві. Він пропорційний термічному процесу К.К.Д. проплавлення та ефективному к.к.д. нагрівання виробу дугою.

3.16.8 Шляхи підвищення продуктивності процесу дугового зварювання і наплавлення

Умовним критерієм продуктивності процесу вважається швидкість зварювання. На практиці зустрічаються шви з різним співвідношенням наплавленого і проплавленого металу.

I тип швів – це: 1. Кутові шви, утворені переважно наплавленим металом: При цьому відношення $\frac{F_{np}}{F_n} \rightarrow 0$.



Рисунок 3.53 – Схема шва, утвореного переважно наплавленим металом

2. Шви, виконані з розробленням кромок основного металу.



Рисунок 3.54 – Схема шва, виконаного з розробленням кромок основного металу

3. Наплавлення на основний метал.



Рисунок 3.55 – Схема шва, виконаного наплавленням на основний метал

II тип швів – ці шви виконуються за рахунок проплавлення основного металу:

1. Кутові шви із глибоким проваром.



Рисунок 3.56 – Схема кутового шва із глибоким проваром

2. Стикові шви, виконані без розроблення кромок.



Рисунок 3.57 – Схема стикового шва, виконаного без розроблення кромок

Для підвищення швидкості зварювання швів і типу необхідно збільшувати продуктивність наплавлення електродного металу, тобто необхідно вибирати зварювальні матеріали і режим зварювання такими, щоб забезпечити максимальну площу наплавлення при мінімальній площі проплавлення.

Для підвищення швидкості зварювання швів II типу слід збільшувати продуктивність проплавлення основного металу. Кількість присаджувального металу повинне бути мінімальним.

Шляхи підвищення швидкості зварювання і наплавлення швів обох типів будуть різними.

Для швів і типу

Відповідно (3.155)

$$q_{_{H}}=F_{_{H}}\vartheta_{_{36}}\gamma.$$

Звідси одержуємо:

$$\vartheta_{_{36}} = \frac{q_{_H}}{F_{_H}\gamma} = \frac{\alpha_{_H}I_{_{36}}}{F_{_H}\gamma}.$$
(3.163)

Швидкість зварювання швів і типу залежить від $\alpha_{\rm H}$ і $I_{\rm 3B}$.

Підвищувати струм дуги в багатьох випадках не можливо, тому що це пов'язано із зайвим проплавленням основного металу. У такому випадку визначальним фактором підвищення швидкості зварювання є коефіцієнт наплавлення $\alpha_{\rm H}$.

Для підвищення α_н відомі такі методи:

a) при ручному дуговому зварюванні – введення залізного порошку в електродне покриття;

б) при автоматичному і напівавтоматичному зварюванні: використання залізного порошку, залізних окатишів, металевої крупки;

в) введення в зону дуги додаткового присаджувального дроту (не струмоведучого);

г) зварювання зі збільшеним вильотом електродного дроту;

д) застосування прямої полярності.

Коефіцієнт наплавлення може бути збільшений відповідним підбором зварювальних матеріалів.

Для швів II типу

Швидкість зварювання знаходиться з визначення площі проплавлення згідно з визначенням коефіцієнта повноти проплавлення і теплової потужності процесу проплавлення.

Коефіцієнт повноти проплавлення дорівнює:

$$\mu = \frac{F_{np}}{HB}.$$

184

Звідси

$$F_{np} = \mu H B \frac{H / B}{H / B} = \mu \frac{H^2}{H / B}.$$
(3.164)

При зварюванні швів II типу основною вимогою є забезпечення необхідної глибини проплавлення

Відношення теплової потужності, витраченої на проплавлення, до повної теплової потужності дуги називають повним тепловим коефіцієнтом корисної дії:

$$\eta_{np} = \frac{F_{np} \gamma \vartheta_{36} S_{nn}}{U_{\partial} I_{36}}.$$
(3.165)

Звідси знаходимо площу проплавлення:

$$F_{np} = \frac{\eta_{np} U_{\partial} I_{_{36}}}{\gamma S_{nn} \Theta_{_{36}}}.$$
(3.166)

Дорівнявши вирази (3.164) і (3.166), одержимо:

$$\mu \frac{H^2}{H/B} = \frac{\eta_{np} U_{\partial} I_{_{36}}}{\gamma S_{n_3} \Theta_{_{36}}}.$$
 (3.167)

3 рівняння (3.167) знаходимо:

$$\vartheta_{36} = \frac{\eta_{\Pi P} U_{\partial} I_{36} \frac{H}{B}}{\mu H^2 \gamma S_{n\pi}}.$$
(3.168)

Нехай

$$\mu H^2 \gamma S_{n\pi} = \frac{1}{m_3} = const,$$

тоді

$$\vartheta_{36} = m_3 \frac{H}{B} \eta_{np} q_{3a2} = m_3 \frac{H}{B} \eta_i \eta_t q_{3a2} = m_3 \frac{H}{B} \eta_t q_i \ .$$

Отже, швидкість зварювання швів II типу пропорційна ефективній тепловій потужності дуги і термічному к.к.д. процесу проплавлення, тобто чим більше потужність дуги, тим ефективніше здійснюється передача тепла дуги виробу й чим вище термічний к.к.д. проплавлення, тим вища швидкість зварювання.

Для підвищення швидкості зварювання швів II типу необхідно:

a) використовувати способи зварювання, що допускають великі значення теплової потужності;

б) зварювання вести на параметрах режиму, що забезпечує максимальне значення відносної глибини проплавлення.

Приклад 1 [6]. Визначити температуру огарка електрода діаметром $d_{en} = 4$ мм з низьковуглецевої сталі на зварювальному струмі $I_{3B} = 120$ А. Довжина робочої частини електрода $\Delta l = 400$ мм, коефіцієнт розплавлення $\alpha_p = 10$ г/(А·год). Питомий опір низьковуглецевої сталі $r = 14 \times 10^{-6}$ Ом/см, об'ємна теплоємність с $\gamma = 5$ Дж/(см³·K).

Розв'язання. Спочатку знаходимо масу робочої частини стрижня електрода:

$$\Delta m = \rho F \Delta l = \rho \frac{\pi d_{e_{\pi}}^{2}}{4} \Delta l = 7.8 \cdot \frac{3.14 \cdot 0.4^{2}}{4} 40 = 39.22.$$

Визначаємо час протікання струму Δt , використовуючи формулу

$$\alpha_p = \frac{\Delta m}{I_{3e}\Delta t} = \frac{39,2}{10 \cdot 120} = 0,0327 \text{ cod} = 117,6c.$$

Час розплавлення робочої частини електрода дорівнює приблизно 2 хв. Протягом цього часу огарок електрода нагрівався струмом. Без урахування тепловіддачі з поверхні і нагрівання дугою приріст температури огарка згідно з рівнянням (3.143) дорівнює:

$$\Delta T = \frac{r}{c\gamma} \left(\frac{I_{36}}{F}\right)^2 \Delta t = \frac{14 \cdot 10^{-6}}{5} \left(\frac{120}{0,1256}\right)^2 \cdot 117, 6 = 300K.$$

Таким чином, з урахуванням початкової температури стрижня 293 К температура огарка буде дорівнювати 593 К.

Приклад 2. Для електрода із прикладу 1 оцінити припустимий зварювальний струм, якщо покриття починає втрачати свої захисні властивості при температурі 773 К.

Розв'язання. При припустимому зварювальному струмі $I_{_{3B}}$ температура огарка досягне свого граничного значення $T_{rp} = 773$ К за час

∆t, яке можна знайти з формули (3.143). Зневажаючи тепловіддачею з поверхні, отримуємо вираз для приросту температури:

$$T_{zp} - T_{noy} = \frac{r}{c\gamma} \left(\frac{I_{36}}{F}\right)^2 \Delta t = \frac{r}{c\gamma} \left(\frac{I_{36}}{F}\right)^2 \frac{\Delta m}{\alpha_p I_{36}}$$

Звідси виражаємо припустимий зварювальний струм:

$$I_{36} = \frac{\alpha_p \cdot F^2 \cdot c\gamma(T_{2p} - T_{nov})}{3600r\Delta m} = \frac{10 \cdot 0.1256^2 \cdot 5.0(773 - 293)}{3600 \cdot 14 \cdot 10^{-6} \cdot 39.2} = 192A.$$

Приклад 3. Визначити зміну температури низьковуглецевого зварювального дроту діаметром $d_{e_n} = 4$ мм на відстані 30 мм від струмопідводу при механізованому зварюванні струмом $I_{3B} = 800$ А. Коефіцієнт розплавлення прийняти $\alpha_p = 20$ г/(А·год). Питомий опір низьковуглецевої сталі $r = 14 \times 10^{-6}$ Ом/см, об'ємна теплоємність с $\gamma = 5$ Дж/(см³·K).

Розв'язання. Спочатку визначаємо масу ділянки дроту довжиною 30 мм і час його розплавлення:

$$\Delta m = \rho F \Delta l = \rho \frac{\pi d_{en}^{2}}{4} \Delta l = 7.8 \cdot \frac{3.14 \cdot 0.4^{2}}{4} 3 = 2,942,$$

$$\Delta t = \frac{\Delta m}{\alpha_p I_{36}} = \frac{2,94}{20 \cdot 800} = 0,000184200 = 0,66c.$$

Без врахування тепловіддачі з поверхні і нагрівання дугою приріст температури в перерізі, який розглядається, становитиме:

$$\Delta T = \frac{r}{c\gamma} \left(\frac{I_{38}}{F}\right)^2 \Delta t = \frac{14 \cdot 10^{-6}}{5} \left(\frac{800}{0,1256}\right)^2 \cdot 0,66 = 75K.$$

Таким чином, на відстані 30 мм від струмопідводу змінення температури дроту буде дорівнювати 75 К.

ЛІТЕРАТУРА

1 Сварка в машиностроении : справочник : в 4 т. / Н. А. Ольшанский [и др.]. – М. : Машиностроение, 1978. – Т. 1. – 504 с. : ил.

2 Теория сварочных процессов : учебник для вузов по специальности «Оборудование и технология сварочного производства» / В. Н. Волченко [и др.]; под ред. В. В. Фролова. – М. : Высшая школа, 1988. – 559 с. : ил.

3 Серенко, А. Н. Сварка. Введение в специальность : учебное пособие / А. Н. Серенко, В. А. Роянов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Мариуполь : Изд-во ПГТУ, 2001. – 260 с.

4 Серенко, О. М. Зварювання. Вступ до спеціальності : підручник / О. М. Серенко, В. О. Роянов. – Мариуполь : Изд-во ПДТУ, 2008. – 260 с. – ISBN 966-604-115-4

5 Бер, Г. Д. Техническая термодинаміка : пер. с нем / Г. Д. Бер. – М : Мир, 1977. – 360 с.

6 Теория сварочных процессов : учебник для вузов / А. В. Коновалов, А. С. Куркин, Э. Л Макаров, В. М. Неровный, Б. Ф. Якушин; под ред. В. М. Неровного. – М. : изд-во МГТУ им. Баумана, 2007. – 752 с. : ил.

7 Кох, Б. А. Основи термодинамики металлургических процессов сварки / Б. А. Кох. – Л. : Судостроение, 1975. – 233 с.

8 Рыкалин, Н. Н. Расчеты теплових процессов при сварке / Н. Н. Рыкалин. – М. : Машгиз, 1951. – 296 с.

9 Багрянский, К. В. Теория сварочных процессов / К. В. Багрянский, з. А. Добротина, К. К. Хренов. – К. : Вища школа, 1976. – 424 с.

10 Петров, Г. Л. Теория сварочных процессов (с основами физической химии) : учебник для вузов / Г. Л. Петров, А. С. Тумарев. – 2-е изд., перераб. – М. : Высшая школа, 1977. – 392 с. : ил.

11Киреев, В.А. Методы практических расчетов в термодинамике

химических реакций / В. А. Киреев. – М. : Химия, 1975. – 535 с.

Исаев, С. И. Термодинамика : учебник для вузов / С. И. Исаев. – 3-е изд., перераб. – М. : изд-во МГТУ им. Баумана, 2000. – 416 с.

Махненко, В. И. Тепловые процессы при сварке // Сварка в СССР / В. И. Махненко. – М. : Наука, 1981. – Т. 2. – 494 с.

Махненко, В. И. Тепловые процессы при механизированной наплавке деталей типа круговых цилиндров / В. И. Махненко, Т. Г. Кравцов. – К. : Наукова думка, 1976. – 159 с.

Навчальне видання

КАРПЕНКО Володимир Михайлович БОГУЦЬКИЙ Олександр Андрійович ГРИНЬ Олександр Григорович ЖАРІКОВ Сергій Володимирович

ТЕОРІЯ ПРОЦЕСІВ ЗВАРЮВАННЯ

Навчальний посібник

для студентів спеціальності «Обладнання і технологій зварювального виробництва»

> Редактор I. Комп'ютерна верстка

I. I. Дьякова О. П. Ордіна

34/2011. Формат 60 х 84/8. Ум. друк. арк. Обл.-вид. арк.. Тираж пр. Зам. № .

Видавець і виготівник Донбаська державна машинобудівна академія 84313, м. Краматорськ, вул. Шкадінова, 72. Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1633 від 24.12.2003