

3.11 Вплив погонної енергії і теплофізичних властивостей металу на форму температурного поля

Погонна енергія q_p являє собою теплову потужність нагрівання виробу дугою, що припадає на кожний погонний метр зварного шва, Дж/м:

$$q_p = \frac{q_i}{g_{зв}}. \quad (3.83)$$

Розглянемо вплив зміни q_p і $g_{зв}$ на форму температурного поля дуги:

1) q_i – зростає; $g_{зв} = \text{const}$; q_p – зростає.

З підвищенням q_p зона, яка обмежена ізотермічними кривими, розширюється (рис. 3.25, а) [8];

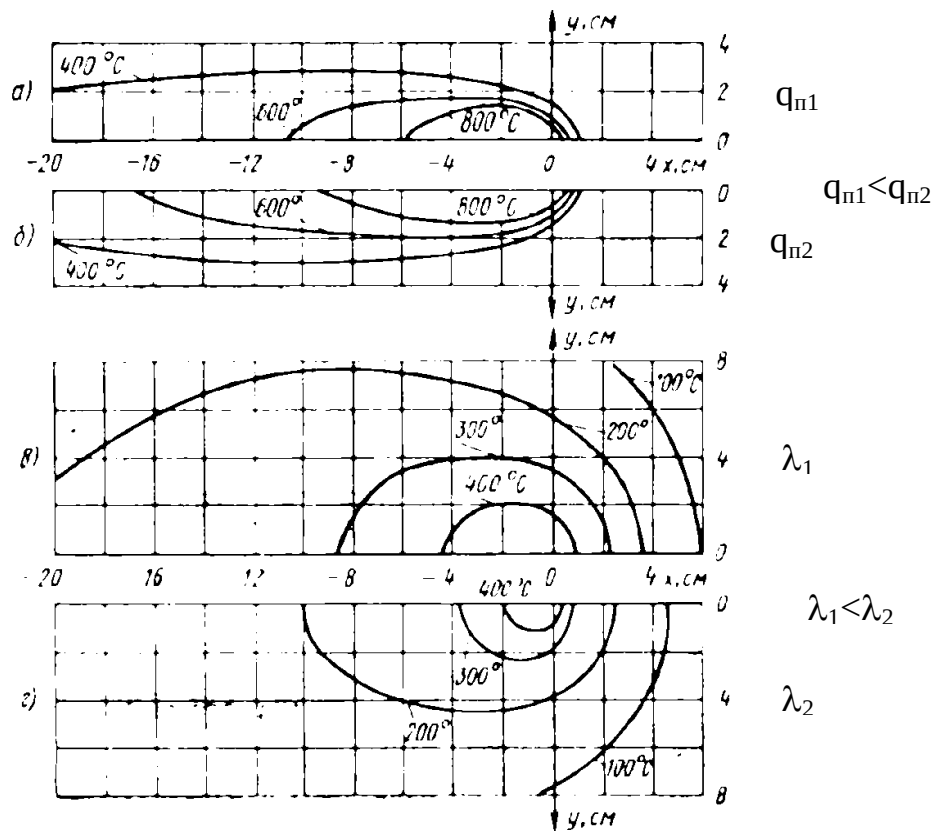
2) $q_i = \text{const}$; $g_{зв}$ – зростає; q_p – зменшується.

У цьому випадку зона, обмежена ізотермами, звужується, а довжина зварювальної ванни трохи зменшується. При істотному збільшенні $g_{зв}$ ізотерми стають паралельними (рис. 3.25, б);

3) q_i – зростає; $g_{зв}$ – зростає; $q_p = \text{const}$.

У цьому випадку переважаючий вплив виявляє q_i , тобто зона, яка обмежена ізотермами, розширюється зі збільшенням потужності (рис. 3.25, в).

При зварюванні матеріалів з високою теплопровідністю область високих температур звужується, а низьких температур – розширюється (рис. 3.25, г).



а, б – вплив погонної енергії зварювання на форму температурних полів;
в, г – вплив коефіцієнта теплопровідності на форму температурних полів

Рисунок 3.25 – Вплив погонної енергії зварювання q_n , і коефіцієнта теплопровідності λ на форму температурного поля дуги

3.12 Ширина зони нагрівання

Для оцінки термічного впливу на метал, що зварюється, буває необхідно визначити розміри зони $2l$, яка нагрівалася вище заданої температури T_l (рис. 3.26).

У загальному випадку ширина зони нагрівання вище температури T_l , яка обумовлена величиною $2l$, буде знайдена, якщо визначити координату в точці А. Точка А, по-перше, перебуває на ізотермі і, отже, має температуру T_l , по-друге, у точці А досягається максимальна температура на відстані $y = l$, тобто $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$.

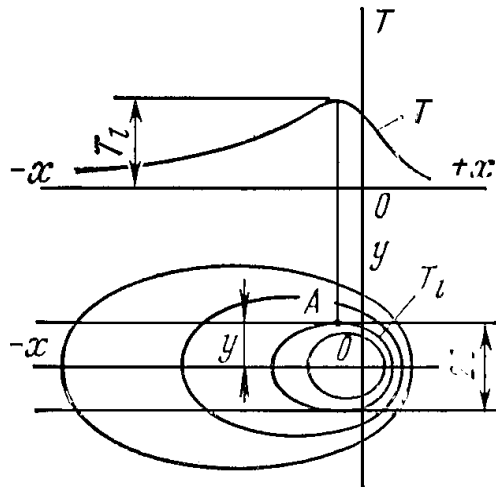


Рисунок 3.26 – Ширина зони $2l$, яка нагрівалася вище температури T_l

Таким чином, для визначення ширини зони необхідно розв'язати систему двох рівнянь. Покажемо це на прикладі наплавлення валика на масивне тіло. З рівняння (3.58) знаходимо:

$$T_l = \frac{q}{2\pi\lambda R} e^{-\frac{\vartheta}{2a}(x+R)}, \quad (3.84)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = -\frac{q}{2\pi\lambda R^2} e^{-\frac{\vartheta}{2a}(x+R)} \left[\frac{x}{R} + \frac{\vartheta}{2a}(x+R) \right]. \quad (3.85)$$

Вважаючи $z = 0$ і враховуючи, що $l^2 = y^2 = R^2 - x^2$, з рівнянь (3.84) і (3.85) знаходимо два рівняння в параметричній формі:

$$\frac{\vartheta l}{2a} = \pm \frac{\rho_3}{1 + \rho_3} \sqrt{1 + 2\rho_3}, \quad (3.86)$$

$$\frac{T_l \cdot 4\pi\lambda a}{q\vartheta} = \frac{1}{\rho_3} e^{-\frac{\rho_3}{1+\rho_3}}, \quad (3.87)$$

де $\rho_3 = \frac{\vartheta R}{2a}$.

Задаючись різними значеннями ρ_3 , знаходимо значення $\frac{\vartheta l}{2a}$ відповідні різним T_l . на рисунку 3.27, а у М. М. Рикаліна [8] представлена номограма для визначення ширини зони термічного впливу.

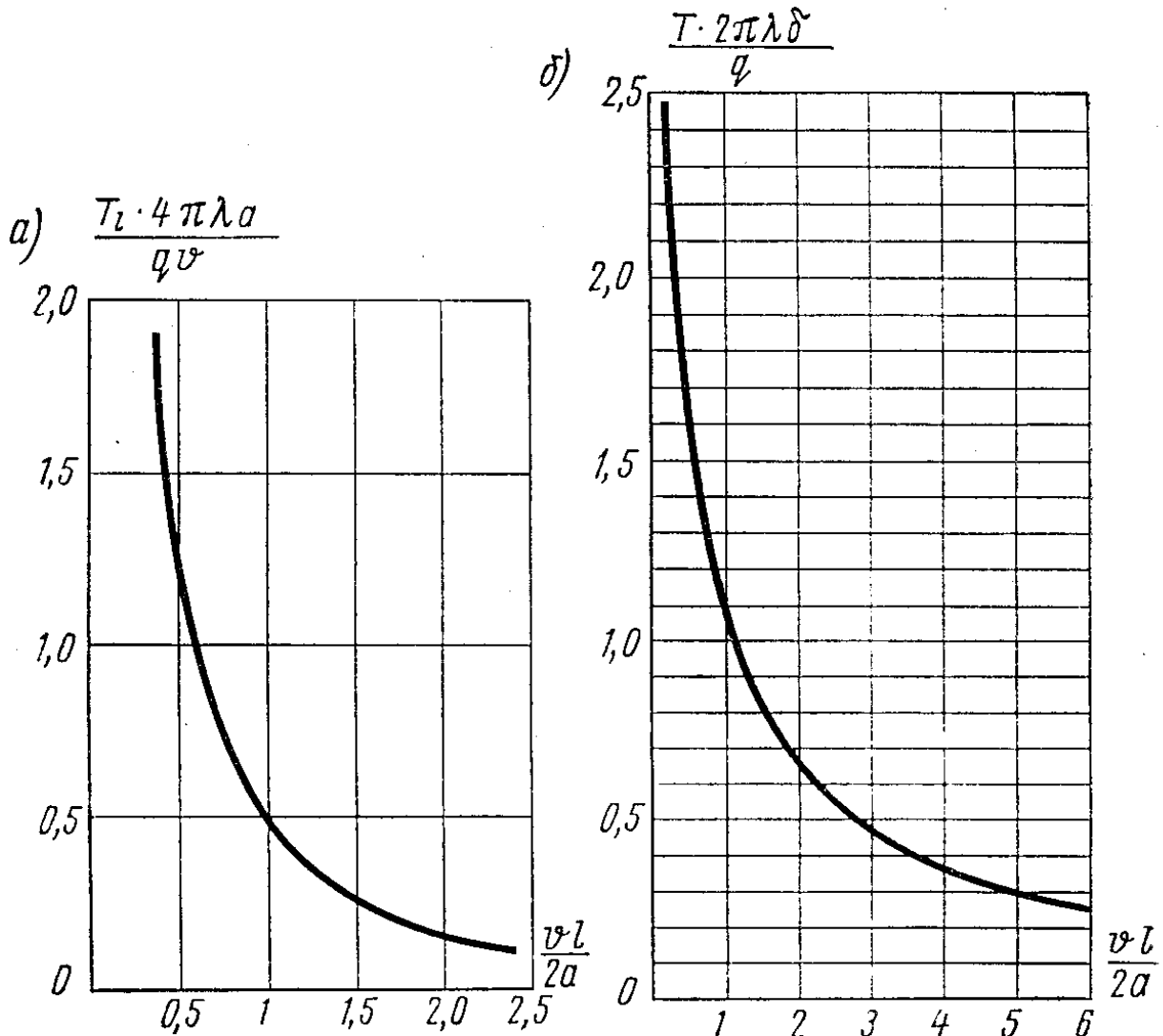


Рисунок 3.27 – Номограми для визначення ширини зони нагріву $2l$ рухомим джерелом теплоти

Знаючи режим зварювання, знаходимо спочатку значення параметра, відкладеного по вертикальній осі, а потім $\frac{vl}{2a}$. Для потужного швидкорухаючогося точкового джерела теплоти на поверхні напівнескінченного тіла, використовуючи рівняння (3.69), аналогічним чином визначимо ширину зони термічного впливу:

$$2l = \sqrt{\frac{8q}{\pi \vartheta_{cp} T_l}}. \quad (3.88)$$

Ширина зони нагрівання при зварюванні пластини визначається аналогічно напівнескінченному тілу.

На рис. 3.27, б показана номограма для визначення ширини зони нагрівання при зварюванні пластини у випадку $b = 0$.

Для потужного швидкорухомого лінійного джерела теплоти в пластині ширина зони термічного впливу визначається з використанням рівняння (3.70) при $b = 0$ по формулі

$$2l = \frac{q \sqrt{\frac{2}{\pi \vartheta_{cp} \delta T_l}}}{\vartheta_{cp} \delta T_l}. \quad (3.89)$$

Приклад 1 [2]. на поверхню масивного тіла проводиться наплавлення валика. Визначити ширину зони, що нагрівалася вище температури $T = 600^\circ\text{C}$, при якій вуглецева сталь у значній мірі втрачає пружні властивості. Режим зварювання: ефективна потужність джерела теплоти $q = 6\,000\text{ Дж/с}$; $\vartheta = 9\text{ м/с} = 0,25\text{ см/с}$. Теплофізичні коефіцієнти: $a = 0,08\text{ см}^2/\text{с}$; $\lambda = 0,39\text{ Дж/см}\cdot\text{с}\cdot\text{град}$; $cp = 4,9\text{ Дж/см}^2\cdot\text{град}$.

Розв'язання. Визначення ширини зони зробимо двома способами:

а) за номограмою на рисунку 3.27, а, придатною для джерел теплоти, що рухаються з будь-якою швидкістю;

б) за формулою (3.88) для швидкорухомого джерела теплоти.

Визначаємо безрозмірний критерій температури:

$$\frac{T_l \cdot 4\pi\lambda a}{q\vartheta} = \frac{600 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 0,39 \cdot 0,08}{6000 \cdot 0,25} = 0,157.$$

За номограмою на рисунку 3.27, а знаходимо:

$$\frac{\vartheta l}{2a} = 2,0.$$

Ширина зони, що нагрівалася понад 600 °С:

$$2l = 2 \cdot 2 \cdot \frac{2 \cdot 0.08}{0.25} = 2,56 \text{ см}.$$

Визначаємо ширину зони за формулою (3.88)

$$2l = \sqrt{\frac{8q}{\pi \rho c_p T_l}} = \sqrt{\frac{8 \cdot 6000}{3.14 \cdot 2.718 \cdot 0.25 \cdot 4.9 \cdot 600}} = 2.76 \text{ см}.$$

Помилка у визначенні ширини зони становить близько 8 %. Отже, при швидкостях зварювання близько 10 м/г і більш можна користуватися формулою (3.88).

Приклад 2. Листи з низьколегованої загартованої сталі $\delta = 8$ см зварюються за один прохід дуговим зварюванням при струмі 300 А, напрузі дуги $U = 34$ В і швидкості зварювання $v = 18$ м/г = 0,5 см/с, $\eta = 0,8$. Визначити ширину зони відпускання, яка перебуває приблизно між ізотермами 600 °С і 780 °С. Теплоємність сталі – 5,0 Дж/(см³·град).

Розв'язання. Знаходимо ефективну потужність джерела теплоти:

$$q = \eta UI = 0.8 \cdot 34 \cdot 300 = 8150 \text{ Дж/с}.$$

Скористаємося формулою (3.89) для потужних швидкорухомих джерел і визначимо ширину зони, що нагрівалася до $T = 600$ °С:

$$2l_{600} = \frac{8150 \sqrt{\frac{2}{3.14 \cdot 2.72}}}{0.5 \cdot 5 \cdot 0.8 \cdot 600} = 3.23 \text{ см}.$$

і ширину зони, що нагрівалася до $T = 780$ °С

$$2l_{780} = \frac{8150 \sqrt{\frac{2}{3.14 \cdot 2.72}}}{0.5 \cdot 5 \cdot 0.8 \cdot 780} = 2,52 \text{ см}.$$

Ширина зони відпускання

$$\Delta = \frac{2l_{600} - 2l_{780}}{2} = \frac{3.28 - 2.52}{2} = 0.38 \text{ см}.$$

3.13 Термічний цикл зварювання

Термічний цикл – це залежність температури точки від часу і відстані від цієї точки до джерела нагрівання.

Від параметрів термічного циклу зварювання залежать властивості металу зварного з'єднання.

У будь-якій точці нагрівання ми маємо гілку нагрівання і гілку охолодження. Гілка нагрівання піднімається круто, а гілка охолодження падає повільно. У термічному циклі зварювання найважливішими є максимальна температура $T_{\max}$ і $t_{\max}$ – час досягнення максимальної температури (рис. 3.28).

Максимальна температура термічного циклу зварювання при зварюванні сталей, що гартуються, визначає змогу загартування металу зварних з'єднань. У той же час метал, нагрітий до температури понад 1 173 К, схильний до збільшення зерна аустеніту. Час перебування при заданій температурі збільшує ефект впливу максимальних температур. Так, якщо збільшити час перебування металу при температурі понад 1 175 К, то аустенітне зерно збільшиться, що призведе до підвищення крихкості охолодженого металу зварного з'єднання.

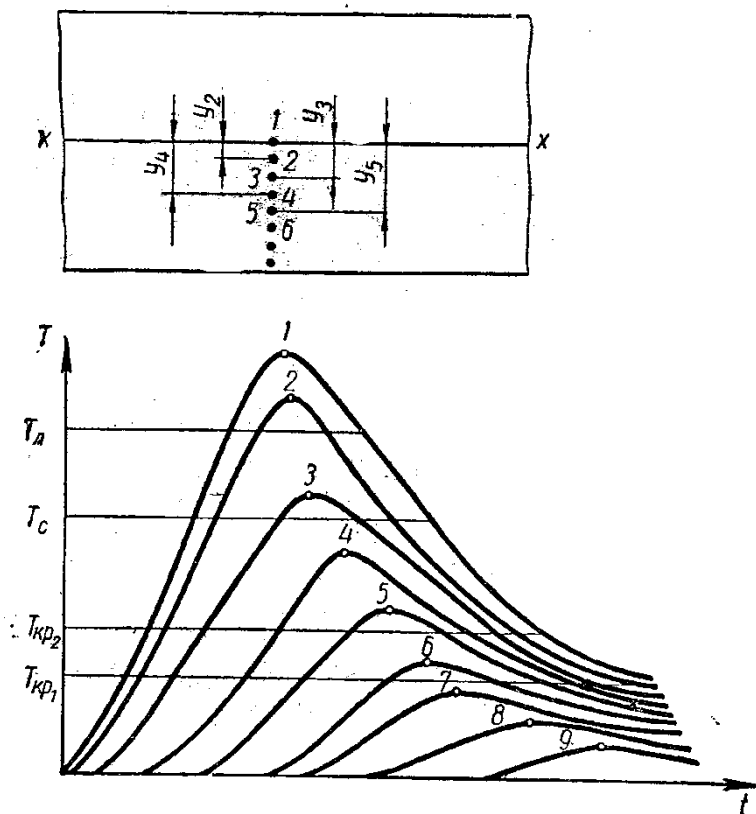


Рисунок 3.28 – Залежність зміни температури в точках 1–5 зварного з'єднання від часу

3.13.1 Розрахунок максимальної температури $T_{\max}$ при автоматичному наплавленні валика на масивне тіло

Максимальна температура знаходиться за правилом знаходження екстремума. Екстремум знаходиться в точці, у якій перша похідна за змінним параметром дорівнює нулю. Якщо друга похідна позитивна, то екстремум являє собою максимум.

Вихідне рівняння для заданого способу нагрівання, що дозволяє розрахувати граничну температуру в будь-якій точці виробу, має вигляд:

$$\frac{dT}{dt} = 0,$$
$$T_{(r,t)} = \frac{q_i}{2\pi\lambda g_{CB}t} e^{-\frac{r^2}{4at}} + T_0. \quad (3.90)$$

Зміна температури в часі в даній точці тіла, викликана дією рухомого або тимчасовою дією нерухомого джерела тепла, називається термічним циклом у даній точці. Чим далі розташовані точки від шляху переміщення джерела, тим пізніше починає помітно підвищуватися температура, тим повільніше вона зростає, тим нижче максимальна температура, тим пізніше вона настає. У процесі охолодження температури різновіддалених точок прагнуть вирівнятись.

Максимальну температуру в даній точці можна розрахувати, знаючи рівняння процесу поширення тепла. Особливо просто розрахувати максимальну температуру в температурному полі граничного стану, викликаного дією потужного швидкорухомого джерела.

Для зручності диференціювання прологарифмуємо вираз (3.90):

$$\ln(T_{(r,t)} - T_0) = \ln \frac{q_i}{2\pi\lambda g_{36}t} - \ln t - \frac{r^2}{4at^2}. \quad (3.91)$$

Продиференціюємо це рівняння за t і прирівняємо до 0:

$$\frac{d}{dt} \ln(T_{(r,t)} - T_0) - \frac{1}{(T - T_0)} - \frac{1}{t} + \frac{r^2}{4at^2} = 0. \quad (3.92)$$

Звідси

$$\frac{d(T_{(r,t)} - T_0)}{dt} = \frac{T_{(r,t)} - T_0}{T} \left(\frac{r^2}{4at} - 1 \right) = 0.$$

Швидкість зміни температури обертається в нуль у трьох випадках:

1) при $T = T_0$ – ця умова відповідає повному вирівнюванню температур;

2) при $t \rightarrow \infty$ – при автоматичному зварюванні і наплавленні це припущення недосяжне (у розрахунках зварювальна дуга розглядається як миттєве точкове джерело тепла);

3) при $\frac{r^2}{4at} - 1 = 0$ – це відповідає моменту досягнення максимальної температури, коли ізотерма досягає своєї максимальної величини.

Звідси

$$t_{\max} = \frac{r^2}{4a} . \quad (3.93)$$

Підставимо вираз (3.93) у формулу (3.90):

$$T_{\max} - T_0 = \frac{q_i 4a}{2\pi\lambda \vartheta_{3\theta} r^2} e^{-\frac{r^2 4a}{4ar^2}} . \quad (3.94)$$

З урахуванням, що $a = \frac{\lambda}{c\gamma}$ отримаємо:

$$T_{\max} = \frac{2q_i}{c\gamma\pi\vartheta_{3\theta} r^2 e} = \frac{0,368}{c\gamma\frac{\pi}{2} r^2} \frac{q_i}{\vartheta_{3\theta}} + T_0 . \quad (3.95)$$

Як бачимо з останнього рівняння, $T_{\max}$ при автоматичному наплавленні валика на масивне тіло пропорційна величині $q_i/\vartheta_{3\theta}$, тобто погонній енергії зварювання.

3.13.2 Розрахунок максимальної температури $T_{\max}$ при автоматичному зварюванні листів у стик з повним проплавленням

Розрахунки виконуємо за аналогічною схемою на основі вихідної формули

$$T_{(y,t)} = \frac{q_i}{c\gamma\sqrt{4\pi at}\delta\vartheta_{3\theta}} e^{-\frac{y^2}{4at} - b_1 t} + T_0 , \quad (3.96)$$

де $b_1 = \frac{2\alpha}{c\gamma\delta}$ – коефіцієнт поверхневої температуровіддачі.

Прологарифмуємо формулу (3.96) і візьмемо похідну за t :

$$\ln(T_{(y,t)} - T_0) = \ln \frac{q_i}{c\gamma\sqrt{4\pi a\delta\vartheta_{36}}} - \frac{1}{2} \ln t - \frac{y^2}{4at} - b_1 t,$$

$$\frac{d}{dt} \ln(T_{(y,t)} - T_0) = 0 - \frac{1}{2t} + \frac{y^2}{4at^2} - b_1 = 0.$$

Для спрощення розрахунків приймемо $b_1 \approx 0$ і помножимо всі члени рівності на $2t$ тоді:

$$\frac{d}{dt} \ln(T_{(y,t)} - T_0) = -1 + \frac{y^2}{2at} = 0. \quad (3.97)$$

Звідки визначаємо час настання максимальної температури $t_{\max}$:

$$t_{\max} = \frac{y^2}{2a}. \quad (3.98)$$

Підставимо вираз (3.98) у формулу (3.96):

$$T_{\max} - T_0 = \frac{q_i \sqrt{2a}}{\sqrt{4\pi a y^2 \delta \vartheta_{36}} c \gamma} e^{\frac{y^2 2a}{4ay^2} - b_1 \frac{y^2}{2a}},$$

$$T_{\max} - T_0 = \frac{q_i}{\sqrt{2\pi \delta \vartheta_{36}} c \gamma y} e^{\frac{1}{2} - b_1 \frac{y^2}{2a}},$$

$$T_{\max} - T_0 = \frac{2q_i}{2\sqrt{2\pi \delta \vartheta_{36}} c \gamma y \sqrt{e}} e^{1 + b_1 \frac{y^2}{a}}. \quad (3.99)$$

$$\sqrt{\frac{2}{\pi e}} = 0,484; e^{1 + \frac{b_1 y^2}{a}} = 1 - \frac{b_1 y^2}{2a} + \dots, \text{ тобто показову функцію розкладаємо}$$

в ряд і беремо перші два члени:

$$T_{max} - T_0 = \frac{q_i 0,484}{2\delta c \gamma \vartheta_{3\epsilon} y} \left(1 - \frac{b_1 y^2}{2a} \right). \quad (3.100)$$

При автоматичному зварюванні листів у стик з повним проплавленням T_{max} також пропорційна величині $q_i / \vartheta_{3\epsilon}$, тобто величині $q_{п}$. Величина T_{max} залежить від початкової температури (попереднього або супутнього підігріву виробу):

$$T_{max} = \frac{q_i 0,484}{2\delta c \gamma \vartheta_{3\epsilon} y} \left(1 - \frac{b_1 y^2}{2a} \right) + T_0. \quad (3.101)$$

3.13.3 Розрахунки середньої швидкості охолодження аустеніту

Найбільш просто ці розрахунки здійснюються при наплавленні валика на масивний виріб або при зварюванні листів у стик за один прохід. Розрахунки проведемо паралельно.

Автоматичне наплавлення валика
на масивне тіло

Автоматичне зварювання листів у
стик з повним проплавленням

Вихідні формули для названих процесів мають вигляд:

$$(T - T_0)_{(r,t)} = \frac{q_i / \vartheta_{3\epsilon}}{2\pi\lambda t} e^{-\frac{r^2}{4at}}; \quad (T - T_0)_{(r,t)} = \frac{q_i / \vartheta_{3\epsilon} \delta}{\sqrt{4\pi\lambda c \gamma t}} e^{-\frac{y^2}{4at} - b_1 t}.$$

Зробимо такі допущення:

- для випадку зварювання тонких листів у стик зневажаємо тепловіддачу з поверхні $b_1 t$;
- з найбільшою швидкістю будуть охолоджуватися точки, розташовані на осі шва. Інші точки будуть охолоджуватися з меншою швидкістю.

З урахуванням допущень одержуємо такі рівняння:

$$(T - T_0)_{(t)} = \frac{q_i / \vartheta_{3\epsilon}}{2\pi\lambda t}; \quad (T - T_0)_{(t)} = \frac{q_i / (\vartheta_{3\epsilon} \delta)}{\sqrt{4\pi\lambda c \gamma t}}.$$

Побравши похідні від температури за часом, одержимо залежність миттєвих швидкостей зміни температури від часу:

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{q_i / \vartheta_{3\epsilon}}{2\pi\lambda t^2}; \quad \frac{dT}{dt} = -\frac{q_i / (\vartheta_{3\epsilon} \delta)}{2\sqrt{4\pi\lambda c \gamma t^3}}.$$

Визначимо час із попередніх рівнянь:

$$t = \frac{q_i / g_{36}}{2\pi\lambda(T - T_0)}; \quad \sqrt{t} = \frac{q_i / (g_{36}\delta)}{(T - T_0)\sqrt{4\pi\lambda c\gamma}}.$$

Цей час підставимо в рівняння для визначення $\frac{dT}{dt}$:

$$\begin{aligned} \frac{dT}{dt} = -\frac{q_i / g_{36}}{2\pi\lambda} \left[\frac{2\pi\lambda(T - T_0)}{q_i / g_{36}} \right]^2 = & \frac{dT}{dt} = -\frac{q_i / g_{36}}{2\sqrt{4\pi\lambda c\gamma}} \left[\frac{(T - T_0)\sqrt{4\pi\lambda c\gamma}}{q_i / (g_{36}\delta)} \right]^3 = \\ & -\frac{(T - T_0)^3 2\pi\lambda c\gamma}{(q_i / (g_{36}\delta))^2} = -2\pi\lambda c\gamma \frac{(T - T_0)^3}{(q_i / (g_{36}\delta))^2}. \end{aligned}$$

Знак «-» у правих частинах показує, що відбувається охолодження.

Швидкості охолодження осі шва дорівнюємо до миттєвих швидкостей охолодження виробу в заданій точці:

$$W = \frac{-2\pi\lambda(T - T_0)^2}{q_i / g_{36}}; \quad W = -2\pi\lambda c\gamma \frac{(T - T_0)^3}{(q_i / (g_{36}\delta))^2}.$$

При розрахунках замість поточного значення температури T підставляємо температуру найменшої стійкості аустеніту і одержуємо:

$$W = -\frac{2\pi\lambda(T_{min} - T_0)^2}{q_i / g_{36}}; \quad (3.102) \quad W = -2\pi\lambda c\gamma \frac{(T_{min} - T_0)^3}{(q_i / (g_{36}\delta))^2}. \quad (3.103)$$

При виведені цих рівнянь передбачається, що температура підігріву виробу T_0 у процесі зварювання не змінюється. Це положення справедливо для зварювання товстих листів, які охолоджуються порівняно повільно. Тонкі листи (2...4 мм) швидко охолоджуються через поверхню. Їх іноді зварюють із супутнім підігрівом, щоб температура металу в процесі зварювання суттєво не змінювалася. Виведені формули використовуються для випадку зварювання або наплавлення листів:

$$\delta \geq 25 \text{ мм};$$

$$\delta = 5-10 \text{ мм}.$$

$$W = -\frac{2\pi\lambda(T_{min} - T_0)^2}{q_i / g_{36}};$$

$$W = -2\pi\lambda c\gamma \frac{(T_{min} - T_0)^3}{(q_i / (g_{36}\delta))^2}.$$

У загальному випадку при зварюванні або наплавленні листів від 10 до 25 мм можна застосувати графічний метод визначення швидкості охолодження. Для цього в будь-якій точці залежності температури від часу проводимо дотичну. Тангенс її кута нахилу являє собою першу похідну швидкості за часом або швидкість охолодження нагрітого металу (рис. 3.29):

$$\operatorname{tg} \alpha = W.$$

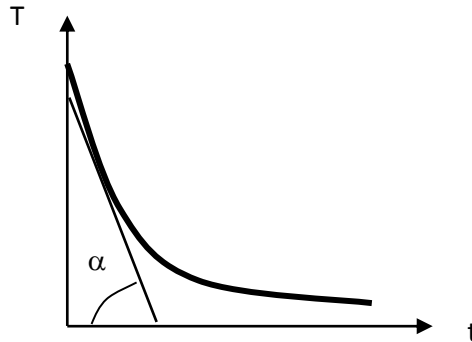


Рисунок 3.29 – Схема визначення миттєвої швидкості охолодження точки зварного з'єднання по кривій $T = f(t)$

Для полегшення розрахунків у загальному випадку М. М. Рикаліним розроблена спеціальна номограма. У цьому випадку розрахунки середньої швидкості охолодження точок плоского шару ($\delta = 10\text{--}25$ мм) проводяться за формулою

$$W = -\omega \frac{2\pi\lambda(T_{\min} - T_0)^2}{q_i / \vartheta_{36}}, \quad (3.104)$$

де ω – це усереднений коефіцієнт або безрозмірний критерій швидкості охолодження.

Обчислити його дуже складно, тому користуються графічною залежністю його від іншого безрозмірного критерію $\frac{1}{\Theta}$, який обчислюється за формулою

$$\frac{1}{\Theta} = \frac{q_i / \vartheta_{36}}{\frac{\pi}{2} c \gamma \delta^2 (T_{\min} - T_0)}. \quad (3.105)$$

Номограма залежності наведена на рисунку 3.30 [8].

При значеннях критерію $\frac{1}{\Theta} > 2,5$ швидкості охолодження точок плоского шару, розташованих за віссю руху джерела живлення, майже співпадають зі

швидкістю охолодження точок пластини, а при значеннях критерію $\frac{1}{\theta} < 0,4$ співпадають зі швидкістю охолодження точок напівнескінченного тіла.

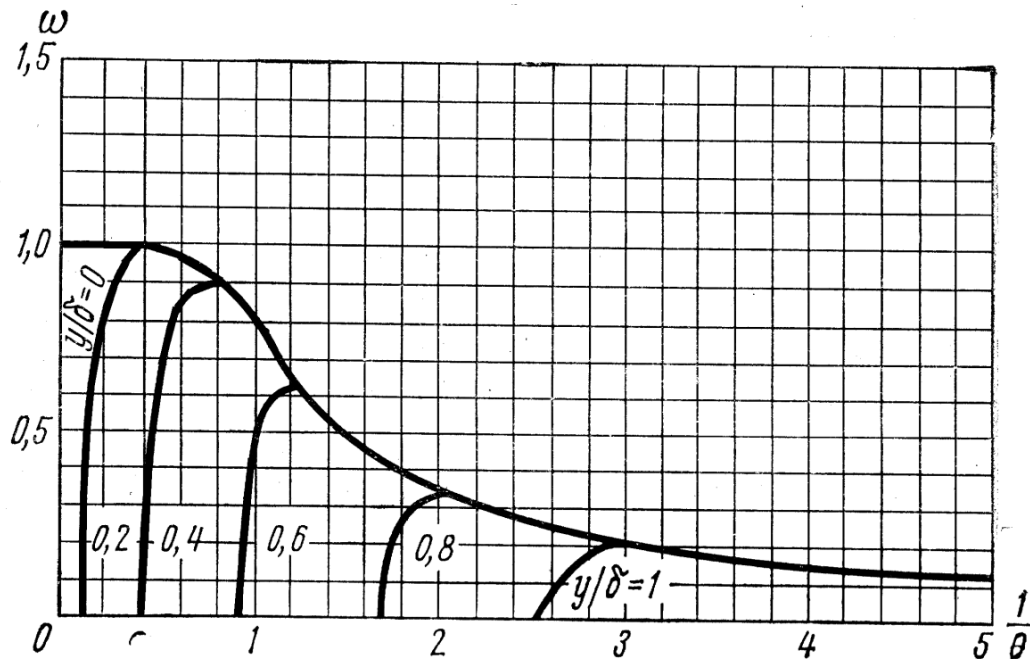


Рисунок 3.30 – Залежність критерію ω від безрозмірного критерію $1/\theta$

Приклад [2]. на лист зі сталі $\delta = 24$ мм наплавляють валик при погонній енергії $\frac{q}{\vartheta} = 32000$ Дж/см. Теплофізичні коефіцієнти: $c\gamma = 5,2$ Дж/(см³·град); $\lambda = 0,38$ Дж/(см·с·град);.

Визначити вплив навколишньої температури, що змінюється в межах від +200 °С до – 300 °С, на миттєву швидкість охолодження металу при $T = 700$ °С.

Розв'язання. Товщина листа $\delta = 24$ мм не відповідає значенням, для яких швидкість охолодження визначають за рівняннями $W = -2\pi\lambda \frac{(T - T_0)^2}{q/\vartheta}$

і $W = -2\pi\lambda c\gamma \frac{(T - T_0)^3}{\left(\frac{q}{9\delta}\right)^2}$. Тому будемо визначати швидкість охолодження,

використовуючи графік на рисунку 3.30.

Обчислюємо безрозмірний критерій $1/\theta$ при $T_0 = + 20$ °С (3.105)

$$\frac{1}{\theta} = \frac{2 \cdot 32000}{3.14 \cdot 2.42 \cdot 5.2(700 - 20)} = 1.0.$$

За графіком знаходимо відповідне значення критерію: $\omega = 0,79$.

Швидкість охолодження визначаємо за формулою

$$W = -\omega 2\pi\lambda \frac{(T - T_0)^2}{q/\vartheta},$$
$$W = -0.79 \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 0.38 (700 - 20)^2}{3200} = -27.3 \frac{\text{град}}{\text{с}}.$$

Обчислюємо безрозмірний критерій $1/\theta$ при $T_0 = -30^\circ\text{C}$:

$$\frac{1}{\theta} = \frac{2 \cdot 32000}{3.14 \cdot 2.42 \cdot 5.2 (700 + 30)} = 0.93.$$

Знаходимо за графіком $\omega = 0.87$.

Визначаємо швидкість охолодження при початковій температурі металу $T = -30^\circ\text{C}$:

$$W = -0.87 \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 0.38 (700 + 30)^2}{3200} = -34.5 \frac{\text{град}}{\text{с}}.$$

Швидкість охолодження змінюється приблизно на 7 град/с при зміні початкової температури тіла на 50°C .