

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний університет кораблебудування  
імені адмірала Макарова

**Ю. М. Лебедєв, В. Ф. Лебедєва, С. А. Лой**

**РОЗРАХУНКИ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ  
ПРИ ЗВАРЮВАННІ**

**Методичні вказівки до виконання курсової роботи**

*Рекомендовано Методичною радою НУК*

Миколаїв 2008

УДК 621.79.01

**Лебедєв Ю.М., Лебедєва В.Ф., Лой С.А.** Розрахунки теплових процесів при зварюванні: Методичні вказівки до виконання курсової роботи. – Миколаїв: НУК, 2008. – 64 с.

*Кафедра зварювального виробництва*

Вказівки містять методику виконання розрахунків теплових процесів при наплавленні на масивне тіло і при однопрохідному зварюванні пластин, а також рекомендації з використання в розрахунках ПК.

Призначені для студентів, що навчаються за напрямом "Зварювання" денної та заочної форм навчання при вивченні курсу "Термодинаміка і теплові процеси при зварюванні". Може бути використано при дипломному проектуванні.

*Рецензент* канд. техн. наук Драган С.В.

*Згідно з наказом № 110 від 25.04.07 "методичні вказівки публікуються в авторській редакції, і відповідальність за їх редагування несе автор".*

© Видавництво НУК, 2008

Навчальне видання

ЛЕБЕДЄВ Юрій Михайлович    ЛЕБЕДЄВА Валентина Федорівна  
ЛОЙ Сергій Анатолійович

**РОЗРАХУНКИ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ЗВАРЮВАННІ**  
**Методичні вказівки до виконання курсової роботи**

(українською мовою)

Комп'ютерна верстка *О.М. Черевата*  
Коректор *М.О. Паненко*

Свідectво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру  
видавців, виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції  
ДК № 2506 від 25.05.2006 р.

Підписано до друку 07.12.07. Папір офсетний. Формат 60×84/16.  
Друк офсетний. Гарнітура "Таймс". Ум. друк. арк. 3,7. Обл.-вид. арк. 4,0.  
Тираж 200 прим. Вид. № 40. Зам. № 375. Ціна договірна.

---

Видавець і виготівник Національний університет кораблебудування,  
54002, м. Миколаїв, вул. Скороходова, 5

## ВСТУП

При зварюванні плавленням застосовуються ефективні концентровані джерела енергії. Локалізація тепла в місці з'єднання металів і подальше його поширення у виробі викликають різноманітні структурні і деформаційні процеси. Усе це в кінцевому підсумку впливає на працездатність і якість зварних з'єднань. Зміна властивостей з'єднань досягається регулюванням параметрів режиму зварювання і початкової температури зварювального виробу. Вплив їх на зварювальні фізичні процеси дозволяє оцінити теорія теплових процесів при зварюванні, розроблена М.М.Рикаліним.

Для розрахунку процесів нагрівання і охолодження металу при зварюванні необхідно правильно вибрати розрахункову схему, яка віддзеркалює головні особливості процесу.

Крім характеристик джерела тепла сюди входять розміри і форма тіла, що зварюється. За розмірами тіла можуть бути обмеженими і необмеженими. Необмежене теплопровідне тіло характеризується тим, що у всьому його об'ємі процес поширення тепла підкоряється рівнянню теплопровідності. Таких тіл насправді не існує, однак в багатьох випадках, коли розглядається локальний процес віддалений від границь, тіло можна вважати необмеженим. Це дозволяє набагато спростити розрахункові формули і отримати точність, задовільну для інженерних розрахунків. Все різноманіття зварних тіл в залежності від їх форми і потужності зварювального джерела зводиться до чотирьох типів: напівнескінченне тіло, плоский шар, пластина і стрижень.

Напівнескінченному тілу відповідає масивний виріб, розміри якого великі в трьох просторових напрямках осей  $ox$ ,  $oy$ ,  $oz$ , з плоскою поверхнею  $z = 0$ . За пластину приймається лист малої товщини. У цьому випадку температура за товщиною розподіляється рівномірно. Плоскому шару відповідає лист середньої товщини, коли товщина листа не

настільки мала, щоб вважати розподіл температури рівномірним за товщиною, і не настільки велика, щоб можна було знехтувати впливом обмеженості на поширення тепла від зосереджених джерел при наплавленні шва на напівнескінченне тіло і при однопрохідному зварюванні пластин. Стрижень являє собою тіло з прямолінійною віссю або віссю малої кривизни з однаковим поперечним перерізом в якому передбачається однакове значення температур. Тобто тепловий потік являється лінійним в осьовому напрямку.

У разі рівномірно рухомого джерела з швидкістю  $v$  найбільш прості розв'язки диференціального рівняння теплопровідності виходять в пересувній системі координат, коли вона суміщена з джерелом і переміщається разом з ним.

Кожен інженер-технолог зварювального виробництва повинен добре володіти основами цієї теорії і уміти виконувати розрахунки теплових процесів зварювання для рішення різних технологічних задач. Навчити студентів цьому – мета даних вказівок.

Курсова робота з теплових процесів зварювання передбачає виконання розрахунків температурних полів і термічних циклів зварювання для одного з двох варіантів. Перший – наплавлення валика на масивний виріб (напівнескінченне тіло), другий – однопрохідне зварювання листів (пластин). Розрахунок зварювальних теплових процесів істотно полегшується при використанні ПК.

У зв'язку з цим у даних вказівках приводяться типові програми розрахунків теплових процесів на ПК і рекомендації по їх використанню.

Курсова робота оформлюється у вигляді пояснювальної записки, у якій наводяться завдання, розрахункові формули, обґрунтування вибору коефіцієнтів, результати розрахунку у вигляді таблиць та графіків. Вся робота передбачає виконання чотирьох етапів:

- 1) розрахунок температурного поля і побудова ізотерм при нагріванні тіла рухомим зосередженим джерелом нагріву;

- 2) визначення процесу теплонасичування в початковому періоді нагрівання тіла при однопрохідному зварюванні чи наплавленні;

- 3) розрахунок термічного циклу в періоді теплонасичування і вирівнювання в точці основного металу, розташованій поблизу від границі сплавлення сталі при однопрохідному зварюванні чи наплавленні;

- 4) розрахунок розподілу максимальних температур та термічного циклу в точці, аналогічній для етапу 3 по більш спрощеним розрахунковим формулам для потужного швидкорухомого джерела нагріву, коли нехтується розповсюдженням тепла у напрямку зварювання чи наплавлення.

При цьому порівнюється точність розрахунків максимальних температур та термічного циклу для рухомого джерела нагріву та швидко рухомого. В четвертому етапі передбачається також провести аналіз структурних перетворень в виданій згідно завданню сталі – оцінити протяжність різних ділянок зони термічного впливу (ЗТВ), та з допомогою накладання кривої охолодження на діаграму термодинамічного перетворення аустеніту визначити структуру і твердість в зоні перегріву ЗТВ. При необхідності запобіганню утворення холодних тріщин при зварюванні чи наплавленні заданої сталі аналітичним методом розраховується мінімальне значення температури попереднього підігріву.

Кожен етап і робота в цілому закінчується висновками. Повинен бути приведений також список використаної літератури.

Графічна частина виконується на міліметрівці або на листах формату А4 з використанням графічних комп'ютерних програм.

## ЗАВДАННЯ КУРСОВОЇ РОБОТИ

Варіант 1. На поверхню масивного виробу зі сталі ... наплавляють валик довжиною 200 мм ... зварюванням на режимі:  $I_{зв} = ...$ ;  $U_d = ...$ ;  $V_{зв} = ...$

Варіант 2. Виконується ... зварювання аркушів стикового з'єднання зі сталі ... товщиною  $\delta = ...$  на режимі:  $I_{зв} = ...$ ,  $U_d = ...$ ,  $V_{зв} = ...$ , довжина шва складає 200 мм.

Потрібно:

- розрахувати температурне поле граничного стану на поверхні тіла і побудувати ізотерми температур: ліквідусу, 1350 °С, критичної точки А3, 500 і 200 °С. Визначити температуру в період теплонасичення для точок осі Y (перпендикулярної осі переміщення джерела), коли довжина валика досягає 10 та 50 мм. Розрахувати термічний цикл у періоди теплонасичення і вирівнювання для точки, що нагрівається при зварюванні до 1350 °С, розташованої на відстані 50 мм від початку зварювання (наплавлення)

- знайти розподіл максимальних температур по осі Y і розрахувати термічний цикл для точки зони термічного впливу (ЗТВ), що нагрівається до 1350 °С, вважаючи, що джерело швидко рухається. Обчислити швидкість охолодження металу при, температурі 550 °С. За допомогою діаграми Fe-Fe3C визначити довжину різних ділянок ЗТВ і по діаграмі термодинамічного перетворення для сталі даної марки – структуру високотемпературної ділянки ЗТВ.

Оцінити зварюваність сталі в даному режимі і дати рекомендації з її поліпшення.

Варіант I. Наплавлення на масивний виріб

| Номер завдання | Спосіб зварювання (наплавлення)                                         | Режим зварювання (наплавлення) |                    |                         |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|--------------------|-------------------------|
|                |                                                                         | I <sub>зв</sub> , А            | U <sub>д</sub> , В | V <sub>зв</sub> , м/год |
| 1              | Ручне електродугове                                                     | 300                            | 25                 | 8                       |
| 2              |                                                                         | 250                            | 25                 | 8                       |
| 3              |                                                                         | 200                            | 25                 | 8                       |
| 4              |                                                                         | 150                            | 24                 | 8                       |
| 5              |                                                                         | 100                            | 22                 | 8                       |
| 6              |                                                                         | 90                             | 20                 | 8                       |
| 7              | Механізоване в середовищі CO <sub>2</sub><br><br>Автоматичне під флюсом | 160                            | 22                 | 22                      |
| 8              |                                                                         | 150                            | 22                 | 24                      |
| 9              |                                                                         | 140                            | 21                 | 25                      |
| 10             |                                                                         | 120                            | 21                 | 25                      |
| 11             |                                                                         | 90                             | 20                 | 24                      |
| 12             |                                                                         | 70                             | 19                 | 25                      |
| 13             |                                                                         | 60                             | 18                 | 25                      |
| 14             |                                                                         | 50                             | 17                 | 25                      |
| 15             |                                                                         | 880                            | 35                 | 36                      |
| 16             |                                                                         | 760                            | 35                 | 36                      |
| 17             |                                                                         | 680                            | 34                 | 36                      |
| 18             |                                                                         | 600                            | 34                 | 37                      |
| 19             |                                                                         | 550                            | 32                 | 37                      |
| 20             |                                                                         | 550                            | 34                 | 40                      |
| 21             |                                                                         | 550                            | 32                 | 40                      |
| 22             |                                                                         | 430                            | 33                 | 35                      |
| 23             |                                                                         | 460                            | 31                 | 45                      |
| 24             |                                                                         | 360                            | 30                 | 37                      |
| 25             |                                                                         | 300                            | 30                 | 45                      |
| 26             |                                                                         | 280                            | 28                 | 35                      |
| 27             |                                                                         | 260                            | 26                 | 35                      |
| 28             |                                                                         | 220                            | 25                 | 35                      |
| 29             |                                                                         | 350                            | 32                 | 65                      |
| 30             |                                                                         | 220                            | 32                 | 70                      |
| 31             |                                                                         | 140                            | 32                 | 60                      |
| 32             |                                                                         | 120                            | 30                 | 60                      |
| 33             |                                                                         | 900                            | 42                 | 30                      |
| 34             |                                                                         | 400                            | 35                 | 25                      |

*Продовження*

| Номер завдання | Спосіб зварювання (наплавлення) | Режим зварювання (наплавлення) |                    |                         |
|----------------|---------------------------------|--------------------------------|--------------------|-------------------------|
|                |                                 | I <sub>зв</sub> , А            | U <sub>д</sub> , В | V <sub>зв</sub> , м/год |
| 35             | Автоматичне під флюсом          | 500                            | 36                 | 25                      |
| 36             |                                 | 600                            | 37                 | 30                      |
| 37             |                                 | 700                            | 38                 | 30                      |
| 38             |                                 | 800                            | 38                 | 30                      |
| 39             |                                 | 1000                           | 42                 | 30                      |
| 40             | Механізоване під флюсом         | 500                            | 42                 | 20                      |
| 41             |                                 | 450                            | 42                 | 15                      |
| 42             |                                 | 400                            | 42                 | 15                      |
| 43             |                                 | 350                            | 40                 | 15                      |
| 44             |                                 | 300                            | 38                 | 15                      |
| 45             |                                 | 500                            | 42                 | 15                      |
| 46             |                                 | 250                            | 38                 | 20                      |
| 47             |                                 | 600                            | 42                 | 15                      |

Варіант 2. Однопрохідне зварювання листів

| Номер завдання | Спосіб зварювання      | Товщина листа $\delta$ , мм | Режим зварювання    |                    |                         |
|----------------|------------------------|-----------------------------|---------------------|--------------------|-------------------------|
|                |                        |                             | I <sub>зв</sub> , А | U <sub>д</sub> , В | V <sub>зв</sub> , м/год |
| 48             | Автоматичне під флюсом | 2                           | 120                 | 30                 | 60                      |
| 49             |                        | 2,5                         | 140                 | 32                 | 60                      |
| 50             |                        | 3                           | 220                 | 32                 | 70                      |
| 51             |                        | 4                           | 350                 | 32                 | 65                      |
| 52             |                        | 2                           | 220                 | 25                 | 35                      |
| 53             |                        | 2,5                         | 260                 | 25                 | 35                      |
| 54             |                        | 3                           | 280                 | 28                 | 35                      |
| 55             |                        | 3                           | 320                 | 30                 | 45                      |
| 56             |                        | 4                           | 360                 | 30                 | 37                      |
| 57             |                        | 4                           | 460                 | 30                 | 45                      |
| 58             |                        | 5                           | 430                 | 33                 | 35                      |
| 59             |                        | 5                           | 500                 | 32                 | 40                      |
| 60             |                        | 5                           | 550                 | 32                 | 40                      |
| 61             |                        | 6                           | 550                 | 32                 | 37                      |
| 62             |                        | 6                           | 600                 | 34                 | 37                      |
| 63             |                        | 6                           | 680                 | 34                 | 36                      |
| 64             |                        | 7                           | 760                 | 35                 | 36                      |
| 65             |                        | 7                           | 880                 | 35                 | 36                      |

## Продовження

| Номер завдання | Спосіб зварювання                         | Товщина листа $\delta$ , мм | Режим зварювання |             |                  |
|----------------|-------------------------------------------|-----------------------------|------------------|-------------|------------------|
|                |                                           |                             | $I_{зв}$ , А     | $U_{д}$ , В | $V_{зв}$ , м/год |
| 66             | Механізоване в середовищі CO <sub>2</sub> | 1                           | 50               | 17          | 25               |
| 67             |                                           | 1,5                         | 60               | 18          | 25               |
| 68             |                                           | 2                           | 70               | 19          | 25               |
| 69             |                                           | 2                           | 90               | 20          | 24               |
| 70             |                                           | 2,5                         | 120              | 21          | 25               |
| 71             |                                           | 3                           | 140              | 23          | 20               |
| 72             |                                           | 4                           | 150              | 24          | 20               |
| 73             |                                           | 5                           | 180              | 25          | 20               |
| 74             | Ручне електродугове                       | 1,5                         | 60               | 20          | 8                |
| 75             |                                           | 2                           | 90               | 20          | 8                |
| 76             |                                           | 2,5                         | 100              | 22          | 8                |
| 77             |                                           | 3                           | 150              | 24          | 8                |
| 78             |                                           | 4                           | 200              | 25          | 8                |
| 79             |                                           | 5                           | 250              | 25          | 8                |
| 80             |                                           | 6                           | 300              | 25          | 8                |

Необхідні для розрахунку теплофізичні коефіцієнти вибираються по табл.П1 (додаток І).

## РОЗРАХУНОК ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРИ НАПЛАВЛЕННІ НА МАСИВНЕ ТІЛО

Розподіл і зміна температури при наплавленні на напівнескінченне (масивне) тіло обчислюються за формулами, що отримані за результатами рішення диференційного рівняння теплопровідності при визначених початкових і крайових умовах:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right). \quad (1)$$

Найбільше поширення для теплових процесів зварювання одержав спосіб рішення диференційного рівняння (1) методом джерел [6].

Рішення цього рівняння при дії зварювального джерела, що безупинно рухається в напрямку осі  $x$  з постійною швидкістю  $v$ , буде більш простим у системі координат, що рухається, де початок координат

збігається з джерелом. Зміна температури в будь-якій точці тіла й у будь-який момент часу для випадку дії рухливого точкового джерела на поверхні напівнескінченного тіла (наплавлення на масивний виріб) можна визначити по рівнянню:

$$T(x, y, z, t) = \frac{2q}{c\gamma(4\pi a)^{3/2}} \exp\left(-\frac{vx}{2a}\right) \int_0^t \frac{dt_2}{t_2^{3/2}} \exp\left(-\frac{R^2}{4at^2} - \frac{v^2 t_2}{4a}\right), \quad (2)$$

де  $q$  – ефективна теплова потужність джерела; для дугового зварювання  $q = I_{зв} U_0 \eta$  ( $\eta$  – ефективний ККД нагрівання);  $c\gamma$  – об'ємна теплоємність;  $a$  – коефіцієнт температуропровідності;  $R$  – відстань від джерела до розглянутої точки,  $R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ ;  $t_2 = t - t_1$  – час поширення теплоти елементарного джерела, введеного в якій-небудь точці  $O$ , потужність якого  $q dt_1$  ( $t_1$  – час досягнення джерелом точки  $O_1$  з моменту початку руху,  $t$  – час досягнення температури  $T$  в точці з координатами  $x, y, z$  з початку руху джерела);  $v$  – швидкість переміщення джерела.

Рухливе температурне поле, зв'язане з джерелом, поступово розширюється в міру збільшення часу  $t$  і досягає визначених розмірів. Таке температурне поле, як би насичене теплотою джерела, рухається разом з ним і називається граничним чи сталим.

Процес нагрівання можна розділити на два періоди: теплонасичування, коли розміри нагрітої зони, зв'язані з джерелом збільшуються, і граничного стану, коли температурне поле залишається вже практично постійним. При нерухомому джерелі граничне температурне поле називають стаціонарним, а при рухливому – квазістаціонарним. Температурне поле граничного стану можна визначити по рівнянню (2), якщо виконати інтегрування за часом від нуля до нескінченності. У цьому випадку

$$T_{np}(R, x) = \frac{q}{2\pi\lambda R} \exp\left[-\frac{v}{2a}(x + R)\right]. \quad (3)$$

Температуру в період теплонасичування для точки з координатами  $x, y, z$  і для часу  $t$  знаходять як добуток граничної температури  $T_{np}(R, x)$  на коефіцієнт теплонасичування  $\psi_3(\rho_3; \tau_3)$ :

$$T(x, y, z, t) = T_{np}(R, x) \psi_3(\rho_3; \tau_3). \quad (4)$$

Коефіцієнт теплонасичування залежить від безрозмірних критеріїв

відстані  $\rho_3$  і часу  $\tau_3$  і визначається по номограмі (див. рис. 5):

$$\rho_3 = \frac{vR}{2a}; \quad \tau_3 = \frac{v^2 t}{4a}. \quad (5)$$

Розрахунок температурного поля виконується фіксуванням координат  $y$  і  $z$ , для яких визначаються значення граничних температур коефіцієнтів теплонасыщення при різних  $x$ . Для побудови ізотерм температурного поля необхідно мати достатнє число точок при порівняно невеликому обсязі розрахункових даних. Це вимагає вибору раціональних фіксованих значень  $y$  і  $z$  і перемінного кроку по  $x$ . Як видно з формул (3), значення  $T_{np}$  залежать не тільки від координат, але і від теплофізичних властивостей матеріалу, ефективної теплової потужності джерела  $q$  і швидкості зварювання  $v$ . Останні два параметри при наплавленні конструкцій змінюються в досить широких межах, тому при розрахунку температурних полів доцільно спочатку визначити залежність максимальних температур для даного матеріалу й умов зварювання від значень координат  $x, y, z$ .

Екстремальні точки визначаються по зміні знака частинної похідної  $T_{np}$  по  $x$  і  $y$  у межах обраного кроку  $\Delta x$  для відповідних фіксованих  $y$  і  $z$ .

Значення частинних похідних граничної температури по  $x$  обчислюються по формулах:

$$T'_{np}(x, R)_x = T_{np} \frac{1}{R} \left[ \frac{x^2}{R} + \frac{v}{2a}(R + x) \right]. \quad (6)$$

Розрахунок для визначення екстремальних точок доцільно виконувати на ЕОМ. Блок-схема розрахунку приведена на рис. 1.

Як впливає з (6) знак похідної залежить від множника

$$\Phi = x^2 / R + (v / 2a)(R + x).$$

Значення цього множника в точці  $x - 0,1$  позначимо через  $\Phi 1$ , тобто

$$\Phi 1 = \frac{(x - 0,1)^2}{R} + \frac{v}{2a}(R + x - 0,1).$$

Якщо  $\Phi \cdot \Phi 1 < 0$ , то на проміжку  $(x; x - 0,1)$  функція має екстремум.

Значення  $x$  запам'ятовується і для наступного значення  $y$  пошук екстремуму починається з цього значення  $x$ , тому що зі збільшенням  $y$  гранична температура  $T_{np \max}$  зсовується в область більших значень  $x$ .

На друк виводяться:

$T_{np}(x, y)$ ;  $T_{np}(x - 0,1; y)$ ;  $T'_{xnp}(x, y)$ ;  $T'_{xnp}(x - 0,1; y)$ , які відповідно позначаються  $T$ ,  $Tl$ ,  $PT$ ,  $PTl$ , а також  $x$  і  $y$ .

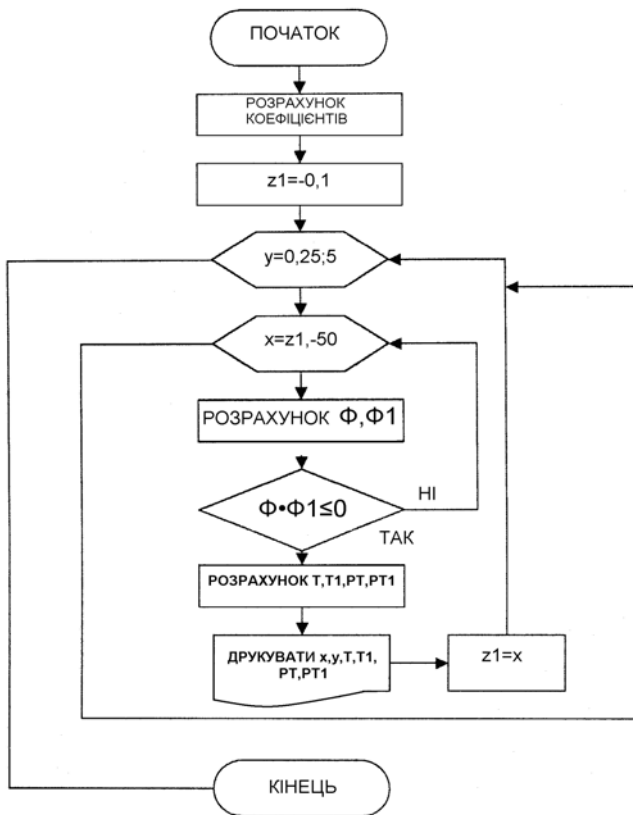


Рис. 1. Блок-схема розрахунку температурного поля (знаходження екстремумів)

При розрахунках максимальних граничних температур на поверхні виробу ( $z = 0$ ) необхідно вибрати межі зміни  $x$  і  $y$  та їх крок. Для зварювання сталей доцільно виконати розрахунок при зміні  $x$  від  $-0,1$  до  $-30$  см, а  $y$  – від  $0$  до  $5$  см і при кроці  $\Delta x = -0,1$  см,  $\Delta y = 0,25$  см.

По результатам розрахунку будуюмо графік залежності  $T_{np \max}$ , від  $y$  і  $x$  (рис. 2). За допомогою графіка 2а можна визначити необхідні фіксовані значення  $y$ .

Розрахунок зміни граничних температур доцільно виконати для таких значень  $y$ , при яких максимальна температура на  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  вище за температури побудови ізотерм ліквідусу,  $1350\text{ }^{\circ}\text{C}$ , критичної точки  $A_3$ ,  $600$  і  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Ці значення, знайдені графічним способом, вводимо в програму розрахунку граничних температур по рівнянню (3). По графіку рис. 2б ( $T_{np\ max} = f(x)$ ) можна також визначити необхідний крок по  $x$ .

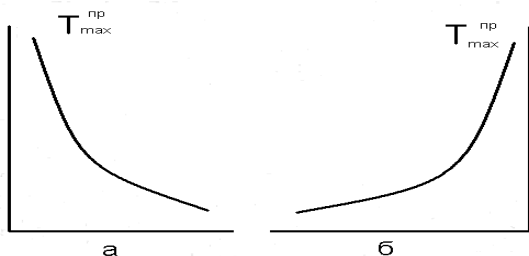


Рис. 2. Залежність максимальних граничних температур від координат:  
а) –  $y$ ; б) –  $x$

У разі наплавлення на масивний виріб досить просто обчислити кінцеве значення координати  $x$ , розташованої позаду джерела на поверхні тіла для  $z = 0$ ;  $y = 0$ :

$$T_{np} = \frac{q}{2\pi\lambda x}.$$

Задавши мінімальним значенням визначуваної граничної температури, отримаємо кінцеве значення координати  $x$ . Наприклад, при наплавленні на низьколеговану сталь і для мінімальної граничної температури  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$   $x = 2 \cdot 10^{-8}\text{ м}$ .

Із характеру зміни граничних температур випливає, що для скорочення розрахунків необхідно вибирати крок по координаті  $x$  змінним. Оскільки температура попереду джерела дуже різко змінюється з відстанню, то позитивні значення вибирають із малим кроком, наприклад  $H = 0,05\text{ см}$ . Розрахунок закінчуємо при кінцевому позитивному значенні  $x = 0,5\text{ см}$ . В області  $x < 0$ , що знаходиться позаду джерела, розрахунок граничних температур виконуємо із змінним кроком. Практика розрахунків показує, що для значень  $y$  відповідних високим максимальним температурам, можна рекомендувати  $H$ , приведеними в табл. 1.

Таблиця 1

| $x, \text{ см}$ | $H, \text{ см}$ | $x, \text{ см}$ | $H, \text{ см}$ |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 0 ... -1        | -0,2            | -3 ... -10      | -1              |
| -1 ... -3       | -0,5            | -10 ... -30     | -5              |
|                 |                 | -30             | -10             |

При розрахунку значення  $y$  об'єднуються в масив. В даному випадку цей масив містить шість елементів, де  $y_1 = 0$ , а  $y_2, y_3, y_4, y_5, y_6$  вибираються по графіку рис. 2,а ( $y_2 \rightarrow T_{\text{л}} + 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $y_3 \rightarrow 1450\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $y_4 \rightarrow A_3 + 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $y_5 \rightarrow 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $y_6 \rightarrow 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Номер елементу масиву позначимо через  $i$ . Для кожного  $y$  значення  $x$  змінюється від 0,5 до  $-70$ . Початковий, крок зміни рівний  $-0,05$ . Оскільки на початку координат  $T_{\text{пр}} = \infty$ , то з розгляду треба виключити значення  $x$  і  $y$ , одночасно рівні нулю (рис. 3).

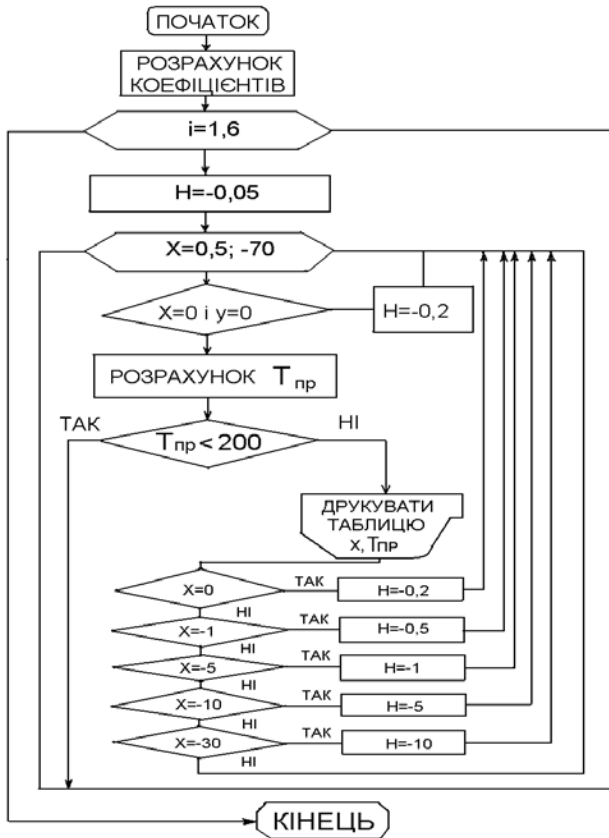


Рис. 3. Блок-схема розрахунку температурного поля при наплавленні на масивне тіло

Таким чином, виконаний аналіз рівняння (3) дає можливість визначити необхідні значення фіксованих координат і необхідний раціональний крок по координаті  $x$  для розрахунку граничних температур попереду

і позаду зварювального джерела. З урахуванням цього аналізу складена програма для розрахунку на ЕОМ температурного поля.

По даним розрахунку на міліметрівці будуємо графіки зміни граничних температур по координаті  $x$ ; для вибраних фіксованих значень  $y_i$ . Побудову ізотерм проводимо у площині  $(x, y)$  шляхом проектування відповідних точок перетину графіків залежностей  $T(x, y)$  з рівнями відповідних температур. Схема побудови приведена на рис. 4.

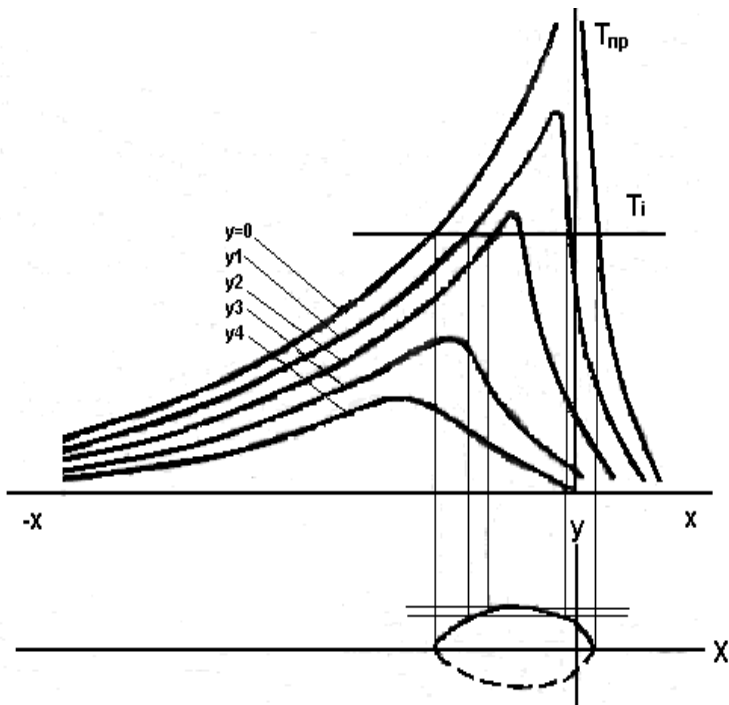


Рис. 4. Побудова ізотерм температурного поля

## ВИЗНАЧЕННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОВОГО НАСИЧУВАННЯ ПРИ НАПЛАВЛЕННІ НА МАСИВНЕ ТІЛО

Час настання періоду, близького до теплонасичування, оцінюється розрахунком дійсних температур для точок, які лежать на осі  $y$  коли зварювальне джерело пройде шлях 1 і 5 см.

$$T(0, y, t) = T_{пр}(0, y) \cdot \psi_3(\rho_3, r_3).$$

Для розрахунку температур по осі  $y$  необхідно знайти розподілення температур  $T_{пр}(0, y)$  та  $T(0, y, t)$  в інтервалі від  $\sim 2000^\circ\text{C}$  до  $\sim 100^\circ\text{C}$ . Для цього використовуємо одержані результати по побудові ізотерм з яких можна визначити значення  $y$  для температур  $1500$  та  $200^\circ\text{C}$ . З допомогою їх розрахувати  $y$  для температур  $T_{пр} 2000 \pm 50^\circ\text{C}$  та  $100 \pm 20^\circ\text{C}$ . В межах зміни цих значень  $y$  одержати цифрову залежність функції  $T_{пр} = f(y)$  для 10–12 точок. Розрахунок граничних температур виконуємо аналогічно рівнянню (3) при  $x = 0$ , а значенням  $y$  задаємо відповідний крок, який можна оцінити, по ізотермам (див. рис. 2). Дійсні температури розраховуємо по формулі (4). Для цього необхідно визначати відповідні коефіцієнти теплонасичування  $\psi_3(\rho_3, r_3)$ .

Безрозмірний критерій часу  $\tau_3 = v^2 t / 4a$  для кожного конкретного випадку буде постійним. Час  $t$  розраховується за законом джерела, що рухається рівномірно і прямолінійно:  $t = \Delta l / v$ , де  $\Delta l$  – шлях, пройдений джерелом (1; 5 см). Безрозмірний критерій відстані  $\rho_3 = vR / 2a$  змінюється пропорційно  $R$ . Для даного випадку при  $x = 0, z = 0$  значення  $R$  співпадає з значенням  $y$ . Тому розрахункові формули значно спрощуються:

$$T_{пр}(0, y) = \frac{q}{2\pi R} \exp\left(-\frac{vy}{2a}\right); \quad \rho_3 = vy / 2a.$$

Коефіцієнт теплонасичування  $\psi_3$  визначаємо по номограмі рис. 5 або розрахунковим шляхом.

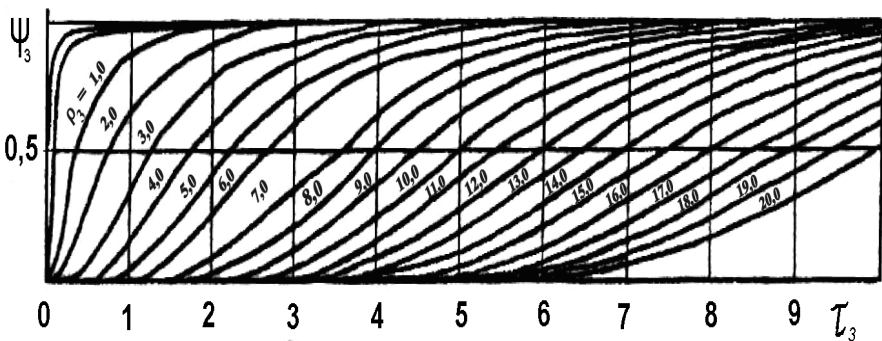


Рис. 5. Номограма для визначення коефіцієнта теплонасичування при наплавленні на масивне тіло

У разі наплавлення на масивний виріб коефіцієнт теплонасичування може бути знайдений по рівнянню:

$$\psi_3 = (R, t) = \frac{1}{2} \left[ 1 - \Phi \left( \frac{R}{\sqrt{4at}} - v \sqrt{\frac{t}{4a}} \right) \right] + \frac{1}{2} \exp \left( \frac{vR}{a} \right) \left[ 1 - \Phi \left( \frac{R}{\sqrt{4at}} + v \sqrt{\frac{t}{4a}} \right) \right],$$

$$\text{де } \Phi(\omega) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\omega} e^{-u^2} du.$$

Одержані розрахункові дані заносимо у таблиці: ( $N_{\text{оп/п}}, y, T_{\text{пр}}, \rho_3, \tau_3, \psi_3, T(0, y, t)$ ).

По розрахунковим даним побудувати графік залежності  $T(0, y, t)$  від  $y$  для  $\Delta l$  рівними 1 см та 5 см. Зробити висновки по процесам теплонасичування в залежності від відстані точок до джерела нагріву на даному режимі зварювання.

## **РОЗРАХУНОК ТЕРМІЧНОГО ЦИКЛУ В ПЕРІОДИ ТЕПЛО-НАСИЧУВАННЯ ТА ВИРІВНЮВАННЯ ПРИ НАПЛАВЛЕННІ НА МАСИВНЕ ТІЛО**

По рівнянню (4) можна розрахувати термічний цикл для будь-якої точки зварюваного тіла. В цьому випадку потрібно пам'ятати, що точка нерухома, а система координат переміщується разом з джерелом по осі  $x$ . Для розрахунку термічного циклу точки, яку нагрівають до 1350 °С й яка знаходиться на відстані 5 см від початку руху джерела, по графіку рис. 2 знайдемо значення  $y_0$ . Координата  $x$  по мірі руху джерела змінюється від 5 см в момент початку зварювання ( $t = 0$ ) до -15 см при її закінченні ( $t = t_k$ ). Цей період часу називають періодом теплонасичування. Коли зварювальне джерело припинить свою дію, температура в даній точці може бути ще досить висока.

Починаючи з часу закінчення зварювання  $t_k$  настає так званий період вирівнювання температур. Для зручності розрахунку зміни температури тіла в цьому періоді припустимо, що джерело як би продовжує рухатися далі у напрямі осі  $x$ , а щоб ліквідувати його дію, одночасно у момент закінчення зварювання  $t_k$  введемо стік теплоти такої ж потужності, як і джерело. Введення фіктивних джерел і стоку теплоти дозволяє проводити розрахунок зміни температури в будь-якій точці в період вирівнювання за тими ж законами, що і для періоду теплонасичування, але з урахуванням дії стоку. Температуру в періоді вирівнювання

можна розглядати як алгебраїчну суму температур:  $T(t)$  – від зварювального джерела, що ніби продовжує діяти і  $-T(t - t_K)$  – від стоку теплоти по потужності рівного зварювальному, що розпочав діяти у момент часу  $t_K$ ,

$$T_B(t) = T(t) - T(t - t_K) = T_{np} \left[ \psi_3^{ДЖ}(\rho_3^{ДЖ}, \tau_3^{ДЖ}) - \psi_3^{СТ}(\rho_3^{СТ}, \tau_3^{СТ}) \right], \quad (11)$$

де  $\psi_3^{ДЖ}(\rho_3^{ДЖ}, \tau_3^{ДЖ})$  – коефіцієнт теплонасичування для даної точки від як би продовжуємого діяти зварювального джерела;  $\psi_3^{СТ}(\rho_3^{СТ}, \tau_3^{СТ})$  – коефіцієнт теплонасичування для тієї ж точки від стоку теплоти, що почав діяти з часу  $t_K$ .

Безрозмірні критерії відстані і часу визначимо для даного випадку

наступними виразами:  $\rho_3^{ДЖ} = \rho_3^{СТ} = \frac{vR}{2a}$ , де  $R = \sqrt{x^2 + y^2}$ ,  $\tau_3^{ДЖ} = \frac{v^2 t}{4a}$ ,

$$\tau_3^{СТ} = \frac{v^2(t - t_K)}{4a}.$$

Час  $t$  для даної задачі можна розрахувати по формулі  $t = (5 - x)/v$ .

Блок-схеми розрахунку термічного циклу при наплавленні на масивне тіло і приведені на рис. 6.

Типові програми розрахунку температурних полів і термічних циклів наведені в додатку 2.

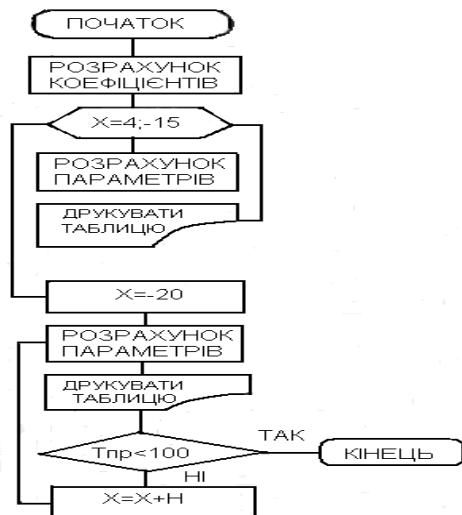


Рис. 6. Блок-схема розрахунку термічного циклу для точки в ЗТВ при наплавленні на масивне тіло

## РОЗРАХУНОК ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРИ ОДНО-ПРХІДНОМУ ЗВАРЮВАННІ ПЛАСТИН

При однопрохідному зварюванні пластин теплове джерело нагріву з ефективною тепловою потужністю  $q$  уявляють лінійним і рівномірно розподіленим на відрізок осі  $oz$ , рівному товщині пластини  $\delta$ . Пластину приймають безграничною, а її граничні поверхні  $z = 0$  і  $z = \delta$  обмінюються теплом з навколишнім середовищем з нульовою температурою при коефіцієнті тепловіддачі  $\alpha$ . При цих умовах для одержання функціональної залежності температури в різних точках пластини від часу необхідно розв'язати диференціальне рівняння

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - bT,$$

де  $b$  – коефіцієнт температуровіддачі,  $b = 2\alpha/c\gamma\delta$  ( $\alpha$  – коефіцієнт теплообміну поверхонь пластини з навколишнім середовищем).

Для плоского процесу розповсюдження теплоти від лінійного джерела, що рухається у пластині товщиною  $\delta$  (однопрохідне зварювання пластин) зміна температури розраховується по наступним рівнянням:

$$T(x, y, t) = \frac{q}{4\pi\lambda\delta} \exp\left(-\frac{vx}{2a}\right) \int \frac{dt^2}{t_2} \exp\left[-\frac{r}{4at_2} - \left(\frac{v^2}{4a} + b\right)t_2\right];$$

$$T_{np}(r, x) = \frac{q}{2\pi\lambda\delta} \exp\left(-\frac{vx}{2a}\right) K_0\left(r\sqrt{\frac{v^2}{4a^2} + \frac{b}{a}}\right). \quad (7)$$

Значення частинних похідних граничної температури по  $x$  при однопрохідному зварюванні обчислюються по формулах:

$$T'_{np}(x, r)_x = T_{np} \frac{1}{r} \left[ \frac{x^2}{r} + \frac{v}{2a}(r+x) \right]; \quad (8)$$

Для обчислення на ЕОМ її краще представити у вигляді:

$$T'_{np}(x, r)_x = K \exp(K_2 x - K_3 r) \frac{1}{\sqrt{r}} \left[ \left(1 - \frac{K_5}{r}\right) \left(K_2 - K_3 \frac{x}{r}\right) - \frac{x}{2r^2} \left(1 - \frac{3K_5}{r}\right) \right], \quad (9)$$

$$\text{де } K = K_1 K_4; \quad K_1 = \frac{q}{2\pi\lambda\delta}; \quad K_2 = -\frac{v}{2a}; \quad K_3 = \sqrt{\frac{v^2}{4a^2} + \frac{b}{a}}; \quad K_4 = \sqrt{\frac{\pi}{2K_3}};$$

$$K_5 = \frac{1}{8K_3}\lambda.$$

Похідна  $T'_{np}(x, r)_x$  отримана з використанням наближеного значення

$$\text{функції Бесселя} - K_0(u) \approx \exp(-u) \sqrt{\frac{\pi}{2u}} \left(1 - \frac{1}{8u}\right).$$

Значення екстремумів по осі  $x$  знаходимо аналогічно, як і для наплавлення на масивне тіло, тобто при  $\Phi \cdot \Phi I < 0$ , то на проміжку  $(x; x-0, 1)$  функція має екстремум. В  $\Phi \cdot \Phi I < 0$ , а похідна  $\Phi$  при фіксованому  $y$  має

$$\text{координату } x, \text{ а } \Phi I \text{ аналогічно } x-0, 1. \text{ Тут } \Phi = \left(1 - \frac{K_5}{r}\right) \left(K_2 - K_3 \frac{x}{r}\right) - \frac{x}{2r^2} \left(1 - \frac{3K_5}{r}\right).$$

При розрахунку температурного поля при однопрохідному зварюванні пластин, враховуються значення  $u = r \sqrt{\frac{v^2}{4a^2} + \frac{b}{a}}$ .

$$\text{Якщо } u < 2, \text{ то на друк виводиться } x, u, T_0 \left[ T_0 = \frac{q}{2\pi\lambda\delta^2} \exp\left(-\frac{vx}{2a}\right) \right],$$

при  $U > 2$  окрім вказаних значень виводяться  $Ko(U), T_{np}$ .

Розрахунок максимальних температур граничного стану по зміні знаку похідної проводимо по програмі додатку 2. Блок схема розрахунку максимальних температур при однопрохідному зварюванні така ж, як приведена на рис. 1.

Температурне поле розраховується для фіксованих значень  $y$ . При розрахунку значення  $y$  так як і в попередньому випадку для наплавлення на масивне тіло об'єднуються в масив. Масив містить також 6 елементів, де  $y_1 = 0$ , а  $y_2, y_3, y_4, y_5, y_6$  вибираються по графіку рис. 2, а ( $y_2 \rightarrow T_{\text{л}} + 100^\circ\text{C}$ ;  $y_3 \rightarrow 1450^\circ\text{C}$ ;  $y_4 \rightarrow A3 + 100^\circ\text{C}$ ;  $y_5 \rightarrow 700^\circ\text{C}$ ;  $y_6 \rightarrow 300^\circ\text{C}$ ).

Ці значення, знайдені графічним способом, вводимо в програму роз-

рахунку граничних температур по рівнянню (7). Блок-схема розрахунку температурного поля при однопрохідному зварюванні пластин приведена на рис. 7.

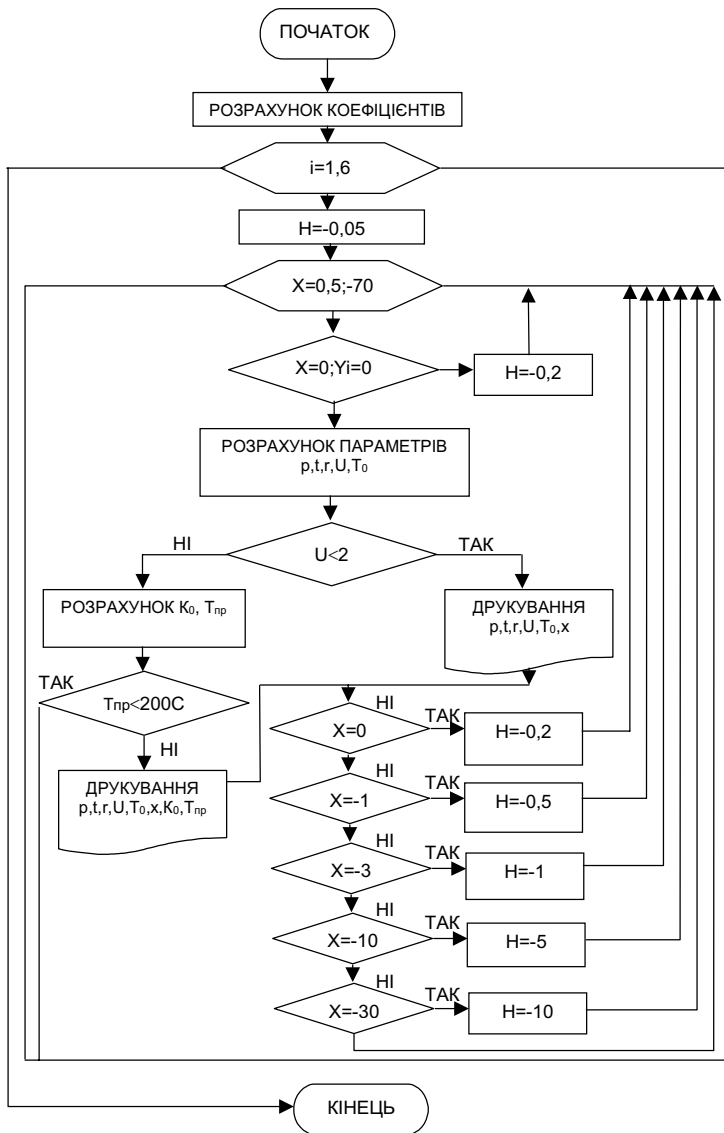


Рис. 7. Блок-схема розрахунку температурного поля при однопрохідному зварюванні пластин

По даним розрахунку на міліметрівці будуємо графіки зміни граничних температур по координаті  $x$ ; для вибраних фіксованих значень  $y_i$ . Побудову ізотерм проводимо у площині  $x, y$  шляхом проектування відповідних точок перетину графіків залежностей  $T(x, y)$  з рівнями відповідних температур. Особливості побудови розглянуті в розділі 2.

## ВИЗНАЧЕННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОВОГО НАСИЧУВАННЯ ПРИ ОДНОПРОХІДНОМУ ЗВАРЮВАННІ ПЛАСТИН

При дії лінійного рухомого джерела в пластині товщиною  $\delta$  (однопрохідне зварювання пластин), температура в точці з координатами  $x, y$  в момент часу  $t$  з початку зварювання визначається по формулі:

$$T(x, y, t) = T_{np}(r, x) \psi_2(\rho_2, \tau_2), \quad (10)$$

$$\text{де } \rho_2 = r \sqrt{\frac{v^2}{4a^2} + \frac{b}{a}}; \quad \tau_2 = t \left( \frac{v^2}{4a} + b \right).$$

Тут прийняті ті ж позначення, що і для попереднього випадку; крім того  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ .

Коефіцієнт теплонасихування  $\psi_2(\rho_2, \tau_2)$  визначається за номограмою (рис. 8) в залежності від безрозмірних критеріїв відстані  $\rho_2$  і часу  $\tau_2$

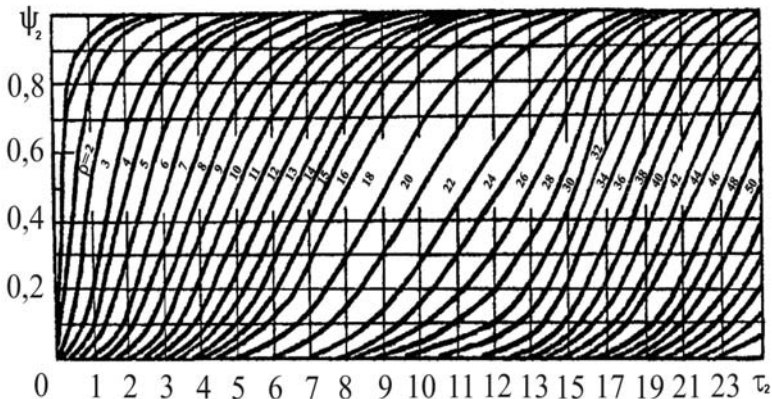


Рис. 8. Номограма для визначення коефіцієнта теплонасихування при однопрохідному зварюванні

або визначається формулою:

$\psi_2 = \frac{1}{2} [1 + \mu(\rho_2, \omega)]$ , де  $\omega = (vt/r) \sqrt{1 + (4ab/v^2)}$ , а  $\mu(\rho_2, \omega)$  – допоміжна функція,

$$\mu(\rho_2, \omega) = \frac{1}{K_0(\rho_2)} \int_0^\omega \left[ -\frac{\rho_2}{\omega} \left( \omega + \frac{1}{\omega} \right) \right] \frac{d\omega}{\omega}.$$

Для визначення  $T(0, y, t)$  по осі  $y$  необхідно розрахувати розподілення температур  $T_{пр}(r, 0)$  в інтервалі від  $\sim 2000^\circ\text{C}$  до  $\sim 100^\circ\text{C}$ .

Безрозмірний критерій часу  $\tau_2 = t \left( \frac{v^2}{4a} + b \right)$  для кожного конкретно-

го випадку буде постійним. Час  $t$  розраховується за законом джерела, що рухається рівномірно і прямолінійно:  $t = \Delta l / v$ , де  $\Delta l$  – шлях, пройдений джерелом (1; 5 см). Безрозмірний критерій відстані  $\rho_2 = r \sqrt{(v^2 / 4a^2) + (b / a)}$  змінюється пропорційно  $r$ , який для даного випадку при  $x = 0$  дорівнює значенням  $y$  ( $r = y$ ). Тому розрахункові формули значно спрощуються:

$$T_{пр}(0, y) = \frac{q}{2\pi\lambda\delta} K_0 \left( y \sqrt{\frac{v^2}{4a^2} + \frac{b}{a}} \right); \quad \rho_2 = y \sqrt{v^2 / 4a^2 + b / a}.$$

По одержаним розрахунковим даним побудувати графік залежності  $T(0, y, t)$  від  $y$  для  $\Delta l$  рівним 1 та 5 см. В залежності від одержаних результатів зробити висновки по процесам теплонасичування від відстані точок до джерела нагріву на даному режимі зварювання.

## **РОЗРАХУНОК ТЕРМІЧНОГО ЦИКЛУ В ПЕРІОДИ ТЕПЛОНАСИЧУВАННЯ ТА ВИРІВНЮВАННЯ ПРИ ОДНОПРОХІДНОМУ ЗВАРЮВАННІ ПЛАСТИН**

Термічний цикл для будь-якої точки зварювальних пластин в будь-який момент часу в процесі зварювання розраховується за залежністю:

$T(x, y, t) = T_{np}(r, x) \psi_2(\rho_2, \tau_2)$ . В розрахунках точка нерухома, а система координат переміщується разом з джерелом по осі  $x$ .

Для розрахунку термічного циклу точки, яку нагрівають до  $1350^\circ\text{C}$  і яка знаходиться на відстані 5 см від початку руху джерела, по графіку рис. 2 знайдемо значення  $y_0$ . Координата  $x$  по мірі руху джерела змінюється від 5 см в момент початку зварювання ( $t = 0$ ) до  $-15$  см при її закінченні ( $t = t_k$ ). Цей період часу називають періодом теплонасичування. Коли зварювальне джерело припинить свою дію, температура в даній точці може бути ще досить висока.

Починаючи з часу закінчення зварювання  $t_k$  настає період вирівнювання температур. В цьому періоді припустимо, що джерело як би продовжує рухатися далі у напрямі осі  $x$ , а щоб ліквідувати його дію, одночасно у момент закінчення зварювання  $t_k$  введемо стік теплоти такої ж потужності, як і джерело. Це дозволяє проводити розрахунок зміни температури в будь-якій точці в період вирівнювання за тими ж законами, що і для періоду теплонасичування, але з урахуванням дії стоку. Температуру в періоді вирівнювання можна розглядати як алгебраїчну суму температур:  $T(t)$  – від зварювального джерела, що ніби продовжує діяти, та  $-T(t - t_k)$  – від стоку теплоти по потужності рівного зварювальному, що розпочав діяти у момент часу  $t_k$ :

$$T_B(t) = T(t) - T(t - t_k) = T_{np} \left[ \psi_2^{ДЖ}(\rho_2^{ДЖ}, \tau_2^{ДЖ}) - \psi_2^{СТ}(\rho_2^{СТ}, \tau_2^{СТ}) \right], \quad (11)$$

де  $\psi_2^{ДЖ}(\rho_2^{ДЖ}, \tau_2^{ДЖ})$  – коефіцієнт теплонасичування даної точки для як би продовжуємого діяти зварювального джерела;  $\psi_2^{СТ}(\rho_2^{СТ}, \tau_2^{СТ})$  – коефіцієнт теплонасичування для тієї ж точки від стоку теплоти, що почав діяти з часу  $t_k$ .

Безрозмірні критерії відстані і часу визначимо для даного випадку

$$\text{наступними виразами: } \rho_2^{ДЖ} = \rho_2^{СТ} = r \sqrt{\frac{v^2}{4a^2} + \frac{b}{a}}; \quad \tau_2^{ДЖ} = t \left( \frac{v^2}{4a} + b \right);$$

$$\tau_2^{СТ} = (t - t_k) \left( \frac{v^2}{4a} + b \right).$$

Час  $t$  для даного задачі можна розрахувати по формулі  $t = (5 - x)/v$ .

Блок-схеми розрахунку термічного циклу при однопрохідному зварюванні пластин приведена на рис. 9.

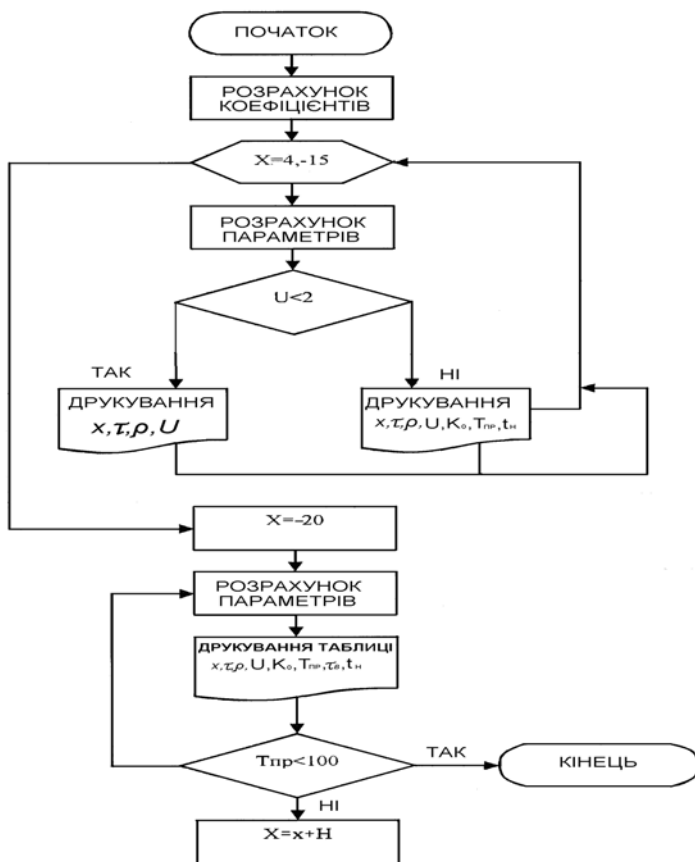


Рис. 9. Блок-схема розрахунку термічного циклу в періоді теплонасичування і вирівнювання при однопрохідному зварюванні пластин

## РОЗРАХУНОК ТЕРМІЧНИХ ЦИКЛІВ, МАКСИМАЛЬНИХ ТЕМПЕРАТУР ТА ШВИДКОСТІ ОХОЛОДЖЕННЯ ДЛЯ ПОТУЖНИХ ШВИДКОРУХОМИХ ДЖЕРЕЛ НАГРІВУ

При збільшенні швидкості переміщення зварювального джерела градієнт температури тіла у напрямі зварювання весь час зменшується. Про це можна судити по витягнутості ізотерми температурного поля

у напрямі осі  $X$ . При великих швидкостях зварювання можна нехтувати поширенням теплоти уздовж напрямку руху джерела, розрахункові формули зміни температури в точках тіла при цьому значно спрощуються. Так, при наплавленні на масивний виріб розрахунок температури в часі в якій-небудь точці тіла виконується по формулі:

$$T(r_o, t) = \frac{q}{2\pi\lambda Vt} \exp\left(-\frac{r_o^2}{4at}\right), \quad (12)$$

$t$  – час, відлічуваний з того моменту, коли джерело перетинає площину, в якій знаходиться дана точка, що має координати  $y_o, z_o$ ;  $r_o$  – відстань в даній площині від вибраної точки до осі переміщення джерела.

Аналогічно при однопрохідному зварюванні пластин:

$$T(y_o, t) = \frac{q}{V\delta\sqrt{4\pi\lambda c\gamma t}} \exp\left(-\frac{y_o^2}{4at} - bt\right). \quad (13)$$

Зміна максимальних температур в напрямі, перпендикулярному осі переміщення джерела, розраховується по рівняннях: – для наплавлення на масивний виріб:

$$T_m(r_o) = \frac{0,368q}{\frac{\pi}{2}Vc\gamma r_o^2}; \quad (14)$$

– для однопрохідного зварювання пластин:

$$T_m(y_o) = \frac{0,484q}{c\gamma\delta V 2y_o} \left(1 - \frac{by_o^2}{2a}\right). \quad (15)$$

Таким чином, процес поширення теплоти при дії потужних зварювальних джерел, які швидко рухаються, описується достатньо простими формулами, які справедливі тільки для окремих площин, перпендикулярних осі переміщення джерела. Теплові процеси по всьому тілі можна розглядати як їх сукупність, але за часом.

Розрахункові формули (12), (15) дуже часто використовуються для вирішення ряду питань технології зварювання. Теплові процеси, розраховані по цих формулах, для будь-яких швидкостей переміщення зварювальних джерел мало відрізнятимуться від дійсних для точок тіла,

що нагріваються до температури критичних точок сталі. Справедливість цього положення можна оцінити, якщо порівняти зміну максимальних температур нагріву по осі  $y$  з умови знаходження екстремумів по (9) або (12) – (див. рис. 2,а – і по формулах джерел, що швидко рухаються (14) або (15). Крім того, можна співставити термічні цикли, розраховані в періоди теплонасичування і вирівнювання по рівняннях (4), (12) або (10),(13) з термоциклами від потужних джерел, що швидко рухаються.

При розрахунку на ЕОМ розподілу температур в напрямі, перпендикулярному руху джерела, по рівнянню (14) або (15) доцільно знайти перше значення  $y_0$  або  $r_0$ , вважаючи, що  $T_{\max} = T_l$  (температура ліквідусу). Тоді:

$$r_{01} = \sqrt{\frac{0,368q}{\frac{\pi}{2}Vc\gamma T_l}}; \quad y_{01} = \frac{0,484q}{2Vc\gamma\delta T_l}.$$

Подальші поточні значення  $r_0$  або  $y_0$  можна задавати з визначеним кроком  $H$ , а розрахунок вести, поки  $T_m$  не досягне  $200^\circ\text{C}$ . Значення кроку  $H$  можна оцінити, використовуючи графік рис. 2,а. Блок-схема розрахунку максимальних температур для швидко рухливого джерела приведена на рис. 10.

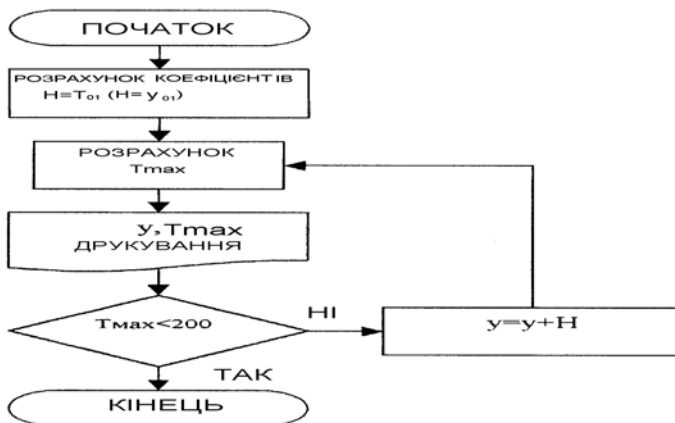


Рис. 10. Блок-схема розрахунку максимальних температур для потужного швидко рухомого зосередженого джерела нагріву

Зварювальний термічний цикл в ЗТВ характеризується великою швидкістю нагріву. Час нагріву до максимальної температури можна

розрахувати по формулах: для наплавлення на масивний виріб

$$t_{mzx} = r_o^2 / 4a ; \text{ для однопрохідного зварювання пластин } t_{mzx} = y_o^2 / 2a .$$

Визначивши відповідні значення  $t_{mzx}$  задамося кроком зміни часу при розрахунку термічного циклу. Для скорочення розрахунків доцільно ввести змінний крок за часом. По характеру зміни термічних циклів зварювання можна рекомендувати значення кроку Н, приведені в табл. 2.

Розрахунок ведуть, доки значення  $T(t)$  не буде менше 100. Блок-схема розрахунку термічного циклу показана на рис. 11.

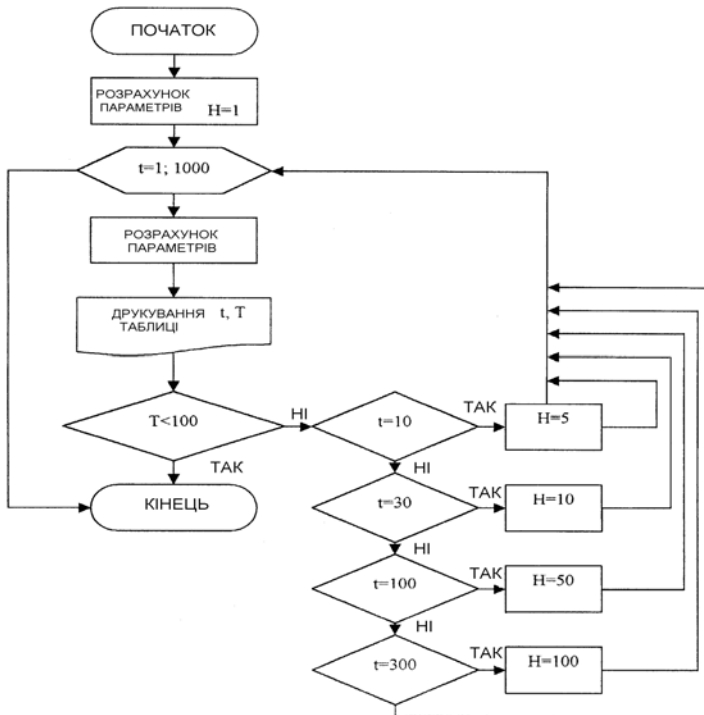


Рис. 11. Блок-схема розрахунку термічного циклу для точки ЗТВ по формулам потужного швидкорухомого зосередженого джерела нагріву

Типові програми розрахунку на ЕОМ максимальних температур і термічних циклів від дії потужних швидкорухомих джерел нагріву приведені в додатку 2.

## ОЦІНКА СТРУКТУРНИХ ЗМІН В ЗВАРНИХ З'ЄДНАННЯХ НИЗЬКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ ЗА ДАНИМИ РОЗРАХУНКІВ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ

При зварюванні основний метал в сусідніх ділянках шва піддається своєрідній термічній обробці. Ділянки, що примикають до шва, із зміною в порівнянні з основним металом структурою одержали спільну назву зони термічного впливу – ЗТВ. Структура металу в цій зоні змінюється відповідно до термічного циклу нагріву і охолодження. При даному термічному циклі характер зміни структури залежить від складу основного металу і його попередньої термічної і механічної обробки. Термічні цикли шарів зони, що знаходяться на різній відстані від межі сплавлення, неоднакові, тому зварне з'єднання є агрегат шарів із неоднаковою структурою і механічними властивостями.

Структурні зміни і протяжність різних ділянок в ЗТВ можна оцінити по діаграмі стану сплавів. Так, для вуглецевих і низьколегованих сталей скористаємося діаграмою рівноваги залізо – цементит. Для визначення протяжності різних ділянок ЗТВ поряд з кривою зміни максимальних температур в зварному з'єднанні в такому ж масштабі по температурі зобразимо діаграму стану Fe-Fe<sub>3</sub>C (рис. 12).

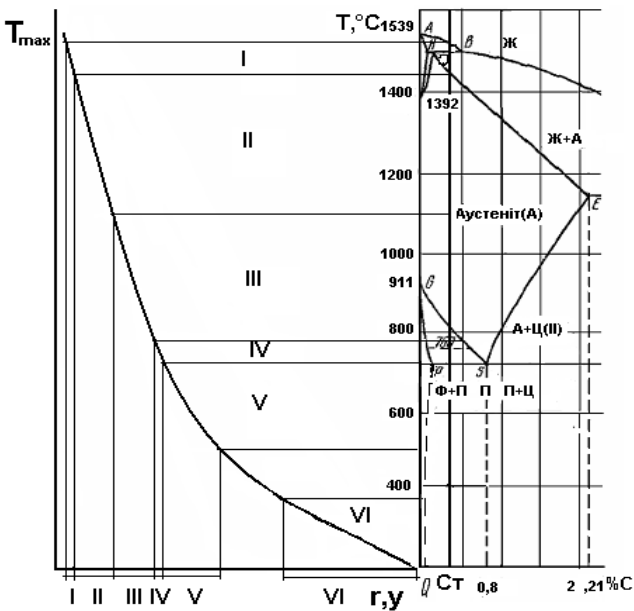


Рис. 12. Визначення протяжності ділянок ЗТВ для вуглецевих і низько вуглецевих сталей:

I – ділянка неповного розплавлення; II – ділянка перегріву; III – ділянка нормалізації (мілко зерна); IV – ділянка неповної перекристалізації; V – ділянка рекристалізації; VI – ділянка синьо-ломкості

На осі концентрацій діаграми відзначимо точкою процентний вміст

вуглецю в даній сталі і через неї проведемо вертикальну лінію. Вона перетинає на діаграмі ряд ліній, що обмежують області існування фаз. Так, перетин вертикалі із лінією евтектоїдного перетворення PSK спостерігається при температурі критичної точки  $A_1$ , перетин із лінією, GS, що обмежує аустенітну область існування сплавів, дає критичну точку  $A_3$ .

Аналогічно знаходимо температуру солідусу  $T_s$  і ліквідусу  $T_l$  – початку і кінця кристалізації. Далі на кривій зміни максимальних температур відзначимо  $T_l$ ,  $T_s$  1100 °C,  $A_3$ ,  $A_1$  500, 350 і 200 °C. Спроектувавши ці точки на вісь абсцис, знайдемо протяжність ділянок ЗТВ: ділянки неповного розплаву, яка нагрівається до максимальних температур,  $T_l...T_s$ , ділянки крупного зерна  $T_s.....$  1100 °C, ділянки дрібного зерна 1100 °C... •  $A_3$  ділянки неповної перекристалізації ділянки  $A_3....$   $A_1$ , ділянки рекристалізації  $A_1$  ...500 °C і ділянки синьоломкості 350..200 °C. Ділянка рекристалізації отримуємо лише в тому випадку, якщо до зварювання метал піддавався холодній пластичній деформації. У зварних з'єднаннях особлива увага приділяється ділянкам таким, що безпосередньо примикають до межі сплавлення. При нагріві сталі вище 1100 °C спостерігається сильний ріст аустенітного зерна. Якщо швидкість охолодження металу при зварюванні велика, то аустеніт переохолоджується і може повністю або частково перетворитися на мартенсит. Місцеве гартування металу ЗТВ підвищує його твердість і знижує пластичність. На властивості металу ЗТВ впливають неоднорідний стан аустеніту, що утворюється при швидкому зварювальному нагріванні, процеси відпуску мартенситу при уповільненні охолодження в мартенситному інтервалі перетворення і ін.

Для знання структурних перетворень в ЗТВ при зварюванні конкретної сталі необхідно мати в своєму розпорядженні дані по кінетиці перетворення аустеніту цієї сталі, одержаних в умовах дії зварювальних термодереформаційних циклів. Структурні зміни в ЗТВ можна оцінити по діаграмах термокінетичного перетворення аустеніту. Така діаграма будується в координатах температура – час. Через великі діапазони даного часу його відкладають в логарифмічному масштабі. Відлік часу при охолодженні аустеніту починається з моменту, коли температура металу досягне критичної точки  $A_3$ . Вище за цю температуру аустеніт термодинамічно стійкий, нижче – аустенітний стан нестійкий і залежно від температурно-часових умов може зазнавати перлітне, бейнітне (проміжне) або мартенситне перетворення.

Типовий вид діаграми термокінетичного перетворення аустеніту для доевтектоїдної низьколегованої сталі показаний на рис. 13. Накладаючи на такі діаграми термічні цикли охолодження металу високотемпературних ділянок ЗТВ, можна судити про структурні зміни в зоні і передба-

чити механічні властивості найбільш слабкої ділянки зварного з'єднання. Так, при охолодженні по термоциклу 1 (див. рис. 13) структура, високотемпературних ділянок складатиметься з фериту і перлиту. Метал із такою структурою характеризується невисокою твердістю і достатньою пластичністю.

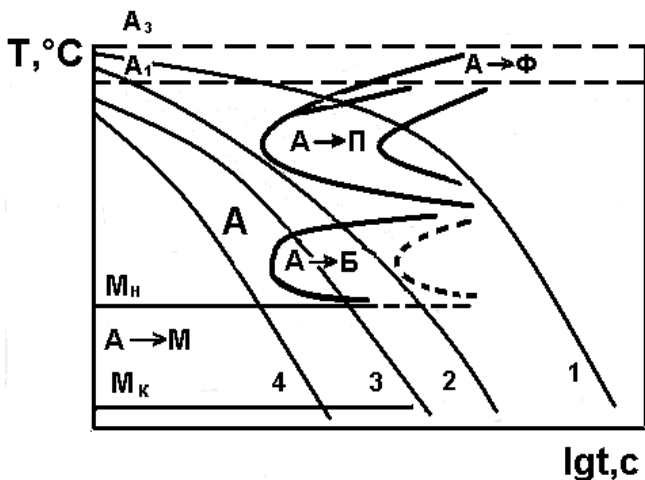


Рис. 13. Схематична діаграма термокінетичного перетворення переохолодженого аустеніту низьколегованої сталі

Після охолодження по термоциклу 2 в високотемпературних ділянках ЗТВ утворюється структура бейніту з підвищеною твердістю і задовільною пластичністю. Нарешті, при охолодженні по термоциклу 3 утворюється змішана бейнітно-мартенситна структура, а при охолодженні по термоциклу 4 – структура повністю із мартенситу. В останньому випадку внаслідок крихкості мартенситу в ЗТВ можуть виникнути тріщини, які через низьку температуру утворення отримали назву холодних.

Оцінку структурних змін у високотемпературних ділянках ЗТВ можна виконати і за швидкістю охолодження. Оскільки швидкість охолодження залежить від температури, визначають миттєву або середню швидкість охолодження при температурі 550 °C. При цій температурі переохолоджений аустеніт вуглецевих сталей швидше зазнає розпаду в перлітній області. Швидкість охолодження можна розрахувати по формулах:

– для наплавлення на масивне тіло:

$$W = 2\pi\lambda \frac{(T - T_o)^2}{\frac{q}{v}}, \quad (16)$$

– для однопровідному зварюванні пластин:

$$W = 2\pi\lambda c\gamma \frac{(T - T_o)^3}{\left(\frac{q}{v\delta}\right)^2}. \quad (17)$$

Для визначення миттєвої швидкості охолодження при 550 °С по формулах (16) і (17) приймаємо  $T = 550$  °С. Знаючи залежність зміни структури і властивостей металу ЗТВ від швидкості охолодження [8], можна підібрати оптимальний режим і умови, що забезпечують необхідну структуру і властивості металу ЗТВ.

Аналіз формул (16) і (17) показує, що швидкість охолодження металу при зварюванні можна регулювати погонною енергією зварювання  $q/V$  і зміною початкової температури виробу  $T_0$ : із збільшенням погонної енергії і температури тіла швидкість охолодження зменшується.

Вплив легуючих елементів на час охолодження від  $A_3$  до  $M_H$ , коли в високотемпературних ділянках ЗТВ низьколегованих сталей утворюється визначальне співвідношення бейнітно-мартенситної структур, встановлено шляхом математичної обробки діаграм термкінетичного перетворювання аустеніту, одержаних для умов зварювання. Експериментально встановлено, що холодні тріщини не виникають при зварюванні сталей, коли в ЗТВ утворюється менше 50 % мартенситу. Таке граничне значення кількості мартенситу при зварюванні низьколегованих сталей пов'язується з часом охолодження від  $A_3$  до  $M_H$  та може бути розраховано по рівнянню [3]:

$$\Delta t_{HL} = \Delta t_C \cdot 10^n, \quad (18)$$

де  $n = a_1(Si - 0,3) + a_2(Mn - 0,6) + a_3(Cr - 0,15) + a_4(Ni - 0,15) + a_5Mo + a_6V$ ,

$a_1, a_2 \dots, a_6$  – коефіцієнти впливу легуючих елементів на вуглецеву сталь з таким же вмістом вуглецю, як і в заданій низьколегованій сталі.

В ЗТВ вуглецевих сталей 50 % мартенситу утворюється за час охо-

лодження від  $A_3$  до  $M_H$  за  $\Delta t_C$  секунд, значення якого можна розрахувати по формулі:  $\Delta t_C = (9 \cdot C)^{1,45}$ .

Для низьколегованих сталей з вмістом : 0,04...0,59 % C; 0,3...1 85 % Si; 0,3... 3,7 % Mn; 0,15... 3 % Cr; 0,15... 3,6 % Ni; 0...0,5 % Mo и 0...0,21 % V показник ступеню  $n$  розраховується по формулі:  $n = 0,48(Si - 0,3) + 0,73(Mn - 0,6) + 0,75(Cr - 0,15) + 0,32(Ni - 15) + 0,63Mo + 1,14V$ . Середньоквадратичне відхилення розрахункових від експериментальних даних складає  $\pm 20$  %.

Використання рівняння (18) для низько вуглецевих низьколегованих зварюваних сталей (для їх складу по нижній та верхній межі, згідно держстандартам) показує, що відхилення  $\Delta t_{0,5}^M$  досягає в діапазоні зміни концентрації елементів в середньому в 13 раз. Для середньо вуглецевих сталей воно зменшується до 5 раз. Тому для оцінки зварюваності сталей необхідно знати їх конкретний хімічний склад.

Аналогічне рівняння для розрахунку часу охолодження від  $A_3$  до  $M_H$  одержано для умов практично повного гартування ЗТВ, коли в ній утворюється 5 % бейніту і 95 % мартенситу:

$$\Delta t_3 = (5,5 \cdot C)^{1,45} \cdot 10^r, \quad (19)$$

де  $r = 0,32(Si - 0,3) + 0,62(Mn - 0,6) + 0,66(Cr - 0,15) + 0,25(Ni - 0,15) + 0,1Mo + 1,08V$ .

Середньоквадратичне відхилення розрахункових від експериментальних даних складає  $\pm 30$  %.

Рівняння (18) та (19) дають можливість оцінити утворення мартенситу в ЗТВ вуглецевих і низьколегованих сталей при заданих режимах зварювання чи наплавлення. При цьому розраховується час охолодження ЗТВ ( $\Delta t_{CB}$ ) від критичної точки  $A_3$  до температури  $M_H$ , яке порівнюється з  $\Delta t_3$  і  $\Delta t_{0,5}^M$ . У разі, якщо треба одержати мартенситу в ЗТВ не більш ніж 50 %, то розраховується необхідна температура попереднього підігріву.

Тривалість охолодження  $\Delta t_{CB}$  в інтервалі від  $A_3$  до температури  $M_H$  для найбільш простих випадків можливо оцінити по формулам:

а) при наплавленні на масивне тіло:

$$\Delta t_{CB} = \frac{q}{2\pi\lambda\nu} \left( \frac{1}{M_H - T_0} - \frac{1}{A_3 - T_0} \right), \quad (20)$$

б) при однопрохідному зварюванні листів:

$$\Delta t_{CB} = \frac{q^2}{4\pi\lambda c\gamma\nu^2\delta^2} \left( \frac{1}{(M_H - T_0)^2} - \frac{1}{(A_3 - T_0)^2} \right), \quad (21)$$

де  $q = I_{CB} U_d \eta$  – ефективна теплова потужність зварювальної дуги;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності;  $\nu$  – швидкість зварювання чи наплавлення;  $c\gamma$  – теплоємність одиниці об'єму металу;  $\delta$  – товщина листа;  $T_0$  – початкова температура тіла.

Критичні точки  $A_3$  та  $M_H$  залежать від складу сталей і можуть бути розраховані по формулам [4]:

$$A_3 = 910 - 229 C + 32 Si - 25 Mn - 8 Cr - 18 Ni + 2 Mo + 117 V - 24 Cu + 7 W - 120 B$$

$$M_H = 550 - 400 C - 6 Si - 33 Mn - 25 Cr - 16 Ni + 27 Mo + 130 V - 17 Cu - 15 W - 200 B.$$

При  $\Delta t_{CB} < \Delta t_3$  в ЗТВ утворюється практично повністю мартенситна структура, що при несприятливих умовах може призвести до утворення холодних тріщин. Тоді замінивши в рівняннях (18) та (19)  $\Delta t_{CB}$

на  $\Delta t_{0,5}^M$  та прирівнявши їх, знайдемо мінімальну температуру підігріву, яка дає можливість для заданої сталі і умовах зварювання чи наплавлення одержати в ЗТВ мартенситу не більше 50 %.

Заключним етапом курсової роботи є визначення розмірів різних ділянок ЗТВ зварного з'єднання, оцінка стану високотемпературних ділянок ЗТВ по термічному циклу і діаграмі термокінетичного перетворення аустеніту сталі заданої марки (додаток 3), а також розрахувати швидкість охолодження при температурі 550 °C та оцінити зварюваність сталі на даному режимі, а також розрахувати при необхідності температуру попереднього підігріву.

## РЕКОМЕНДУЄМА ТА ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1. *Кочанов Н.С.* Компактные шестизначные математические таблицы. – Л: Машиностроение, 1973.
2. *Лебедев Ю.М., Лебедева В.Ф.* Оптимизация расчетов на ЭВМ тепловых процессов сварки. Сварочное производство. – 1988. – № 5.
3. *Лебедев Ю.М.* Влияние состава стали на формирование структуры ЗТВ сварных соединений. Автоматическая сварка. – 1999. – № 11.
4. *Лебедев Ю.М.* Алгоритмы расчета условий свариваемости низколегированных закаливающихся сталей в зависимости от их состава и исходной структуры. В кн. Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах. Под ред. проф. *В.И. Махненко*. Сб. трудов международной конференции, сентябрь 2004, пос. Кацивели, Крым, Украина. – С. 145–150.
5. *Лебедев Ю.М., Лебедева В.Ф., Самохин С.М.* Методические указания к выполнению курсовой работы "Расчеты тепловых процессов при сварке". – Николаев: НКИ, 1991.
6. *Рыкалин Н.Н.* Расчеты тепловых процессов при сварке. – М.: Машгиз, 1952.
7. Теория сварочных процессов / Под ред. *В.В. Фролова*. – М: Высшая школа, 1988.
8. *Шориоров М.Х., Белов В.В.* Фазовые превращения и изменение свойств стали при сварке. – М: Наука, 1972.

Таблиця III. Теплофізичні розрахункові коефіцієнти для різних металів і сплавів [7]

| Матеріал                                   | Середня температура, °С | Коефіцієнт тепло-<br>провідності $\lambda$ ,<br>Дж/(см·с·К) | Об'ємна тепло-<br>ємність, $c\gamma$ ,<br>Дж/(см <sup>3</sup> ·К) | Коефіцієнт темпера-<br>туропровідності $\alpha$ ,<br>см <sup>2</sup> /с |
|--------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Низьковуглецеві та<br>низьколеговані сталі | 500...600               | 0,38...0,42                                                 | 4,90...5,2                                                        | 0,075...0,09                                                            |
| Неіржавіючі аустенітні<br>сталі            | 600                     | 0,25...0,33                                                 | 4,70...4,8                                                        | 0,053...0,07                                                            |
| Мідь                                       | 400                     | 3,70...3,80                                                 | 3,85...4,0                                                        | 0,950...0,96                                                            |
| Латунь                                     | 350...400               | 1,17                                                        | 3,45                                                              | 0,34                                                                    |
| Алюміній                                   | 300                     | 2,70                                                        | 2,70                                                              | 1,00                                                                    |
| Титан                                      | 700                     | 0,17                                                        | 2,80                                                              | 0,06                                                                    |

Коефіцієнт температуропровідності  $b$  при зварюванні пластин товщиною  $\delta$  визначається по формулі  $b = \frac{2\alpha}{c\gamma \cdot \delta}$ . Коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$  при зварюванні сталей приймають постійним, віднесеному до температурного інтервалу 200...400 °С. В указаному інтервалі температур  $\alpha$  при зварюванні на повітрі змінюється від  $2 \cdot 10^{-3}$  до  $4 \cdot 10^{-3}$  Дж/см<sup>2</sup>·с·К [7].

Таблиця П2. Функція Бесселя від мнимого аргументу другого роду нульового порядку [1]

| U    | $10K_0(U)$   | U    | $10K_0(U)$   | U    | $10K_0(U)$   | U    | $10K_0(U)$   | U    | $10K_0(U)$   |
|------|--------------|------|--------------|------|--------------|------|--------------|------|--------------|
| 0    | $\infty$     | 0,06 | 29,329       | 0,12 | 22,479       | 0,18 | 18,537       | 0,24 | 15,798       |
| 0,02 | 40,285       | 0,08 | 26,475       | 0,14 | 20,971       | 0,20 | 17,537       | 0,26 | 15,048       |
| 0,04 | 33,365       | 0,10 | 24,471       | 0,16 | 19,674       | 0,22 | 16,620       | 0,28 | 14,360       |
| U    | $10^2K_0(U)$ | U    | $10^2K_0(U)$ | U    | $10^2K_0(U)$ | U    | $10^2K_0(U)$ | U    | $10^2K_0(U)$ |
| 0,30 | 13,725       | 1,00 | 4,2102       | 1,70 | 16,550       | 2,40 | 7,0217       | 3,10 | 3,0955       |
| 0,32 | 13,136       | 1,02 | 4,0919       | 1,72 | 16,137       | 2,42 | 6,8564       | 3,12 | 3,0250       |
| 0,34 | 12,587       | 1,04 | 3,9774       | 1,74 | 15,735       | 2,44 | 6,6951       | 3,14 | 2,9563       |
| 0,36 | 12,075       | 1,06 | 3,8667       | 1,76 | 15,344       | 2,46 | 6,5378       | 3,16 | 2,8891       |
| 0,38 | 11,595       | 1,08 | 3,7597       | 1,78 | 14,963       | 2,48 | 6,3844       | 3,18 | 2,8235       |
| 0,40 | 11,145       | 1,10 | 3,6560       | 1,80 | 14,593       | 2,50 | 6,2348       | 3,20 | 2,7595       |
| 0,42 | 10,721       | 1,12 | 3,5557       | 1,82 | 14,233       | 2,52 | 6,0888       | 3,22 | 2,6970       |
| 0,44 | 10,321       | 1,14 | 3,4586       | 1,84 | 13,882       | 2,54 | 5,9464       | 3,24 | 2,6359       |
| 0,46 | 9,9426       | 1,16 | 3,3645       | 1,86 | 13,541       | 2,56 | 5,8075       | 3,26 | 2,5762       |
| 0,48 | 9,5842       | 1,18 | 3,2734       | 1,88 | 13,208       | 2,58 | 5,6720       | 3,28 | 2,5180       |
| 0,50 | 9,2442       | 1,20 | 3,1851       | 1,90 | 12,885       | 2,60 | 5,5398       | 3,30 | 2,4611       |
| 0,52 | 8,9212       | 1,22 | 3,0995       | 1,92 | 12,569       | 2,62 | 5,4109       | 3,32 | 2,4055       |
| 0,54 | 8,6138       | 1,24 | 3,0166       | 1,94 | 12,263       | 2,64 | 5,2850       | 3,34 | 2,3512       |
| 0,56 | 8,3210       | 1,26 | 2,9361       | 1,96 | 11,964       | 2,66 | 5,1622       | 3,36 | 2,2982       |
| 0,58 | 8,0418       | 1,28 | 2,8581       | 1,98 | 11,673       | 2,68 | 5,0424       | 3,38 | 2,2464       |
| 0,60 | 7,7752       | 1,30 | 2,7825       | 2,00 | 11,389       | 2,70 | 4,9255       | 3,40 | 2,1958       |
| 0,62 | 7,5204       | 1,32 | 2,7091       | 2,02 | 11,113       | 2,72 | 4,8115       | 3,42 | 2,1464       |
| 0,64 | 7,2767       | 1,34 | 2,6379       | 2,04 | 10,844       | 2,74 | 4,7001       | 3,44 | 2,0981       |
| 0,66 | 7,0433       | 1,36 | 2,5688       | 2,06 | 10,582       | 2,76 | 4,5915       | 3,46 | 2,0510       |
| 0,68 | 6,9197       | 1,38 | 2,5017       | 2,08 | 10,327       | 2,78 | 4,4855       | 3,48 | 2,0049       |

|      |               |      |               |      |               |      |               |      |               |
|------|---------------|------|---------------|------|---------------|------|---------------|------|---------------|
| 0,70 | 6,6052        | 1,40 | 3,4366        | 2,10 | 10,078        | 2,80 | 4,3820        | 3,50 | 19599         |
| 0,72 | 6,3994        | 1,42 | 2,3733        | 2,12 | 9,8360        | 2,82 | 4,2810        | 3,52 | 1,9159        |
| 0,74 | 6,2017        | 1,44 | 2,3119        | 2,14 | 9,5999        | 2,84 | 4,1824        | 3,54 | 1,8730        |
| 0,76 | 6,0118        | 1,46 | 2,2523        | 2,16 | 9,3698        | 2,86 | 4,0862        | 3,56 | 1,8310        |
| 0,78 | 5,8292        | 1,48 | 2,1943        | 2,18 | 9,1455        | 2,88 | 3,9923        | 3,58 | 1,8000        |
| 0,80 | 5,6535        | 1,50 | 2,1381        | 2,20 | 8,9269        | 2,90 | 3,9006        | 3,60 | 1,7500        |
| 0,82 | 5,4843        | 1,52 | 2,0834        | 2,22 | 8,7138        | 2,92 | 3,8111        | 3,62 | 1,7108        |
| 0,84 | 5,3215        | 1,54 | 2,0302        | 2,24 | 8,5062        | 2,94 | 3,7238        | 3,64 | 1,6726        |
| 0,86 | 5,1645        | 1,56 | 1,9786        | 2,26 | 8,3037        | 2,96 | 3,6385        | 3,66 | 1,6352        |
| 0,88 | 5,0132        | 1,58 | 1,9284        | 2,28 | 8,1064        | 2,98 | 3,5552        | 3,68 | 1,5987        |
| 0,90 | 4,8673        | 1,60 | 1,8795        | 2,30 | 7,9140        | 3,00 | 3,4740        | 3,70 | 1,5631        |
| 0,92 | 4,7265        | 1,62 | 1,8321        | 2,32 | 7,7264        | 3,02 | 3,3946        | 3,72 | 1,5282        |
| 0,94 | 4,5906        | 1,64 | 1,7859        | 2,34 | 7,5435        | 3,04 | 3,3171        | 3,74 | 1,4942        |
| 0,96 | 4,4594        | 1,66 | 1,7411        | 2,36 | 7,3652        | 3,06 | 3,2415        | 3,76 | 1,4609        |
| 0,98 | 4,3327        | 1,68 | 1,6974        | 2,38 | 7,1913        | 3,08 | 3,1675        | 3,78 | 1,4284        |
| U    | $10^3 K_0(U)$ | U    | $10^3 K_0(U)$ | U    | $10^3 K_0(U)$ | U    | $10^3 K_0(U)$ | U    | $10^3 K_0(U)$ |
| 3,80 | 13,966        | 4,04 | 10,672        | 4,28 | 8,1674        | 4,52 | 6,2599        | 4,76 | 4,8040        |
| 3,82 | 13,655        | 4,06 | 10,436        | 4,30 | 7,9880        | 4,54 | 6,1230        | 4,78 | 4,6995        |
| 3,84 | 13,352        | 4,08 | 10,205        | 4,32 | 7,8125        | 4,56 | 5,9892        | 4,80 | 4,5972        |
| 3,86 | 13,955        | 4,10 | 9,9800        | 4,34 | 7,6410        | 4,58 | 5,8584        | 4,82 | 4,4973        |
| 3,88 | 12,766        | 4,12 | 9,7598        | 4,36 | 7,4733        | 4,60 | 5,7304        | 4,84 | 4,3995        |
| 3,90 | 12,482        | 4,14 | 9,5446        | 4,38 | 7,3094        | 4,62 | 5,6053        | 4,86 | 4,3039        |
| 3,92 | 12,206        | 4,16 | 9,3342        | 4,40 | 7,1491        | 4,64 | 5,4830        | 4,88 | 4,2104        |
| 3,94 | 11,935        | 4,18 | 9,1285        | 4,42 | 6,9924        | 4,66 | 5,3634        | 4,90 | 4,1189        |
| 3,96 | 11,681        | 4,20 | 8,9275        | 4,44 | 6,8392        | 4,68 | 5,2465        | 4,92 | 4,0295        |
| 3,98 | 11,412        | 4,22 | 8,7309        | 4,46 | 6,6895        | 4,70 | 5,1321        | 4,94 | 3,9421        |
| 4,00 | 11,160        | 4,24 | 8,5388        | 4,48 | 6,5430        | 4,72 | 5,0203        | 4,96 | 3,8565        |
| 4,02 | 10,913        | 4,26 | 8,3510        | 4,50 | 6,3999        | 4,74 | 4,9110        | 4,98 | 3,7729        |

## ТИПОВІ ПРОГРАМИ

Варіант 1

1\_1

```

C    РАССЧЕТ ТЕМП ПОЛЯ ПРИ НАПЛАВКЕ
      REAL K1,K2,L
      OPEN(7,FILE='11.rez')
3    FORMAT(7X,'ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ: '//10X, 'Q= ', F10.4/10X, 'L= '
      *,F10.4/10X, 'A = ',F10.4/10X, 'V= ',F10.4//)
100  FORMAT(7X,'Y',8X,'X',12X,'T',10X,'T1',10X,'PT',11X,'PT1')
110  FORMAT(5X,F5.2,4X,F7.3,2(4X,F8.1),2(4X,E9.2))
      P=3.1415
      WRITE(6,200)
200  FORMAT('Введите коэффициент :'/5X,'L-теплопроводности/'
      *5X,'A- температуропроводности :')
      READ(5,*)L,A
      WRITE(6,*)'Введите Q – эффективную тепловую мощность дуги : '
      READ(5,*)Q
      WRITE(6,*)' Введите V- скорость сварки см/с:'
      READ(5,*)V
      WRITE(7,3)Q,L,A,V
      K1=Q/(2*P*L)
      K2=-V/2./A
      Z=0
      H=-0.1
      WRITE(7,100)
      Y=0.25
      DO 10 J=1,21
      X=Z
      DO 20 I=1,500
      R=SQRT (X*X+Y*Y)
      S=X+H
      R1=SQRT (S*S+Y*Y)
      F=-X/R**2+K2*(1+X/R)
      F1=-S/R1**2+K2*(1+S/R1)
      IF(F*F1)30,30,40
30    T=K1/R*EXP(K2*(X+R))
38

```

```

T1=K1/R1*EXP(K2*(S+R1))
PT=T*F
PT1=T1*F1
WRITE(7,110)Y,X,T,T1,PT,PT1
IF(T.LE.200.)GOTO 7
Z=X
GOTO 50
40  X=X+H
20  CONTINUE
50  Y=Y+0.15
10  CONTINUE
7   STOP
END

```

## 1\_2

```

C   РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРИ НАПЛАВКЕ
REAL K1,K2,L,Y(6)
OPEN(7,FILE='12.rez')
6   FORMAT(4X,F10.2,2X,F10.1)
7   FORMAT(7X,'ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ://10X,'Q= ',F10.4/10X,'L= ',
        *F10.4/10X,'A= ',F10.4/10X,'V= ',F10.4)
66  FORMAT(11X,'X',12X,'T')
3   FORMAT(/4X,'ПРИ Y= ',F10.5/)
5   FORMAT('Введите Y[,I1,'] :')
P=3.1415
WRITE(6,201)
201 FORMAT('Введите коэффициенты :'/5X,'L-теплопроводности'/5
        *X,'A- температуропроводности :')
READ(5,*)L,A
WRITE(6,*)'Введите Q- эффективную тепловую мощность дуги : '
READ(5,*)Q
WRITE(6,*)'Введите V – скорость сварки см/с:'
READ(5,*)V
DO 20 I=1,6
WRITE(6,5)I
20  READ(5,*)Y(I)
WRITE(7,7)Q,L,A,V
K1=Q/(2.*P*L)

```

```

K2=-V/2./A
DO 10 I=1,6
H=-.05
X=.5
WRITE(7,3)Y(I)
WRITE(7,66)
DO 11 J=1,35
IF(J.EQ.11.AND.I.EQ.1)GOTO 12
R=SQRT(X*X+Y(I)*Y(I))
T=K1/R*EXP(K2*(R+X))
WRITE(7,6)X,T
IF(J.EQ.11)H=-0.2
IF(J.EQ.16)H=-0.5
IF(J.EQ.20)H=-1.
IF(J.EQ.27)H=-5.
IF(J.EQ.31)H=-10.
GOTO 11
12 H=-.05
11 X=X+H
10 CONTINUE
STOP
END

```

### 1\_3

```

C    РАСЧЕТ ТЕРМИЧЕСКОГО ЦИКЛА ТОЧКИ ЗТВ ПРИ НАПЛАВКЕ
REAL Q,L,A,V,K1,K2,P
INTEGER K
OPEN(7,FILE='13.rez ')
70  FORMAT(4X,'X',5X,'RO',9X,'TA',8X,'T',9X,'TH')
50  FORMAT(F6.2,3X,F8.3,5(2X,F8.2))
2   FORMAT(7X,'ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ://10X,'Q= ',F10.4/10X,'L= ',
      *F10.4/10X,'A= ',F10.4/10X,'V= ',F10.4/10X,'Y(1350)= ',F1
      *0.4)
P=3.1415
A=0.08
L=0.4
WRITE(6,*)'Введите Q- эффективную тепловую мощность дуги : '
READ(5,*)Q

```

```

WRITE(6,*)'Введите V- скорость сварки,см/с:'
READ(5,*)V
WRITE(6,*)'Введите координату Y при температуре 1350 °C : '
READ(5,*)Y
WRITE(7,2)Q,L,A,V,Y
K1=Q/2./P/L
K2=-V/2./A
TK=20./V
H=-1
X=4.0
WRITE(7,70)
DO 10 J=1,20
R=SQRT(X*X+Y*Y)
RO=-K2*R
TH=(5.-X)/V
TA=V*V/4./A*TH
T=K1/R*EXP(K2*(X+R))
WRITE(7,50)X,RO,TA,T,TH
10  X=X+H
    X=-20.
    H=-5.
    DO 20 K=1,100
    IF(T.LE.100.) GOTO 30
    R=SQRT(X*X+Y*Y)
    RO=-K2*R
    TH=(5.-X)/V
    TA=V*V*TH/4./A
    T=K1/R*EXP(K2*(X+R))
    TAB=V*V*(TH-TK)/4./A
    WRITE(7,50)X,RO,TA,T,TH,TAB
20  X=X+H
30  STOP
    END

```

#### 1\_4

```

C  НАПЛАВКА НА МАССИВНОЕ ИЗДЕЛИЕ
   REAL K1,K2,K3,L,K,tb,h
   OPEN(7,FILE='14.rez')

```

```

80  FORMAT(7X,'РАСЧЕТ МАКСИМАЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР'//15X,'Y',11X,'T')
50  FORMAT(11X,F6.2,6X,F8.2)
90  FORMAT(//7X,'РАСЧЕТ ТЕРМИЧЕСКОГО ЦИКЛА.'//15X,'ТВ',11X,'T')
70  FORMAT(11X,F6.2,6X,F8.2)
10  FORMAT(10X,'ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ :'/10X,'Q=' ,F10.4/10X,'L='
    *,F10.4/10X,'A=' ,F10.4/10X,'V=' ,F10.4/10X,'CG=' ,F10.4/
    *10X,'TM=' ,F10.4//)
    P=3.1415
    WRITE(6,200)
200  FORMAT('Введите коэффициенты:'/5X,'L – теплопроводности'/5X,
    *'A – температуропроводности :')
    READ(5,*)L,A
    WRITE(6,*)'Введите Q – эффективную тепловую мощность : '
    READ(6,*)Q
    WRITE(6,*)'Введите V – скорость сварки см/с:'
    READ(6,*)V
    WRITE(6,*)'Введите CG – объёмную теплоёмкость : '
    READ(6,*)CG
    WRITE(6,*)'Введите TM – максимальную температуру : '
    READ(6,*)TM
    WRITE(7,10)Q,L,A,V,CG,TM
    S=0.368*Q*2./P/V
    K1=S/5.
    R0=SQRT(S/CG/TM)
    K2=Q/2./P/L/V
    K3=-R0*R0/4./A
    H=0.05
    HY=.1
    Y=0.1
    WRITE(7,80)
110  T=K1/Y**2
    WRITE(7,50)Y,T
    IF (T.LE.200.) GOTO 100
    Y=Y+HY
    GOTO 110
100  WRITE(7,90)
    H=0.9
    K=0.1
118  CONTINUE
    H=H+K

```

```

        IF (H.LE.1000) GOTO 119
        GOTO 130
119    TB=H
        T=K2/TB*EXP(K3/TB)
        WRITE(7,70)TB,T
        IF (T.LE.20)GOTO 130
        IF (TB.LT.1) K=0.1
        IF (TB.GE.1) K=0.5
        IF (TB.GE.5) K=1
        IF (TB.GE.10) K=5
        IF (TB.GE.30) K=10
        IF (TB.GE.100) K=50
        IF (TB.GE.300) K=100
        GOTO 118
130    STOP
        END

```

## Вариант 2

### 2\_1

```

C      Расчет температурного поля при сварке
      REAL K1,K2, K3, K4,K,L
      OPEN(7,FILE='21.REZ')
2      FORMAT(7X,'ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ :'/10X,'Q=' ,F10.4/10X,'L=' ,
      *F10.4/10X,'A=' ,F10.4/10X,'V=' ,F10.4/10X,'D=' ,F10.4/10
      *X,'B=' ,F10.4//)
100    FORMAT(3X,'Y',10X,'X',8X,'T',11X,'T1',10X,'PT',9X,'PT1')
110    FORMAT(1X,F5.2,5X,F5.1,2F12.2,2F12.4)
      P=3.1415
      WRITE(6,200)
200    FORMAT('Введите коэффициенты :'/5X,'A- температуропроводн'
      *, 'ости (0.08)'/5X,'B- температуроотдачи'/5X,'L- теплопроводности (
      *0.4) :')
      READ(5,*)A,B,L
      WRITE(6,*) 'Введите Q- зффективную тепловую мощность дуги : '
      READ(5,*)Q
      WRITE(6,*)'Введите V- скорость сварки, см/с : '
      READ(5,*)V
      WRITE(6,*)'Введите D- толщину листа, см : '
      READ(5,*)D

```

```

WRITE(7,2)Q,L,A,V,D,B
H=-0.1
Z1=-0.1
K1=Q/2.0/P/L/D
K2=-V/2./A
K3=SQRT(K2*K2+B/A)
K4=SQRT(P/2.0/K3)
K5=1./8./K3
K=K1*K4
WRITE(7,100)
Y=0.1
DO 10 J=1,40
X=Z1
DO 20 I=1,500
R=SQRT(X*X+Y*Y)
S=X+H
R1=SQRT(S*S+Y*Y)
F=(K2-K3*X/R)-X/2./R**2*(1.-3.*K5/R)/(1.-K5/R)
F1=(K2-K3*S/R1)-S/2./R1**2*(1.-3.*K5/R1)/(1.-K5/R1)
IF(F*F1)30,30,40
30  T=K*EXP(K2*X-K3*R)*(1.-K5/R)/SQRT(R)
    T1=K*EXP(K2*S-K3*R1)*(1.-K5/R1)/SQRT(R1)
    PT=T*F
    PT1=T1*F1
    WRITE(7,110)Y,X,T,T1,PT,PT1
    IF(T.LE.200.)GOTO 4
    Z1=X
    GOTO 50
40  X=X+H
20  CONTINUE
50  Y=Y+0.25
10  CONTINUE
4   STOP
    END

```

## 2\_2

```

C   РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРИ СВАРКЕ
    REAL K1,K2,K3,K4,K,L,Y(6)

```

```

OPEN(7,FILE='22.rez')
3  FORMAT(/5X,'ПРИ Y= ',F10.2/)
4  FORMAT(7X,3(F8.2,8X))
9  FORMAT(7X,2(F8.2,8X),'T')
5  FORMAT(10X,'X',12X,'U',12X,'T')
6  FORMAT(F10.4)
8  FORMAT(7X,'ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ :'/10X,'Q= ',F10.4/10X,'L= ',
    *F10.4/10X,'A= ',F10.4/10X,'V= ',F10.4/10X,'D= ',F10.4/10
    *X,'B= ',F10.4//)
13  FORMAT('Введите Y[,I1,] :')
20  FORMAT(12X,'X',15X,'U',15X,'T')
    P=3.1415
    WRITE(6,200)
200  FORMAT('Введите коэффициенты :'/5X,'A- температуропроводн'
    *, 'ости (0.08)/5X,'B- температуротдачи'/5X,'L- теплопроводности (
    *0.4) :')
    READ(5,*)A,B,L
    WRITE(6,*) Введите Q- зффективную тепловую мощность дуги :
    READ(5,*)Q
    WRITE(6,*)Введите V- скорость сварки, см/с :
    READ(5,*)V
    WRITE(6,*)Введите D- толщину листа, см :
    READ(5,*)D
    DO 21 I=1,6
    WRITE(6,13)I
21  READ(5,*)Y(I)
    WRITE(7,8)Q,L,A,V,D,B
    K1=Q/2./P/L/D
    K2=-V/2./A
    K3=SQRT(K2*K2+B/A)
    K4=SQRT(P/2./K3)
    K=K1*K4
    DO 10 I=1,6
    H=-.05
    X=0.5
    WRITE(7,3)Y(I)
    WRITE(7,20)
    DO 11 J=1,38

```

```

        IF(J.EQ.11.AND.I.EQ.1)GOTO 12
        R=SQRT(X*X+Y(I)*Y(I))
        U=R*K3
        IF(U-2.)14,15,15
14      WRITE(7,9)X,U
        GOTO 16
15      PS=K2*X-U
        T=K1*EXP(PS)*SQRT(P/2./U)*(1.-1./8./U+9./128./U**2.-75./2./
        *(8*U)**3)
        WRITE(7,4)X,U,T
16      IF(J.EQ.11)H=-.2
        IF(J.EQ.16)H=-.5
        IF(J.EQ.20)H=-1.
        IF(J.EQ.27)H=-5.
        IF(J.EQ.31)H=-10.
        GOTO 11
12      H=-.2
11      X=X+H
10      CONTINUE
        STOP
        END

```

## 2\_3

С РАСЧЕТ ТЕРМИЧЕСКОГО ЦИКЛА ТОЧКИ ЗТВ ПРИ СВАРКЕ ПЛАСТИН

```

        REAL K1,K2,K3,K4,K5,K,L
        OPEN(7,FILE='23.rez')
1      FORMAT(8X,'X',8X,'RO',8X,'TA',8X,'U',9X,'T',9X,'TH')
2      FORMAT(/7X,'X',9X,'RO',8X,'TA',7X,'U',9X,'T',9X,'TH',8X,'B'
        *,'AB')
3      FORMAT(4X,F6.0,6F10.2)
4      FORMAT(7X,'ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ :'/10X,'Q= ',F10.4/10X,'L= ',
        *F10.4/10X,'A= ',F10.4/10X,'V= ',F10.4/10X,'D= ',F10.4/10X,
        *'B= ',F10.4/10X,'Y= ',F10.4//)
7      FORMAT(4X,F6.0,4(8X,F8.2),8X,F8.2)
        P=3.1415
        WRITE(6,200)
200     FORMAT('Введите коэффициенты :'/5X,'A- температуропроводн'
        *,'ости (0.08)/5X,'B- температуротдачи'/5X,'L- теплопроводности (

```

```

*0.4):')
READ(5,*)A,B,L
WRITE(6,*) Введите Q- зффективную тепловую мощность дуги : '
READ(5,*)Q
WRITE(6,*)Введите V- скорость сварки, см/с : '
READ(5,*)V
WRITE(6,*)Введите D- толщину листа, см : '
READ(5,*)D
WRITE(6,*)Введите координату Y при температуре 1350 °C : '
READ(5,*)Y
WRITE(7,4)Q,L,A,V,D,B,Y
K1=Q/2./P/L/D
TK=20./V
K2=-V/2./A
K3=SQRT(K2**2+B/A)
K4=SQRT(P/2./K3)
K=K1*K4
K5=V*V/4./A+B
X=4
H=-1
WRITE(7,1)
DO 10 J=1,20
R=SQRT(X*X+Y*Y)
RO=R*K3
TH=(5-X)/V
TA=TH*K5
U=R*K3
IF(U-2.)15,16,16
15 WRITE(7,7)X,RO,TA,U,TH
GOTO 10
16 PS=K2*X-U
T=K1*EXP(PS)*SQRT(P/2./U)*(1.-1./8./U+9/128./U*U-75./2/(8*U
**3))
WRITE(7,3)X,RO,TA,U,T,TH
10 X=X+H
WRITE(7,2)
X=-20.
H=-20.

```

```

DO 20 J=1,100
IF(T.LE.100.)GOTO 30
R=SQRT(X*X+Y*Y)
RO=R*K3
TH=(5.-X)/V
TA=TH*K5
U=R*K3
PS=K2*X-U
T=K1*EXP(PS)*SQRT(P/2./U)*(1.-1./8./U+9./128./U*U-75./2/(8*
U)**3)
TAB=(TH-TK)*K3
WRITE(7,3)X,RO,TA,U,T,TH,TAB
20  X=X+H
30  STOP
END

```

## 2\_4

```

C      ОДНОПРОХОДНАЯ СВАРКА ПЛАСТИН
REAL K1,K2,K3,K4,K5,L
INTEGER TB,H
OPEN(7,FILE='24.rez')
30  FORMAT(4X,I5,6X,F10.2)
40  FORMAT(4X,'РАСЧЕТ МАКСИМАЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР.//8X,'Y',11X,'T')
50  FORMAT(4X,F6.2,6X,F10.2)
60  FORMAT(//4X,'РАСЧЕТ ТЕРМИЧЕСКОГО ЦИКЛА.//7X,'ТВ',12X,'T')
10  FORMAT(7X,'ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ://10X,'Q= ',F10.4/10X,'L= ',
      *F10.4/10X,'A= ',F10.4/10X,'V= ',F10.4/10X,'D= ',F10.4/10X,'CG= ',
      *F10.4/10X,'B= ',F10.4/10X,'TM= ',F10.4//)
P=3.1415
WRITE(6,200)
200  FORMAT('Введите коэффициенты :/5X,'A- температуропроводн'
      *,',ости (0.08)/5X,'B- температуроотдачи'/5X,'L- теплопроводности (
      *0.4) :')
READ(5,*)A,B,L
WRITE(6,*)'Введите Q – эффективную тепловую мощность дуги : '
READ(5,*)Q
WRITE(6,*)'Введите V – скорость сварки, см/с : '
READ(5,*)V

```

```

WRITE(6,*)'Введите D – толщину листа, см :'
```

$$D = \text{READ}(5,*)$$

```

PRITE(6,*)'Введите CG- объёмную теплоёмкость :'
```

$$CG = \text{READ}(5,*)$$

```

WRITE(6,*)'Введите TM – максимальную температуру (1350 °C) :'
```

$$TM = \text{READ}(5,*)$$

```

WRITE(7,10)Q,L,A,V,D,CG,B,TM
S=.484*Q/V/D/2
K1=S/5
K2=B/2./A
K3=S/CG/TM
K4=Q/V/D/SQRT(4.*P*L*CG)
K5=-K3**2/4./A
H=2
Y=.25
HY=.25
WRITE(7,40)
110  T=K1/Y*(1.-K2*Y*Y)
      WRITE(7,50)Y,T
      IF (T.LE.200)GOTO 100
      Y=Y+HY
      GOTO 110
100  WRITE(7,60)
      H=2.0
      K=0
118  CONTINUE
      H=H+K
      IF (H.LE.1000) GOTO 119
      GOTO 130
119  TB=H
      VR=TB
      T=K4/SQRT(VR)*EXP(K5/VR-B*VR)
      WRITE(7,30)TB,T
      IF (T.LE.100) GOTO 130
      IF (TB.LT.10) K=1
      IF (TB.EQ.10) K=5
      IF (TB.EQ.30) K=10
      IF (TB.EQ.100) K=50
```

IF (TB.EQ.300) K=100  
 GOTO 118  
 130 STOP  
 END

### Позначення початкових даних та результатів розрахунків

| Величина                                            | Позначення | Ідентифікатор |
|-----------------------------------------------------|------------|---------------|
| Ефективна теплова потужність дуги                   | $q$        | Q             |
| Коефіцієнт теплопровідності                         | $\lambda$  | L             |
| Коефіцієнт температуропровідності                   | $a$        | A             |
| Швидкість зварювання, наплавлення                   | $v$        | V             |
| Товщина листа                                       | $\delta$   | D             |
| Коефіцієнт температуровіддачі                       | $B$        | B             |
| Об'ємна теплоємність                                | $c?$       | CB            |
| Максимальна температура                             | $T_{MAX}$  | TM            |
| Температура                                         | $T$        | T             |
| Похідна від T по x                                  | $T'_x$     | PT            |
| Безрозмірний критерій відстані                      | $\rho$     | R             |
| Безрозмірний критерій часу в період тепло-насичення | $\tau_H$   | TA            |
| Безрозмірний критерій часу в період вірівнювання    | $\tau_B$   | TAB           |
| Аргумент функції Бесселя                            | $U$        | U             |
| Час                                                 | $t$        | TB            |
| Час зварювання                                      | $t_H$      | TH            |
| Координати                                          | $x,y$      | X,Y           |

# ДІАГРАМИ ТЕРМОКІНЕТИЧНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ АУСТЕНІТУ СТАЛЕЙ ДЛЯ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ ДІЛЯНОК ЗТВ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ

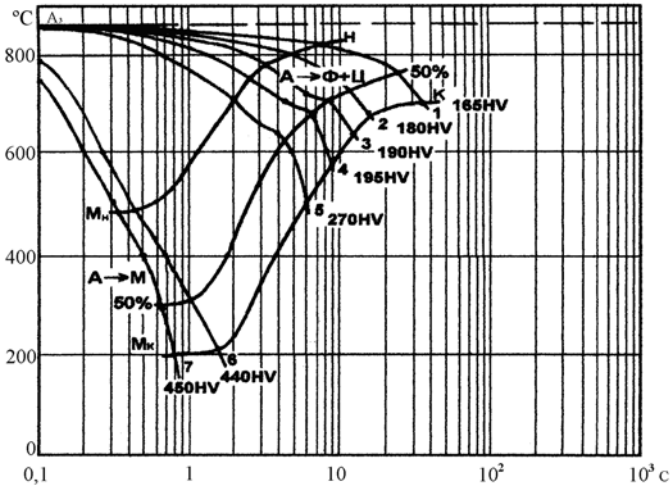


Рис. П1. Діаграма термокінетичного перетворення аустеніту сталі Ст.3  
( $T_H = 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

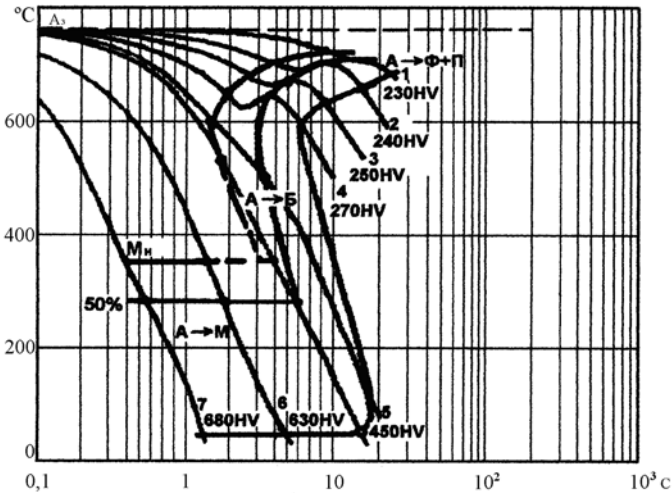


Рис. П2. Діаграма термокінетичного перетворення аустеніту сталі 45  
( $T_H = 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

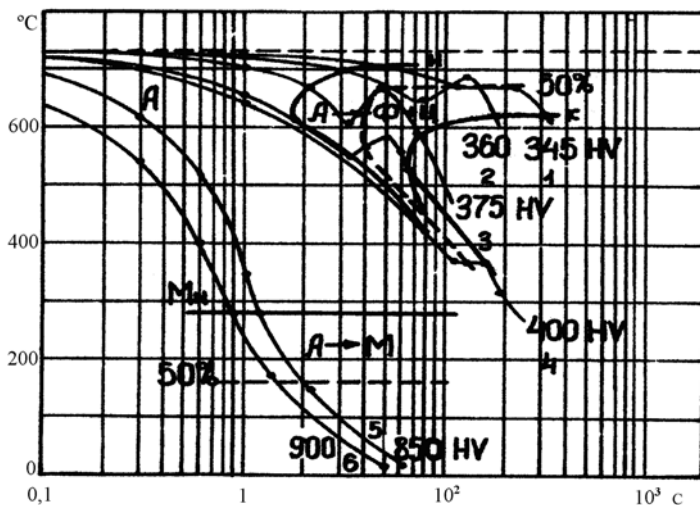


Рис. ПЗ. Діаграма термокінетичного перетворення аустеніту сталі У8  
( $T_H = 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

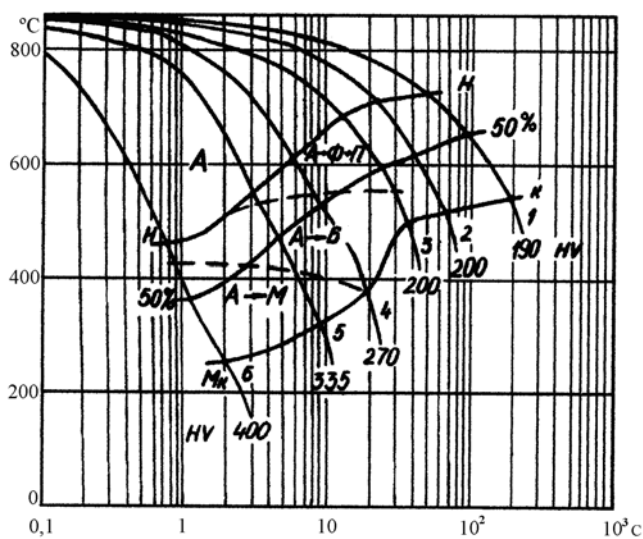


Рис. П4. Діаграма термокінетичного перетворення аустеніту сталі 09Г2  
( $T_H = 1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

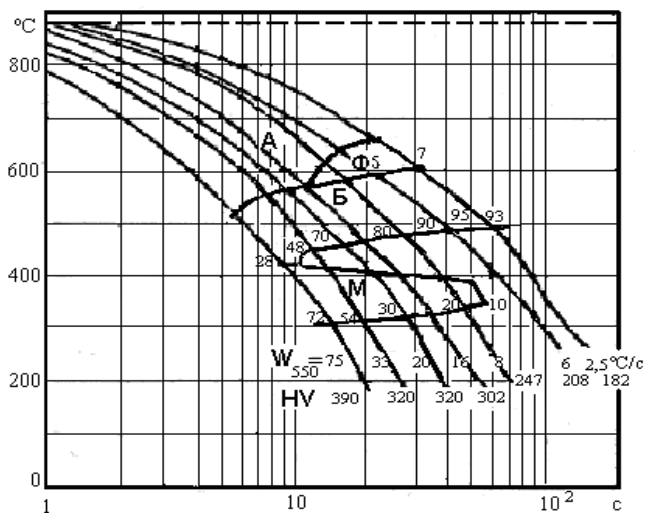


Рис. П5. Діаграма термокінетичного перетворення аустеніту сталі 09Г2С  
( $T_H = 1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

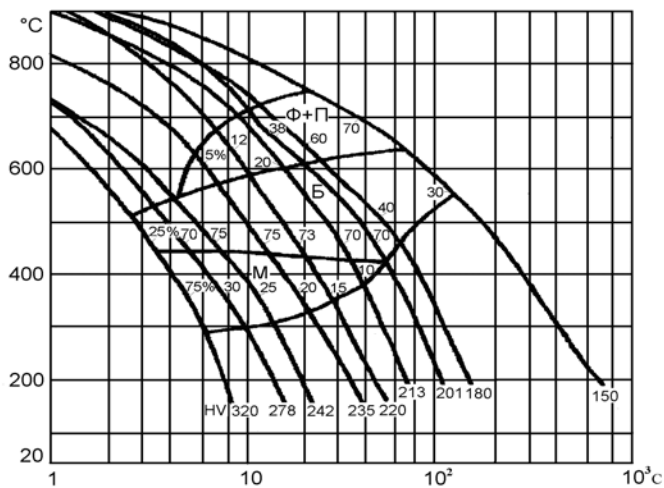


Рис. П6. Діаграма термокінетичного перетворення аустеніту сталі 10ХСНД

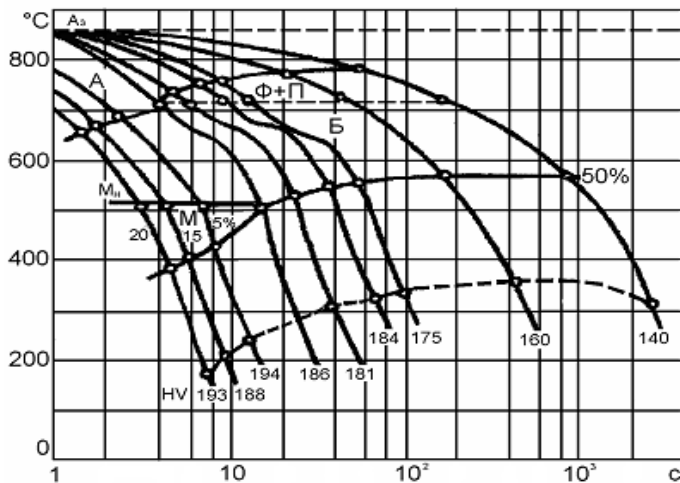


Рис. П7. Діаграма термокінетичного перетворення аустеніту сталі 06Н2М

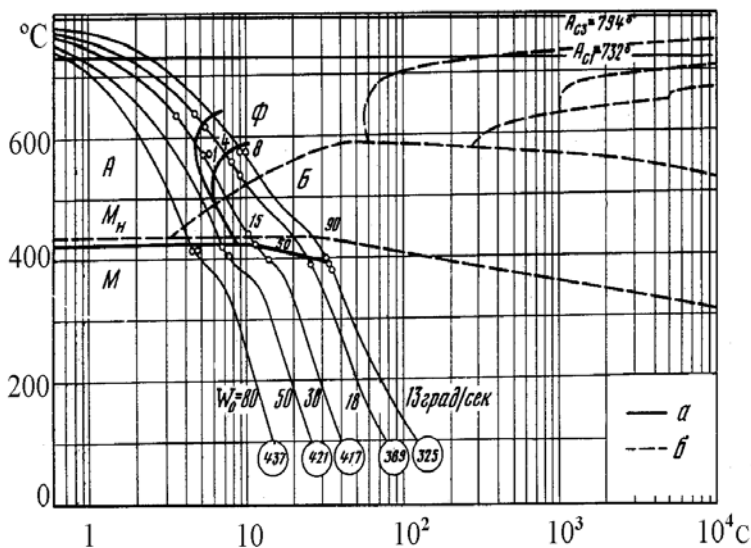


Рис. П8. Діаграма термокінетичного перетворення аустеніту сталі 12ХН2  
( $T_H = 1325^\circ\text{C}$  – а;  $T_H = 1050^\circ\text{C}$  – б)

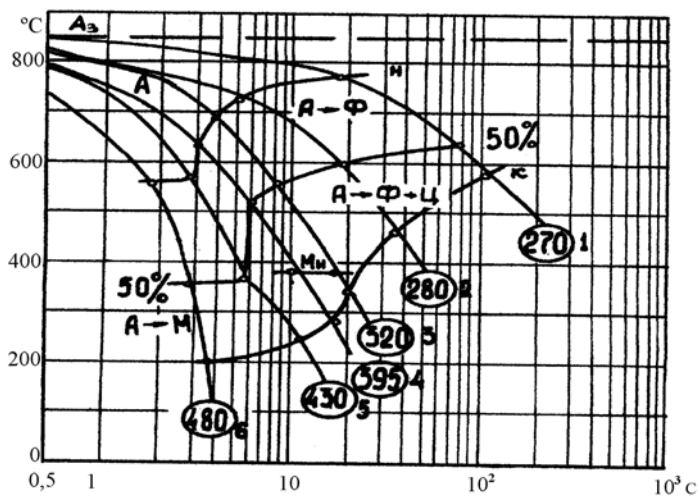


Рис. П9. Діаграма термокінетичного перетворення аустеніту сталі 18Г2АФ  
( $T_H = 1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

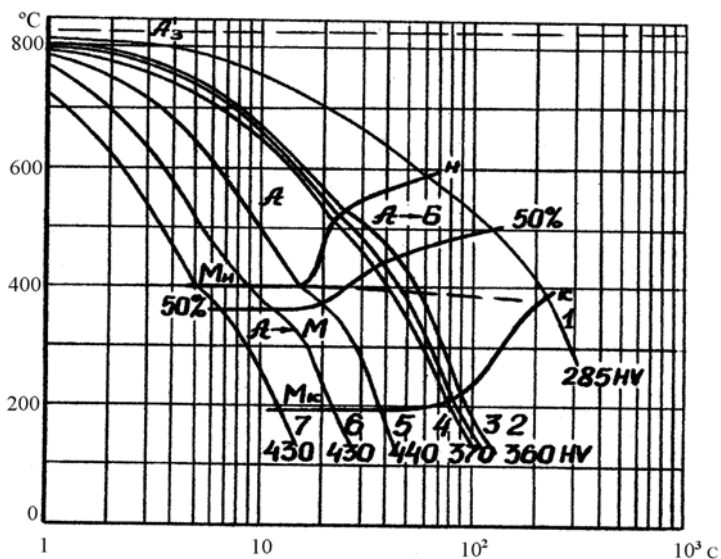


Рис. П10. Діаграма термокінетичного перетворення аустеніту сталі 14ХГ2САФД  
( $T_H = 1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

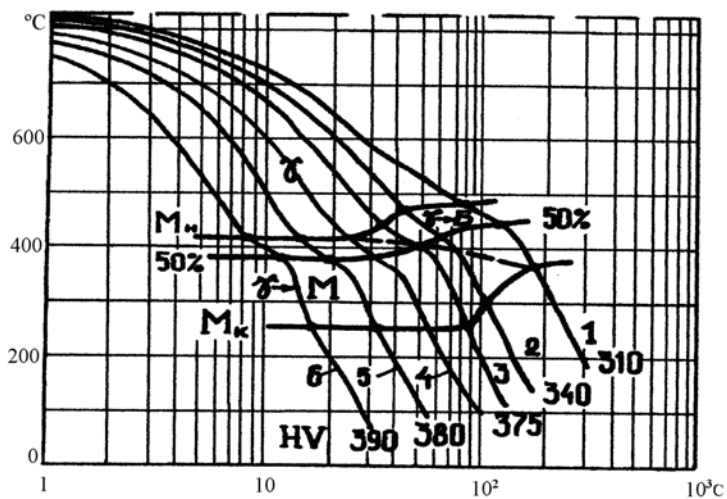


Рис. П11. Діаграма термокінетичного перетворення аустеніту сталі 12ХГН2МД ( $T_H = 1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

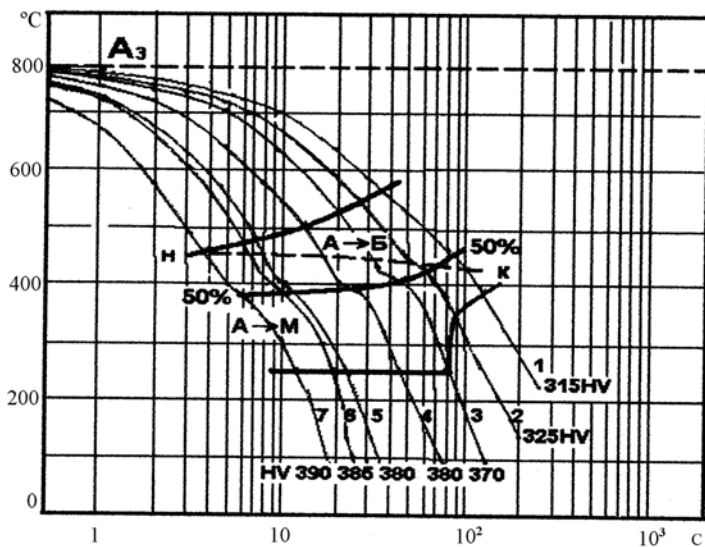


Рис. П12. Діаграма термокінетичного перетворення аустеніту сталі 18ХН3М ( $T_H = 1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

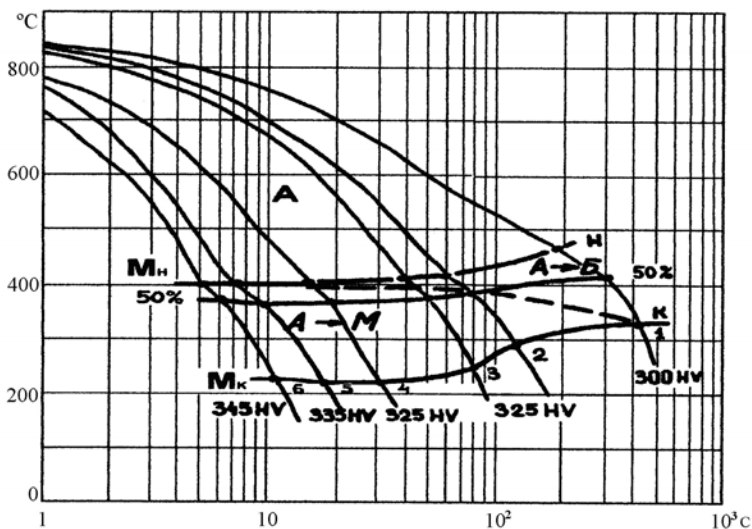


Рис. П13. Діаграма термокінетичного перетворення аустеніту сталі 03Г4АФ ( $T_H = 1250^\circ\text{C}$ )

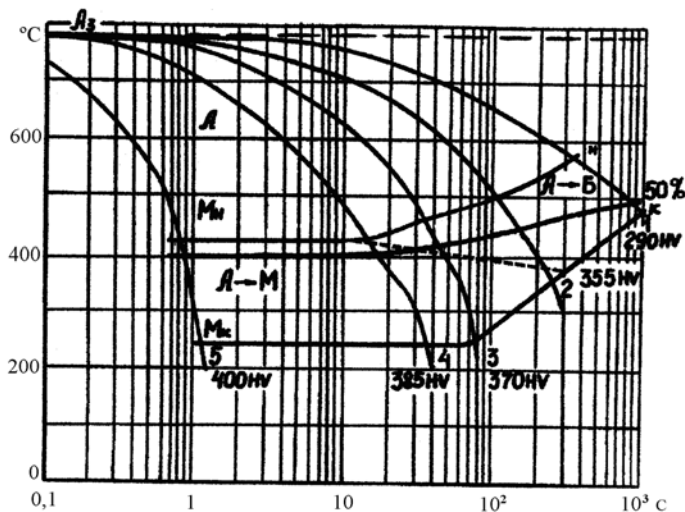


Рис. П14. Діаграма термокінетичного перетворення аустеніту сталі 12Х2Н4 ( $T_H = 1250^\circ\text{C}$ )

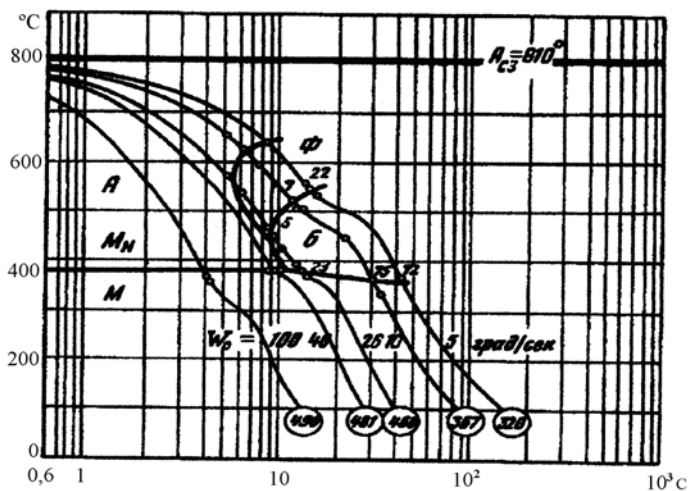


Рис. П15. Діаграма термокінетичного перетворення аустеніту сталі 20НГМ ( $T_H = 1325^{\circ}\text{C}$ )

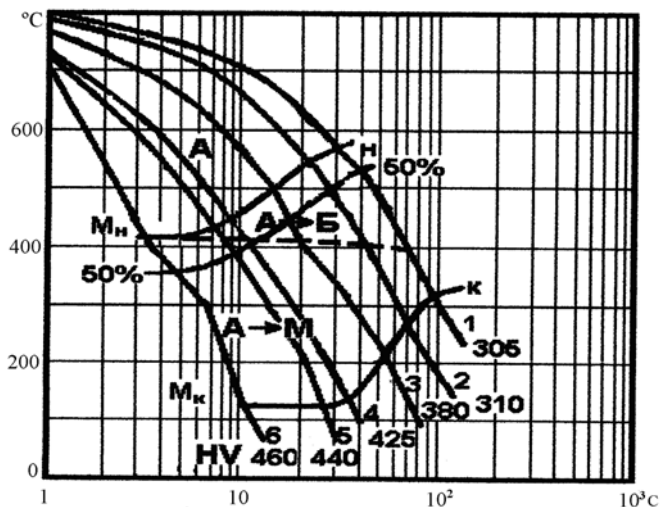


Рис. П16. Діаграма термокінетичного перетворення аустеніту сталі 25ХГТ ( $T_H = 1250^{\circ}\text{C}$ )

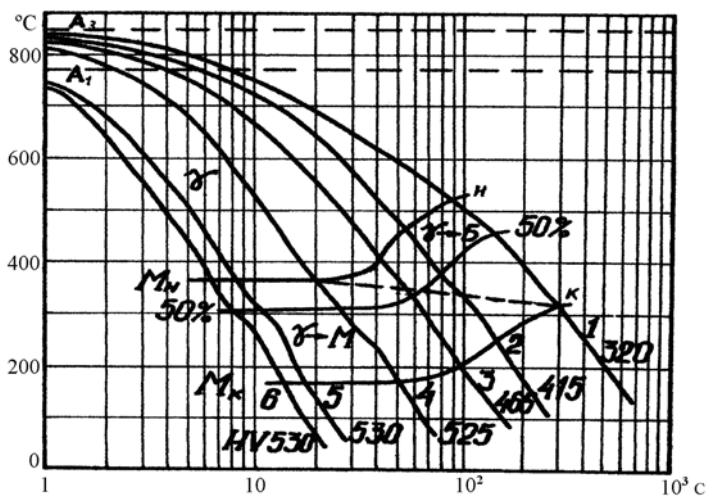


Рис. П17. Діаграма термокінетичного перетворення аустеніту сталі 30ХГСА  
( $T_H = 1250^\circ\text{C}$ )

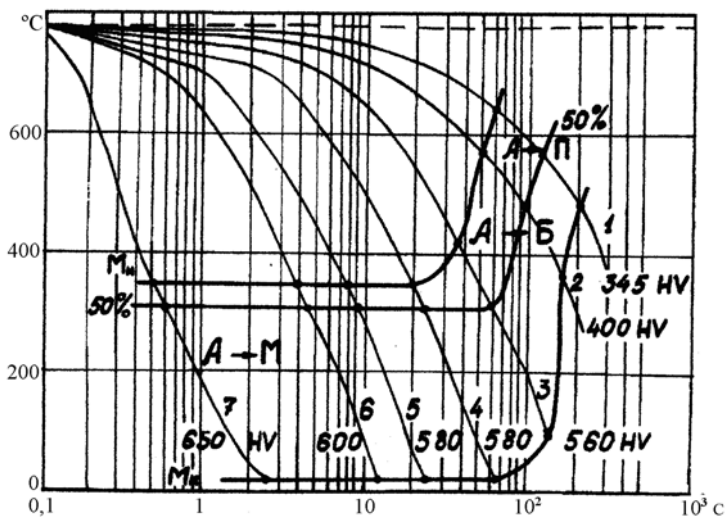


Рис. П18. Діаграма термокінетичного перетворення аустеніту сталі 40Х  
( $T_H = 1250^\circ\text{C}$ )

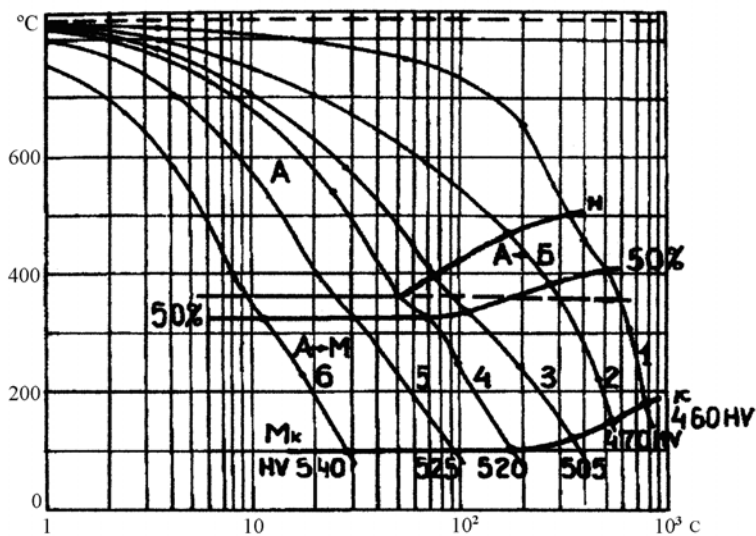


Рис. П19. Діаграма термкінетичного перетворення аустеніту сталі 30ХГСН2А ( $T_H = 1250^\circ\text{C}$ )

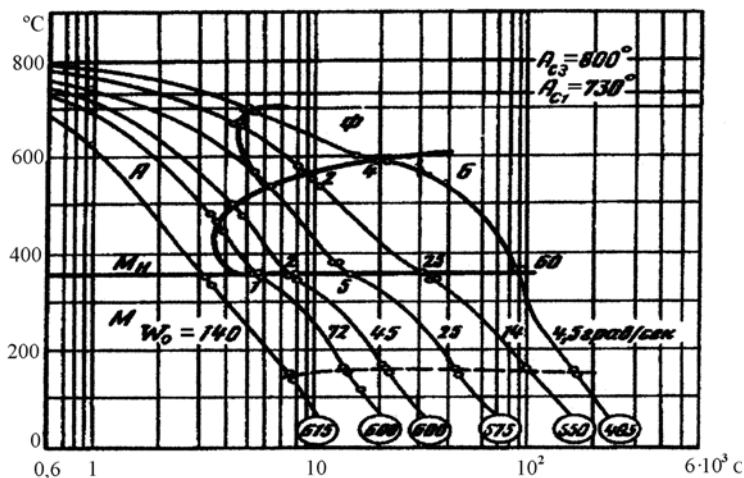


Рис. П20. Діаграма термкінетичного перетворення аустеніту сталі 35ХМФА ( $T_H = 1350^\circ\text{C}$ )

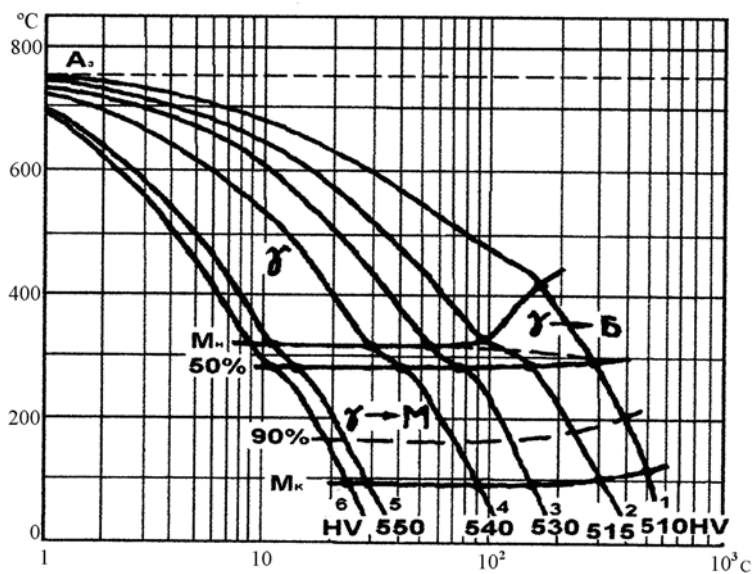


Рис. П21. Діаграма термокінетичного перетворення аустеніту сталі 30Х2Н2М ( $T_H = 1250^\circ\text{C}$ )

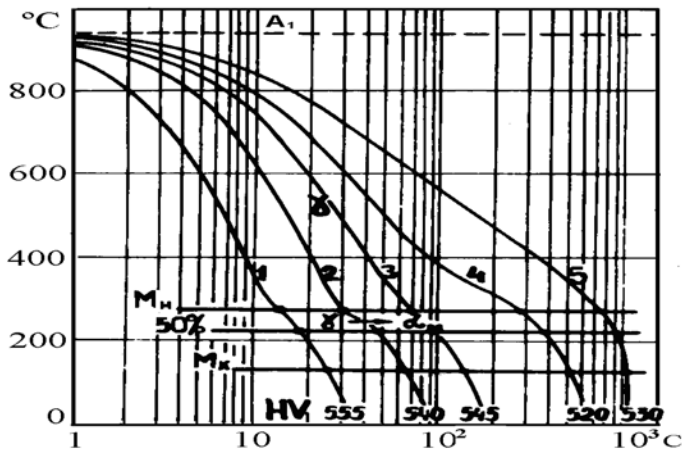


Рис. П22. Діаграма термокінетичного перетворення аустеніту сталі 20Х13

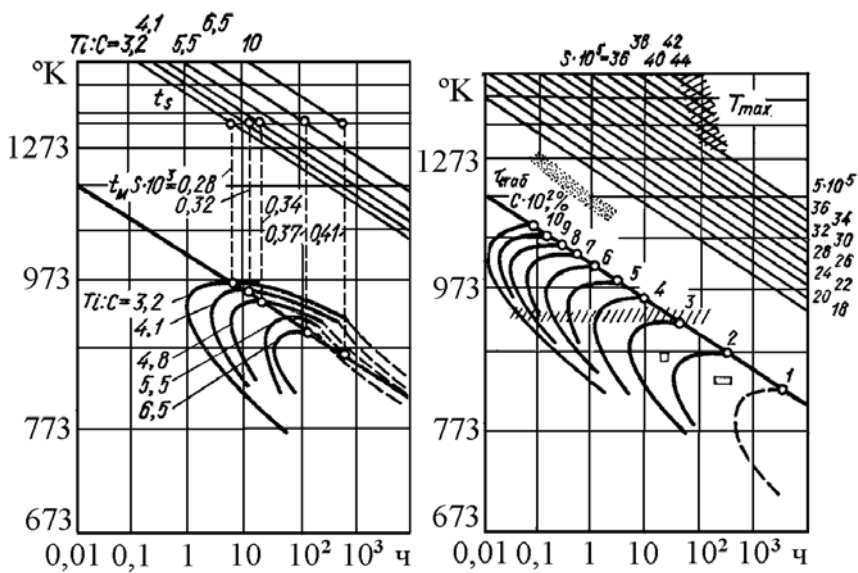


Рис. П23. Діаграма випадіння карбідів в хромонікелевій аустеніту сталі типу 18-8:  
а – X18H9T; б – X18H9

Таблиця ПЗ. Хімічний склад сталей для яких приведені діаграми термодинамічного перетворення аустеніту в високотемпературних ділянках ЗТВ

| № п/п | Марка сталі | Хімічний склад сталей |      |      |      |      |      |      |       |      |                           |
|-------|-------------|-----------------------|------|------|------|------|------|------|-------|------|---------------------------|
|       |             | C                     | Si   | Mn   | Cr   | Ni   | Mo   | V    | Ti    | Cu   | інші                      |
| 1     | Ст3         | 0,21                  | 0,32 | 0,54 | 0,20 | 0,15 | —    | —    | —     | —    | —                         |
| 2     | 45          | 0,46                  | 0,34 | 0,76 | 0,10 | 0,11 | —    | —    | —     | —    | —                         |
| 3     | У8          | 0,80                  | 0,21 | 0,29 | 0,14 | 0,14 | —    | —    | —     | —    | —                         |
| 4     | 09Г2        | 0,11                  | 0,30 | 1,68 | 0,15 | 0,16 | —    | —    | —     | 0,15 | —                         |
| 5     | 09Г2С       | 0,11                  | 0,50 | 1,67 | —    | —    | —    | —    | —     | —    | —                         |
| 6     | 18Г2АФ      | 0,18                  | 0,30 | 1,28 | —    | —    | —    | 0,21 | —     | —    | 0,02N                     |
| 7     | 20ХГС       | 0,24                  | 0,99 | 0,83 | 0,98 | 0,17 | —    | —    | —     | —    | —                         |
| 8     | 35ХГС       | 0,36                  | 1,32 | 0,99 | 1,16 | 0,16 | —    | —    | —     | —    | —                         |
| 9     | 40Х         | 0,44                  | 0,34 | 0,77 | 1,05 | 0,17 | —    | —    | —     | —    | —                         |
| 10    | 25ХГТ       | 0,23                  | 0,32 | 0,90 | 1,0  | —    | —    | —    | 0,05  | —    | —                         |
| 11    | 30ХГСА      | 0,31                  | 1,0  | 0,94 | 0,94 | —    | —    | —    | —     | —    | —                         |
| 12    | 30ХГСН2А    | 0,30                  | 1,06 | 1,08 | 1,13 | 1,55 | —    | —    | —     | —    | —                         |
| 13    | 35ХМФА      | 0,36                  | 0,31 | 0,51 | 1,13 | 0,22 | 0,30 | 0,11 | —     | —    | —                         |
| 14    | 14ХГНМД     | 0,14                  | 0,37 | 1,19 | 1,08 | 1,20 | 0,23 | 0,18 | 0,06  | 0,16 | 0,02N<br>0,06Nb<br>0,002B |
| 15    | 06Н2М       | 0,05                  | 0,17 | 0,25 | 0,07 | 1,65 | 0,21 | —    | 0,036 | 0,16 | —                         |
| 16    | 12Х2Н4      | 0,14                  | 0,30 | 0,50 | 1,50 | 3,40 | —    | —    | —     | —    | —                         |
| 17    | 03Г4АФ      | 0,04                  | 0,44 | 3,70 | —    | —    | —    | 0,18 | —     | —    | —                         |
| 18    | 14ХГ2САФД   | 0,12                  | 0,58 | 1,42 | 0,4  | —    | —    | 0,08 | —     | 0,39 | 0,02N                     |

## ЗМІСТ

|                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Вступ .....                                                                                                                    | 3  |
| Завдання курсової роботи .....                                                                                                 | 5  |
| Розрахунок температурного поля при наплавленні на масивне тіло ...                                                             | 8  |
| Визначення процесів теплового насичування при наплавленні на масивне тіло .....                                                | 14 |
| Розрахунок термічного циклу в періоди тепло насичування та вирівнювання при наплавленні на масивне тіло .....                  | 16 |
| Розрахунок температурного поля при однопрохідному зварюванні пластин .....                                                     | 18 |
| Визначення процесів теплового насичування при однопрохідному зварюванні пластин .....                                          | 21 |
| Розрахунок термічного циклу в періоди теплонасичування та вирівнювання при однопрохідному зварюванні пластин .....             | 22 |
| Розрахунок термічних циклів, максимальних температур та швидкості охолодження для потужних швидкокоруючих джерел нагріву ..... | 24 |
| Оцінка структурних змін в зварних з'єднаннях низьколегованих сталей за даними розрахунків теплових процесів .....              | 28 |
| Рекомендуєма та використана література .....                                                                                   | 34 |
| Додаток 1 .....                                                                                                                | 35 |
| Додаток 2 .....                                                                                                                | 38 |
| Додаток 3 .....                                                                                                                | 51 |