



**М.Я. Бєлкін, В.К. Заблоцький, О.Я. Шашко**

**РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ  
ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ  
СТАЛЕВИХ ВИРОБІВ**

**Краматорськ 2002**

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ДОНБАСЬКА ДЕРЖАВНА МАШИНОБУДІВНА АКАДЕМІЯ**

**М.Я. Бєлкін, В.К. Заблоцький, О.Я. Шашко**

**РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ**  
**ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ СТАЛЕВИХ ВИРОБІВ**

Рекомендовано

Міністерством освіти і науки України  
як навчальний посібник для розробки технології  
термічної обробки сталевих виробів при виконанні  
контрольованої самостійної роботи за курсом (розділом)  
*“ТЕРМІЧНА ОБРОБКА МЕТАЛІВ”*  
студентами спеціальностей 7.090404 *«Обробка металів*  
*тиском»* і 7.090403 *«Ливарне виробництво чорних і*  
*кольорових металів”*

Перезатверджено на засіданні  
кафедри ТОЛВ  
Протокол №2 від 28.08.2012

Краматорськ 2002

ББК 34.651  
УДК 669.017  
Б-43

Рецензенти:

Антонов В.В., к. т. н., м. Краматорськ, КНВП “Термік”

Алієв І.С., д. т. н., м. Краматорськ, ДДМА, кафедра обробки металів тиском

М.Я. Белкін, В.К. Заблоцький, О.Я. Шашко

Б-43 Навчальний посібник для розробки технології термічної обробки сталевих виробів при виконанні контрольованої самостійної роботи за курсом (розділом) “Термічна обробка металів” студентами спеціальностей 7.090407 “Обробка металів тиском” і 7.090405 “Ливарне виробництво чорних і кольорових металів”. – Краматорськ: ДДМА, 2005. - 104 с.

ISBN 5-7763-1210-8

Приведені основні теоретичні відомості щодо технології термічної обробки сталей, нагрівання тонких та масивних тіл. На конкретних прикладах показані методики розрахунків режимів термічної обробки.

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України

Лист № 14/18.2-1048 від 17.05.2002

ISBN 5-7763-1210-8

©

М.Я.Белкін, проф.  
В.К.Заблоцький, проф.  
О.Я.Шашко, доц.

# 1 ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Заключним етапом вивчення студентами курсу “Термічна обробка металів” є розробка технології термічної обробки для конкретної деталі. Ця розробка включає вибір виду термічної обробки з метою отримання заданих властивостей. При виборі виду термічної обробки виробу виходять з вказівок про спосіб його виготовлення та вимог, яким повинен задовольняти виріб для забезпечення надійної експлуатації.

Вимоги, які пред’являють до металевих деталей, дуже різноманітні. Залежно від них металеві деталі можна розбити на три основні групи.

*Першу групу* складають деталі машин і конструкцій, які виготовляють із матеріалів, для яких визначаючими є механічні властивості (частіше поєднання властивостей міцності, пластичності і в’язкості). Для цих деталей використовують конструкційні сталі.

До *другої групи* відносяться деталі, основними властивостями яких є особливі фізичні властивості (магнітні, електричні, опір корозії та інші). Від цих деталей вимагається звичайно певний рівень механічних властивостей. Для виготовлення деталей цієї групи використовують, як правило, конструкційні сталі, а спеціальні властивості отримують змінюванням їх структури внаслідок легування, термообробки, хіміко-термічної обробки.

*Третю групу* складають різного роду інструменти (ріжучі, вимірювальні, деформуючі). Деталі цієї групи виготовляють з інструментальних сталей. Основними, визначаючими характеристиками їх є висока твердість, зносостійкість, а для ряду інструментів – тепло- і червоностійкість (зберігання твердості при підвищених температурах).

## 2 ОСНОВНІ ЕТАПИ ТЕХНОЛОГІЇ ТЕРМООБРОБКИ ТА ПРИНЦИПИ ЇХ ПРИЗНАЧЕННЯ

Будь-який вид термообробки складається з трьох основних етапів:

- нагрівання виробу до визначеної температури;
- видержка при заданій температурі;
- охолодження з визначеною швидкістю.



## 2.1 Нагрівання при зовнішньому джерелі тепла

У переважній кількості випадків нагрівання виробів здійснюється у нагрівальних пічах. При нагріванні основним фактором є тривалість. При розрахунку тривалості нагрівання, видержки і охолодження найважливішим фактором є форма виробу, що нагрівається. На основі практичного досвіду рекомендовані розрахункові розміри перерізів, які приведені у табл.1.

Визначення розрахункового розміру виробу та його форми (пластина і циліндр) є першим етапом у розробці режимів нагрівання.

При одномірному тепловому полі, яке має місце в пічах для нагрівання, для розрахунку тривалості нагрівання використовують такі формули:

- **критерій Біо:**

- для пластини товщиною  $2S$ , м,  $Bi = \frac{\alpha S}{\lambda}$ ; (1)

- для циліндра радіусом  $R$ , м,  $Bi = \frac{\alpha R}{\lambda}$ ; (2)

- **критерій Фур'є:**

- для плити товщиною  $2S$ , м,  $Fo = \frac{a\tau}{S^2}$ ; (3)

- для циліндра радіусом  $R$ , м,  $Fo = \frac{a\tau}{R^2}$ ; (4)

- **температурний критерій**

$$\theta = \frac{t_c - t}{t_c - t_{м.поч}}, \quad (5)$$

де  $t_c$  - температура середовища, °C;

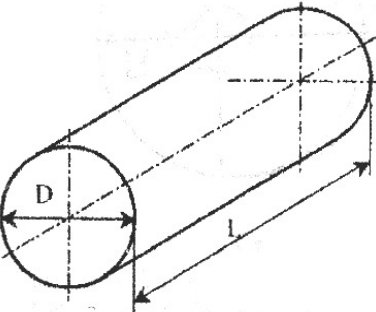
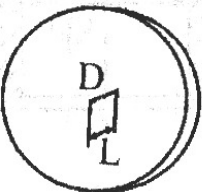
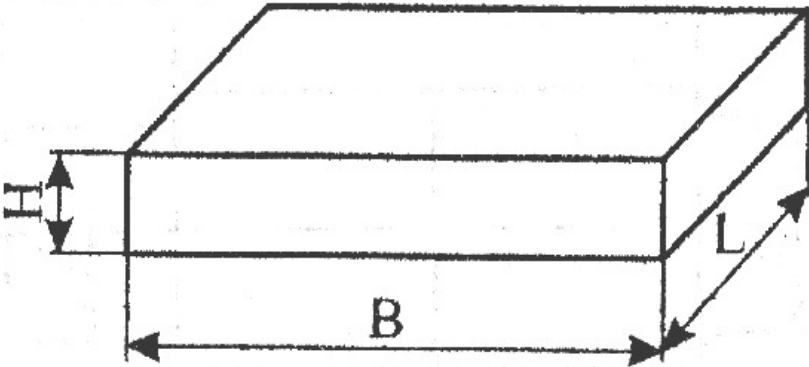
$t$  - поточна температура нагріву тіла, °C;

$t_{м.поч}$  - початкова температура нагрівання металу, °C;

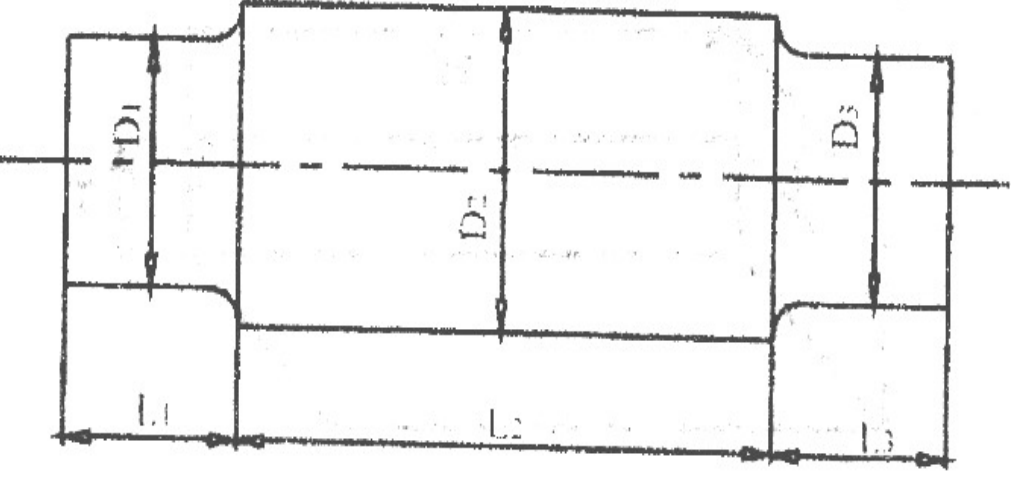
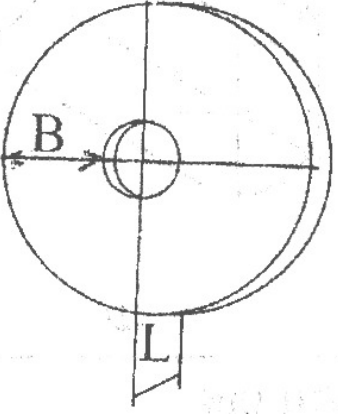
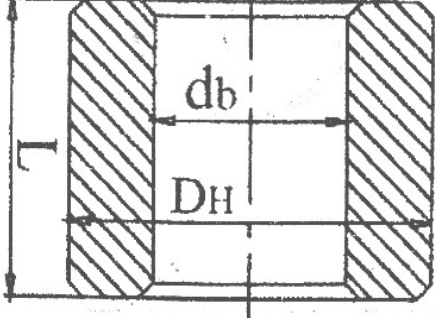
$\alpha$  - коефіцієнт тепловіддачі,  $\frac{Вт}{м^2 \cdot К} \left( \frac{Дж}{м^2 \cdot К \cdot с} \right)$ ;

$\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності,  $\frac{Вт}{м \cdot К}$ ;

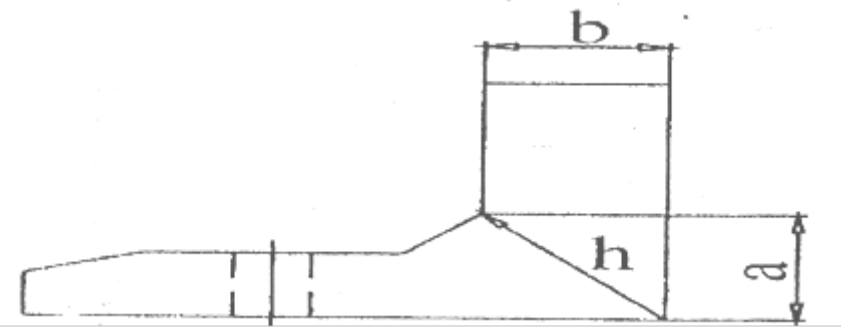
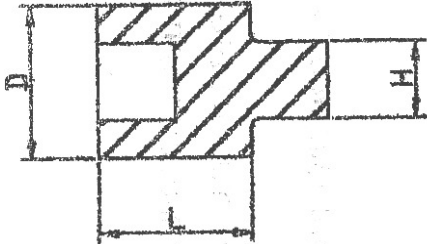
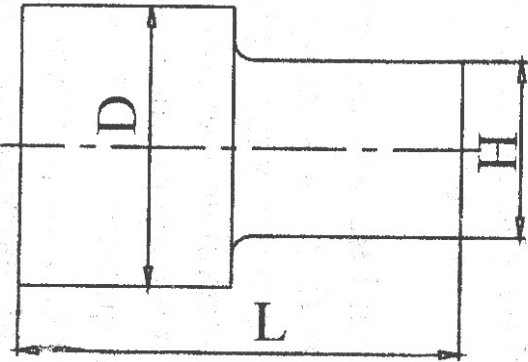
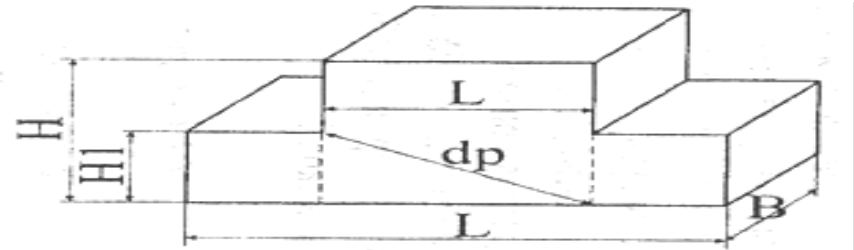
Таблиця 1 – Розрахункові розміри перерізів для призначення всіх етапів технології термічної обробки

Конфігурація деталей (заготовок), які піддаються обробці	Умови розрахунку	Розрахунковий розмір перерізу
<p>1</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> <p><i>a</i></p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p><i>б</i></p>  </div> </div>	<p>Вали і диски  <math>a - L \geq D</math>;  <math>б - L &lt; D</math></p>	<p><math>d_{розр} = D</math>;  <math>d_{розр} = L</math></p>
<p>2</p> 	<p>Гладкі пластини, штанги, рейки</p>	<p>За найменшим розміром  <math>d_{розр} = H</math></p>

Продовження таблиці 1

<p>3</p> 	<p>Вали з уступами, вал-шестерні</p> <p>а - <math>L_2 \geq 0,5 D_2</math></p> <p>б - <math>L_2 &lt; 0,5 D_2</math></p>	$d_{розр} = D_2$ $d_{розр} = \sqrt{L_2^2 + D_1^2}$
<p>4</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>а</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>б</p>  </div> </div>	<p>Труби, бандажі, бочки, шестерні</p> <p>а - <math>L \leq 2B</math>,</p> <p>б - <math>L &gt; 2B</math></p>	$d_{розр} = L ;$ $d_{розр} = 2\epsilon = D_{\text{н}} - d_{\text{вн}}$

Продовження таблиці 1

<p>5</p> 	<p>Деталі типу важеля</p>	$d_{розр} = h = \sqrt{a^2 + e^2}$
<p><i>a</i></p>  <p><i>б</i></p> 	<p>Напівмуфти, муфти <math>L &gt; D &gt; H</math></p>	<p><math>a - d_{розр} = 0,5D ;</math>  <math>б - d_{розр} = D</math></p>
<p>7</p> 	<p>Пластини з уступами  <math>a - B \leq H ;</math>  <math>б - L_1 \geq 0,5H ;</math>  <math>в - L_1 &lt; 0,5H</math></p>	<p><math>d_{розр} = e ;</math>  <math>d_{розр} = H ;</math>  <math>d_{розр} = \sqrt{L_1^2 + H_1^2}</math></p>

$a$  - коефіцієнт температуропровідності,  $m^2/c$ ,

$$a = \frac{\lambda}{c\rho}, \quad (6)$$

де  $c$  - теплоємність,  $\frac{Дж}{кг \cdot K}$ ;

$\rho$  - густина,  $кг/м^3$ ;

$\tau$  - час нагрівання,  $год$ .

Числові значення всіх теплотехнічних величин ( $\alpha, \lambda, a, c, \rho$ ) визначають за довідниковими даними (див. додатки № А - Г).

Методика розрахунку тривалості нагрівання і формули, які використовуються, залежать від того, масивним чи тонким є виріб, що нагрівається. До тонких відносяться тіла з малим діаметром або товщиною. У цьому випадку, при високому коефіцієнті теплопровідності металу, внутрішній тепловий опір дуже малий і перепадом температури за перерізом тіла можна знехтувати. У цьому випадку нагрівання буде залежати тільки від зовнішньої тепловіддачі.

Якщо внутрішній тепловий опір грає істотну роль, що має місце при значній величині діаметра циліндра або товщини стінки, то в цьому випадку в процесі нагрівання тіла виникає значний температурний перепад між поверхнею і центром тіла. Такі тіла називають масивними.

Різницю між тонкими і масивними тілами визначають на основі розрахунку критерію Біо (***Bi***). За умовну межу нагрівання тонких і масивних тіл приймають значення критерію ***Bi* = 0,25**. Коли ***Bi* ≥ 0,25**, тіла ведуть себе при нагріванні як масивні, а при ***Bi* < 0,25** – як тонкі.

Отже, аналіз задачі по нагріванню твердого тіла починають з визначення критерію ***Bi*** за формулами (1) або (2) відповідно для пластини товщиною ***2S*** або циліндра радіусом ***R***. ***S*** і ***R*** визначають, виходячи з форми виробу, який нагрівається, використовуючи дані, наведені в табл.1.

### ***2.1.1 Розрахунок тривалості нагрівання тонких тіл***

Час нагрівання тонких тіл, згідно з законом Ньютона-Ріхмана та з врахуванням необхідних математичних перетворень, визначають за такою формулою:

$$\tau = \frac{Gc}{\alpha F} \ln \left[ \frac{(t_c - t_{м.поч})}{(t_c - t_{м.кін})} \right], \quad (7)$$

де  $c$  - теплоємність,  $\frac{кДж}{кг \cdot K}$ ;

$G$  – маса, кг ;

$\alpha$  - коефіцієнт тепловіддачі,  $\frac{Вт}{м^2 \cdot K}$ ;

$F$  – активна поверхня, яка сприймає тепло,  $м^2$ ;

$t_c$  – температура середовища,  $^{\circ}C$ ;

$t_{м.поч}$  - початкова температура металу,  $^{\circ}C$ ;

$t_{м.кін}$  - кінцева температура металу,  $^{\circ}C$ .

### Приклад 1

Визначити час нагрівання для гартування листа ресори товщиною 15 мм з розмірами 100x15x900 мм. Матеріал: сталь 55С2.

### Рішення

1 Для сталі 55С2  $A_{сз} = 820^{\circ}C$ . Температура нагрівання  $t = 820^{\circ} + 40^{\circ} = 860^{\circ}C$ .

2 Приймаємо завантаження в піч з температурою  $t_c = 870^{\circ}C$ .

3 Початкова температура металу  $t_{м.поч} = 20^{\circ}C$ .

4 Визначаємо критерій Біо за формулою (1):

$$Bi = \frac{\alpha \cdot S}{\lambda}, \quad S = \frac{0,015}{2} = 0,0075 \text{ м.}$$

За довідниковими даними (додаток А) середній коефіцієнт тепловіддачі за цикл нагрівання  $\alpha = 180 \frac{Вт}{м^2 \cdot K}$ .

Коефіцієнт теплопровідності за довідниковими даними

$$\text{(додаток Б)} \quad \lambda = 32,6 \frac{Вт}{м \cdot K}; \quad Bi = \frac{180 \cdot 0,0075}{32,6} = 0,041.$$

Тіло тонке, тому що  $Bi < 0,25$ .

5 Визначаємо масу пластини за довідниковими даними

$$\text{(додаток Г)}, \text{ густота } \rho = 7830 \frac{кг}{м^3},$$

$$G = 7830 \cdot 0,9 \cdot 0,1 \cdot 0,015 = 10,6 \text{ кг.}$$

6 Визначаємо активну поверхню, яка сприймає тепло, якщо пластина розміщена плазом на поді печі:

$$F = 0,9 \cdot 0,1 + 0,9 \cdot 0,015 \cdot 2 + 0,1 \cdot 0,015 \cdot 2 = 0,12 \text{ м}^2.$$

Питома теплоємність  $c = 695 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$  (додаток В).

7 Час нагрівання дорівнює за формулою (7)

$$\tau = \frac{10,6 \cdot 695}{180 \cdot 0,12} \ln \left( \frac{870 - 25}{870 - 860} \right) = 1513 \text{ с} = 25 \text{ хв.}$$

### 2.1.2 Розрахунок тривалості нагрівання масивних тіл

Нагрівання масивних тіл у середовищі з постійною температурою виконують за наступним алгоритмом:

1 Визначають критерій Біо за формулою (1) або (2) і переконуються, що дане тіло, яке нагрівається, масивне ( $Bi \geq 0,25$ ).

2 Знаходять температурний критерій  $\theta$  за формулою (5).

Теплотехнічні характеристики сталі: коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$ , коефіцієнт теплопровідності  $\lambda$ , коефіцієнт температуропровідності  $a$ , питома вага  $\rho$ , теплоємність  $c$  визначають за довідниковими таблицями (див. додатки А, Б, В, Г).

Знаючи два критерії нагрівання ( $Bi$  і  $\theta$ ), третій критерій – Фур'є - знаходять за графіками, розробленими Д.В.Будріним [3]. Графіки приведені у додатках Ж і К для поверхні та осі циліндра і у додатках Д і Е для поверхні та центру пластини відповідно. На приведених графіках на осі абсцис відкладено значення критерію Фур'є ( $Fo = \frac{a\tau}{R^2}$

або  $Fo = \frac{a\tau}{S^2}$ ) у логарифмічній системі координат, а на осі ординат – температурний критерій  $\theta$  (відносна температура), який являє собою відношення поточної різниці температури даної точки і навколишнього середовища до цієї ж різниці перед початком нагрівання [див. формулу (5)].

Прямі лінії на графіках Д.В.Будріна, які міняють свій напрямок, відносяться до різних значень критерію  $Bi$ . Проміжні значення критерію  $Bi$ , які не помічені на графіку, визначають інтерполяцією. За значеннями критеріїв  $Bi$  і  $\theta$  на графіку визначають критерій Фур'є ( $Fo$ ).

4 За значенням критерію Фур'є розраховують час нагрівання  $\tau$ , с, за формулою

$$\tau = \frac{Fo \cdot R^2}{a} \quad (\text{для циліндра}), \quad (8)$$

$$\tau = \frac{Fo \cdot S^2}{a} \quad (\text{для пластини}). \quad (9)$$

Коефіцієнт теплопровідності  $a$  визначають за довідниковими даними (див. додаток Б або В).

### Приклад 2

Визначити час нагрівання валу діаметром 300 мм із сталі 40ХН при завантаженні виробу від температури цеху в піч, яка нагріта до температури гартування.

### Рішення

1 Визначаємо температуру гартування  $t_r = A_{c3} + (20...40)^\circ\text{C}$ .  
Для сталі 40ХН  $A_{c3} = 780^\circ\text{C}$ .

$$t_r = 780^\circ\text{C} + 40^\circ\text{C} = 820^\circ\text{C}.$$

Приймаємо температуру печі  $t_c = 830^\circ\text{C}$ .

2 Визначаємо критерій  $Bi$  за формулою (2):  $Bi = \frac{\alpha R}{\lambda}$ ;

$$R = 0,15.$$

За таблицею додатку А визначаємо середній коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha = 180 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ ; за таблицею додатку Б визначаємо  $\lambda = 27,2 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$   $Bi = \frac{180 \cdot 0,15}{27,2} = 0,99$ , отже вал, який нагрівається, - тіло масивне ( $Bi > 0,25$ ).

3 Визначаємо температурний критерій за формулою (5):

$$\theta = \frac{t_c - t_r}{t_c - t_{\text{м.поч}}} = \frac{830 - 820}{830 - 20} = 0,012.$$

4 За номограмою додатку К за критеріями  $Bi = 0,99$  і  $\theta = 0,012$  визначаємо критерій Фур'є  $Fo = 2,6$ .

5 Час нагрівання складе за формулою (4):

$$\tau = \frac{Fo R^2}{a} = \frac{2,6 \cdot 0,15^2}{5,83 \cdot 10^{-6}} = 1003 \text{ с} = 2,78 \text{ год} \approx 3 \text{ год}.$$



Коефіцієнт температуропровідності вибираємо за таблицею додатку Б,  $a = 5,83 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ .

## 2.2 Визначення тривалості видержки при аустенітизації

При досягненні поверхнею виробу, який нагрівається, заданої температури (див. методику розрахунку за п.2.1) необхідна видержка з метою вирівнювання температури виробу за перерізом, а також для завершення фазових перетворень. Видержка вважається закінченою, коли різниця температур між поверхнею і центром виробу не перевищує  $5 \dots 10 \text{ }^\circ\text{C}$ .

При нагріванні тіл перепадом температур можна знехтувати (див. п.2.1), і тоді видержка необхідна тільки для завершення фазових перетворень. З достатньою для практики точністю тривалість видержки приймають рівною  $1/3$  від тривалості нагрівання.

При розрахунку нагрівання масивних тіл тривалість видержки можна визначити за тією ж методикою, що і визначення тривалості нагрівання поверхні. Різниця тільки у тому, що визначають температурний критерій центра виробу за формул

$$\theta = \frac{t_c - t_{\text{ц}}}{t_c - t_{\text{м.поч}}}, \quad (10)$$

де  $t_{\text{ц}}$  – температура центра,  $^\circ\text{C}$ .

Критерій  $F_0$  визначають за критеріями  $Bi$  і  $\theta$  за графіком (див. додатки Е та Ж) для центра. Від вирахованого часу віднімають час на нагрівання поверхні. Отриману різницю збільшують на  $30 \dots 40\%$  для забезпечення завершення фазових перетворень.

Але і у випадку нагрівання масивних тіл, з достатньою для практики точністю, можна тривалість видержки при нагріванні масивних тіл прийняти рівною  $1/3$  часу нагрівання.

### Приклад 3

Визначити час, який необхідно для нагрівання центра вала діаметром 300 мм із сталі 40ХН до температури, яка забезпечує виконання гартування.

### Рішення

Для сталі 40ХН  $A_{c3} = 780 \text{ }^\circ\text{C}$ , отже температура гартування для поверхні  $t_2 = 780 + 40 = 820 \text{ }^\circ\text{C}$ . Приймаємо температуру печі

$t_c = 830\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а температуру центра  $t_u = 875\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Критерій Біо 
$$Bi = \frac{\alpha \cdot R}{\lambda} = \frac{180 \cdot 0,15}{27,2} = 0,99 \quad (\text{див. приклад 2})$$

розд.2.1.2).

Температурний критерій центра визначаємо за формулою (10):

$$Q_u = \frac{t_c - t_{\text{ц}}}{t_c - t_{\text{м.поч}}} = \frac{830 - 815}{830 - 20} = 0,019.$$

За графіком (див. додаток Ж) визначаємо критерій  $Fo$ , знаючи  $Bi = 0,99$  та  $\theta = 0,019$  для центра циліндра.  $Fo = 2,8$ .

$$\tau = \frac{FoR^2}{a} = \frac{2,8 \cdot 0,15^2}{5,83 \cdot 10^{-6}} = 10806 \text{ с} = 3 \text{ год}.$$

Час на прогрівання  $3,0 - 2,78 = 0,22 \text{ год}$  або 13 хв. Збільшимо на 40% і одержимо тривалість видержки

$$\tau_{\text{вид}} = 0,22 \cdot 1,4 = 0,3 \text{ год} \approx 20 \text{ хв}.$$

Практично можна прийняти час видержки  $\tau_{\text{вид}} = \frac{1}{3} \tau_{\text{нагр}} = 1 \text{ год}.$

### **2.3 Визначення умов охолодження при виконанні термообробки**

Охолодження виробів від температури аустенітизації є найважливішим етапом будь-якого виду термічної обробки, оскільки саме при охолодженні формуються кінцева структура і властивості сталевих виробів. Структура визначається тією температурою, при якій структура утворилася. Через це, визначаючи умови охолодження, тим самим визначають температуру, при якій виникає кінцева структура сталі при даному виді термообробки. По суті вид термообробки і визначається, в основному, швидкістю охолодження сталі від температури аустенітизації. При відпалу сталь з температури аустенітизації охолоджують повільно, практично разом з піччю, що обумовлює розпадання переохолодженого аустеніту у верхньому перлітному діапазоні температур перетворень.

Нормалізація передбачає охолодження сталі з температур аустенітизації на спокійному повітрі, тобто трохи швидше, ніж при відпалу. Це визиває переохолодження аустеніту до більш низьких температур.

Перетворення його закінчується у нижньому перлітному інтервалі, тобто з утворенням сорбітних або навіть трооститних структур.

Гартування передбачає отримання мартенситної структури. Через це охолодження ведуть зі швидкістю більшою за критичну швидкість гартування. Практично при гартуванні охолодження виробів проводять у різних середовищах, частіше всього у воді (вуглецеві сталі) або у мінеральному маслі (леговані сталі).

Таким чином, визначивши вид необхідної термообробки, виходячи з необхідності отримання у виробі потрібних механічних властивостей та структури, встановлюють тим самим і умови охолодження.

Проте у практичних розрахунках технології треба вказувати числові значення параметрів охолодження. Для цього використовують діаграми ізотермічного розпаду переохолодженого аустеніту конкретної сталі, з якої виготовлено даний виріб, з врахуванням практичних даних.

Нижче розглядаються підходи для розрахунку необхідних швидкостей охолодження.

### ***2.3.1 Розрахунок швидкості охолодження при проведенні відпалу і нормалізації***

Орієнтовно швидкість охолодження при відпалі можна визначити, використовуючи діаграму ізотермічного розпаду переохолодженого аустеніту. Для цього необхідно визначити найвищу температуру завершення перлітного перетворення.

Абсциса точки перетину цієї ізотерми з лінією кінця дифузійного перетворення аустеніту буде характеризувати час завершення розпаду аустеніту  $\tau_p$ , а різниця між температурою нагрівання і вибраною температурою розпаду буде характеризувати відповідне зниження температури  $t_p$ . Потрібна швидкість охолодження обчислюється орієнтовно за формулою

$$V = \frac{t_n - t_p}{\tau_p}, \text{ } ^\circ\text{C}/\text{год}. \quad (11)$$

### ***Приклад 4***

Визначити необхідну швидкість охолодження при відпалі сталі 45Х, для якої діаграма ізотермічного розпаду аустеніту приведена на рис.1.

### ***Рішення***

Вибираємо температуру розпаду аустеніту при відпалі 700 °C. В результаті повинна утворитись структура, яка складається з фериту і перліту з твердістю 19...20 HRC.

Абсциса точки перетину ізотерми 700 °C з кривою кінця розпаду переохолодженого аустеніту  $\tau_p = 8000 \text{ с} = 2,3 \text{ год}$ .

Температура нагрівання при відпалі

$$t_{відп} = A_{c3} + (20...40) ^\circ\text{C} = 790 + 40 = 830 ^\circ\text{C}.$$

Швидкість охолодження складе за формулою (11)

$$V_{відп} = \frac{830 - 700}{2,3} = 56 ^\circ\text{C/год}.$$

Практично при відпалі сталі охолоджують з швидкістю 50...60 °C/год.

### ***Приклад 2***

Визначити орієнтовно швидкість охолодження при нормалізації сталі 45X.

При нормалізації розпад аустеніту пройде при більш низькій температурі, наприклад 680 °C, за час, рівний 1800 с = 0,5 години. Тоді швидкість охолодження складе за формулою (11)

$$V_{норм} = \frac{830 - 680}{0,5} = 300 ^\circ\text{C/год}.$$

При практичних розрахунках можна приймати швидкість охолодження при нормалізації в межах 250-300 °C/год.

### ***2.3.2 Розрахунок швидкості охолодження при гартуванні***

Гартування частіше всього проводять на мартенсит, тому охолодження повинно проводитись зі швидкостями, які вище верхньої критичної швидкості гартування  $V_{кр}$ . Разом з тим швидкість охолодження повинна бути як можна меншою для запобігання виникнення внутрішніх напружень. Практично швидкість охолодження при гартуванні зводиться до вибору середовища для охолодження.

В табл.2 приведені швидкості охолодження різних охолоджувачів у двох температурних інтервалах: у перлітно-трооститному (650...550 °C) і мартенситному (300...200 °C).

Для визначення доцільного середовища для гартування використовують діаграму ізотермічного розпаду аустеніту даної сталі, ви-

значають температуру  $t^*$  і час  $\tau^*$  мінімальної стійкості переохолодженого аустеніту. Верхню критичну швидкість гартування  $V_{кр}$ ,  $^{\circ}\text{C}/\text{с}$ , визначають за формулою

$$V_{кр} = \frac{t_{г} - t^*}{\tau^*}, \quad (12)$$

де  $t_{г}$  – температура гартування;

$t^*$  – температура мінімальної стійкості переохолодженого аустеніту,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\tau^*$  – час мінімальної стійкості переохолодженого аустеніту, с.

За розрахованою  $V_{кр}$  підбирають середовище для охолодження, яке охолоджує зі швидкістю, більшою від розрахованої за формулою (12), але близькою до неї у діапазоні 650...550  $^{\circ}\text{C}$ , користуючись табл.2.

Таблиця 2

Назва охолоджуючого середовища	Швидкість охолодження у діапазоні, $^{\circ}\text{C}/\text{с}$	
	650...550	300...200
Вода при температурі, $^{\circ}\text{C}$ : 18	600	270
30	500	270
50	100	170
75	30	200
Вода + 10% NaOH	1200	300
Вода + 10% NaCl	1100	300
Вода + 10% Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	800	270
Вода + 5% KMnO <sub>4</sub>	450	100
Мінеральне масло	100...150	20...50
Мінеральне машинне масло	100	18...15
Трансформаторне масло	120	25
Мідні плити	60	30
Залізні плити	35	25
Стиснене повітря	30	10
Керосин	160...180	40...60

### Приклад 5

Призначте середовище для охолодження при гартуванні виробу із сталі 45X, використовуючи діаграму ізотермічного розпаду аустеніту цієї сталі (рис. 1).

Марка сталі	Температури критичних точок, °C			
	$A_1$	$A_3$	$A_{cm}$	$M_H$
45X	735	790		340

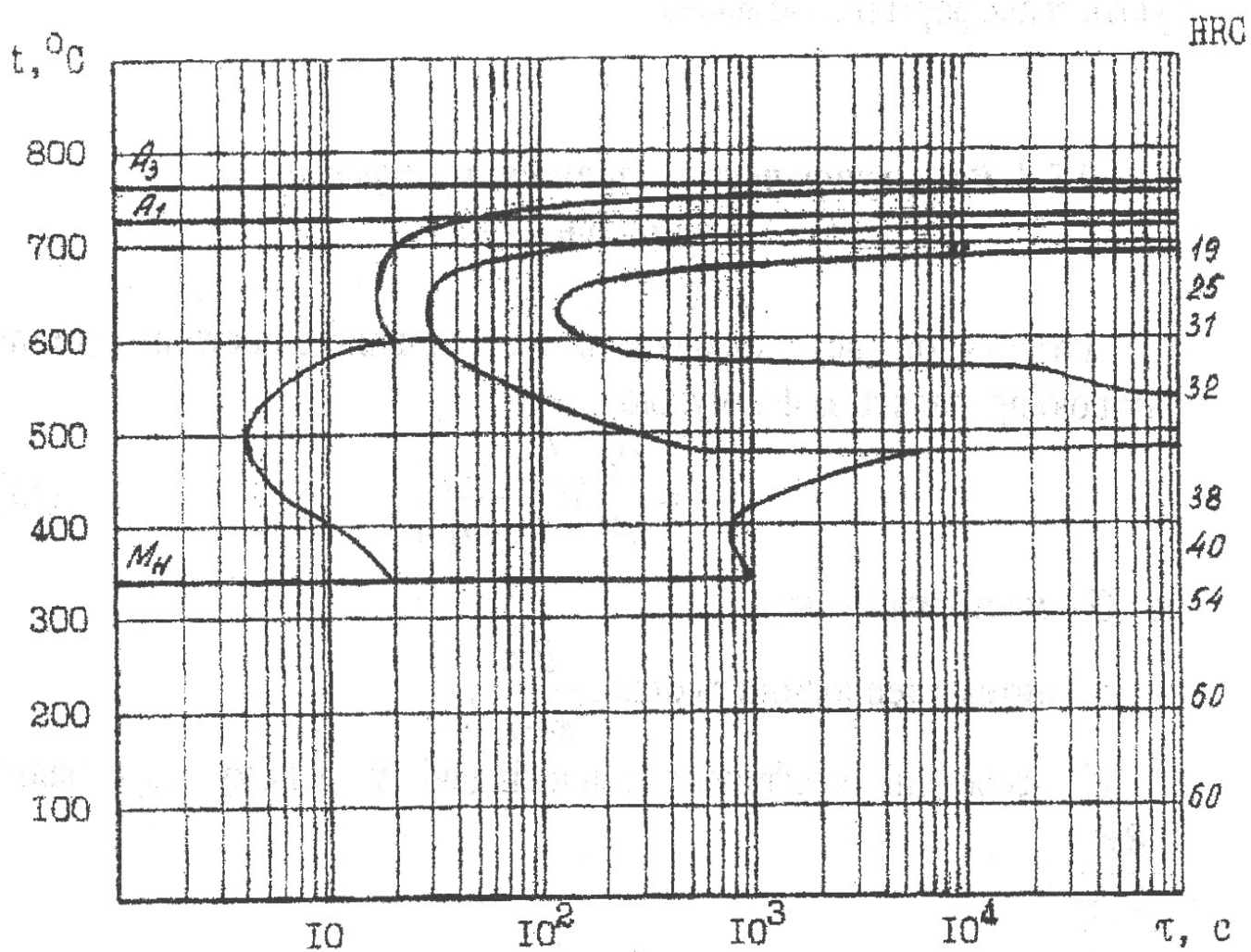


Рисунок 1 – Діаграма ізотермічного розпаду аустеніту сталі 45X

### ***Рішення***

Температура мінімальної стійкості аустеніту сталі 45Х (рис. 1)  $t^* = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Час мінімальної стійкості переохолодженого аустеніту цієї сталі  $\tau^* = 4,0\text{ с}$ .

$$t_r = A_{c3} + (20 \dots 40)^{\circ}\text{C} = 790 + 30 = 820\text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Температура нагрівання  $t_z = 820^{\circ}\text{C}$ .  $V_{кр} = \frac{820 - 500}{3,9} = 80\text{ }^{\circ}\text{C/с}$ .

Доцільним середовищем для гартування (див. табл.2) може бути мінеральне масло. Але у термічних цехах частіше всього використовують трансформаторне масло.

### ***2.3.3 Розрахунок часу охолодження у середовищі при гартуванні***

Розрахунок часу охолодження у середовищі з постійною температурою проводять за формулою

$$\tau = \frac{Gc}{\alpha F} \ln \left( \frac{t_c - t_n}{t_c - t_k} \right), \quad (13)$$

де  $G$  – маса виробу, кг;

$c$  – питома теплоємність сталі,  $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$ ;

$\alpha$  – середній коефіцієнт тепловіддачі у даному середовищі,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{K}}$ ;

$F$  – активна поверхня виробу,  $\text{м}^2$ ;

$t_c$  – температура середовища,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_n$  – початкова температура виробу,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_k$  – кінцева температура виробу,  $^{\circ}\text{C}$ .

Час охолодження у середовищі для гартування можна призначити, з достатньою для практики точністю, і за табл.3.

Таблиця 3 – Практичні дані про час охолодження у середовищах для гартування

Середовище для охолодження	Час видержки у хвилинах при розрахунковому перетині, мм				
	до 200	201...400	401...600	601...800	801...1000
Мінеральне (трансформаторне) масло	30...90	91...120	121...150	151...200	201...280
Вода	10...20	21...30	31...40	41...50	51...60
Вода – масло, в т.ч. у воді у маслі	1...2 20...50	2...3 70...100	3...4 101...130	4...5 131...150	5...6 181...220

### Приклад 6

Визначити час охолодження вала діаметром 300 мм, довжиною 200 мм із сталі 40ХН при гартуванні у маслі.

Приймаємо:

$$t_c = 30^\circ\text{C}; t_n = 830^\circ\text{C}; t_k = 100^\circ\text{C}.$$

$$F = 2\pi RL + 2\frac{\pi D^2}{4} = \pi DL + 2\frac{\pi D^2}{4} = 3,14 \cdot 0,3 \cdot 2 + 2\frac{3,14 \cdot 0,3^2}{4} = 2,02 \text{ м}^2.$$

$$\text{Маса вала } G = \frac{\pi D^2}{4} L \cdot 7830 = \frac{3,14 \cdot 0,3^2}{4} 2 \cdot 7830 = 1106 \text{ кг}.$$

За таблицями додатків А і Б визначаємо теплотехнічні коефіцієнти:

$$c = 692 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \text{ (табл. додатку Б);}$$

$$\alpha = 400 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \text{ (табл. додатку А).}$$

$$\tau = \frac{1106 \cdot 695}{400 \cdot 2,02} \ell_{\text{II}} \frac{20 - 830}{20 - 100} = 2202 \text{ с} = 0,6 \text{ год}.$$



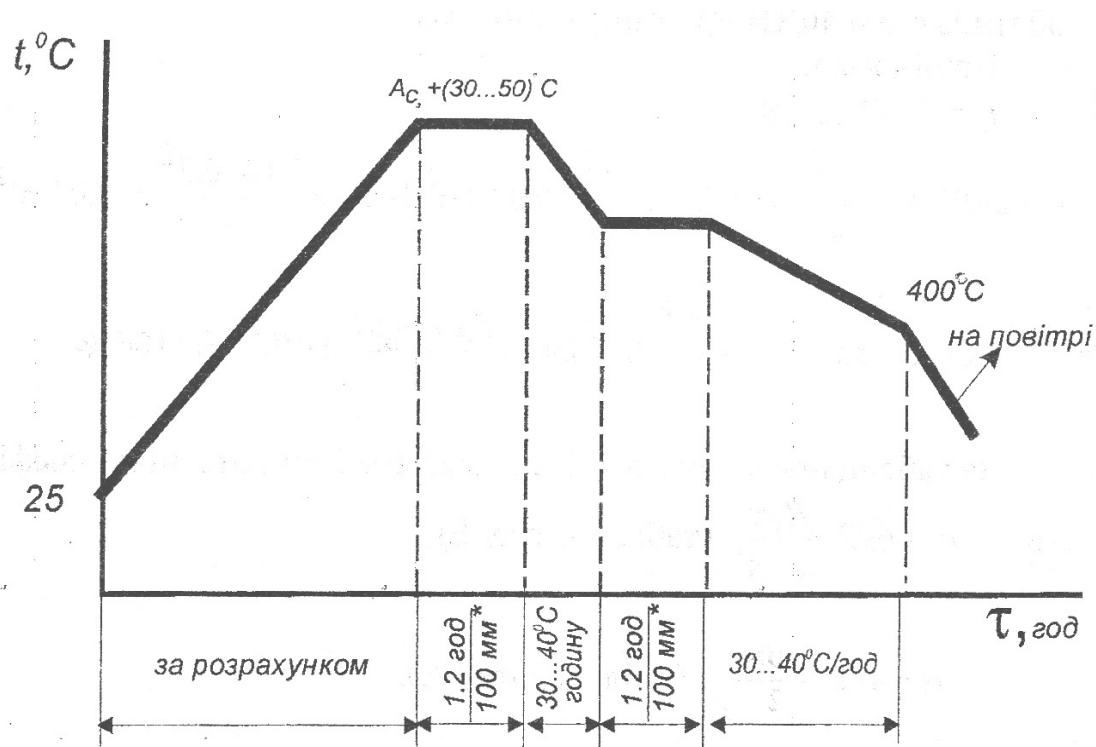
### 3 ПРАКТИЧНІ ПРИЙОМИ РОЗРОБЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ВИРОБІВ ІЗ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ

#### 3.1 Технологія термічної обробки сталевого литва

В залежності від марки сталі, необхідних механічних властивостей і твердості відливки піддають відпалу, нормалізації з високим відпуском або гартуванню з відпуском.

##### 3.1.1 Відпал сталевого литва

Проводиться за технологією відповідно до графіка, який приведений на рис. 2.



100 мм\* - розрахунковий перетин

Рисунок 2 – Графік типової технології відпалу крупного сталюого лиття

### Приклад 7

Розробити технологію відпалу литої станини, яка складається із плоских елементів з найбільшою товщиною 200 мм, із сталі 35ХГСЛ-II.

#### Рішення

1 Точка  $A_{c3} = 805\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $t_{відп} = 805 + (30...50)\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

2 Визначаємо тривалість нагрівання. За табл.1 розрахунковий перетин  $S=200\text{ мм}$ . Критерій  $Bi = \frac{\alpha S}{\lambda}$ ;  $\alpha_{cp} = 180 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ ;  $\lambda = 26,7 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$

(за табл. додатків А і Б).  $Bi = \frac{180 \cdot 0,1}{26,7} = 0,67$ . Тіло масивне.

Температурний критерій  $\theta = \frac{t_c - t_{м.кін}}{t_c - t_{м.поч}} = \frac{865 - 855}{865 - 25} = 0,012$ .

Критерій Фур'є за графіком (додаток Д) для пластини ( $Bi=0,67$  і  $\theta=0,012$ )  $Fo = 7,8$ ;  $a = 5,83\text{ м}^2/\text{с}$  (за табл. додатку Б).

$\tau = \frac{Fo \cdot S^2}{a} = \frac{7,8 \cdot 0,1^2}{5,83 \cdot 10^{-6}} = 13379\text{ с} = 3,7\text{ год}$ , приймаємо 4 години.

3 Тривалість видержки  $\tau_{вид} = \frac{1,2 \cdot 200}{100} = 2,4\text{ год} \approx 2,5\text{ год}$ .

4 Тривалість охолодження до  $640\text{ }^{\circ}\text{C}$

$\tau_{охол} = \frac{855 - 640}{35} = 6,1\text{ год} \approx 6\text{ год}$ .

5 Тривалість видержки при температурі  $660...640\text{ }^{\circ}\text{C}$

$\tau_{вид} = 2,4\text{ год} \approx 2,5\text{ год}$ .

6 Тривалість охолодження від  $640$  до  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$

$\tau_{охол} = \frac{640 - 400}{35} = 6,7\text{ год} \approx 7\text{ год}$ .

7 Графік відпалу станини буде таким, як показано на рис. 3. Загальна тривалість відпалу станини  $\tau = 22\text{ год}$ .

#### 3.1.2 Нормалізація з відпуском сталевого литва

Проводиться згідно з графіком, що приведений на рис.4.

### Приклад 8

Розробити технологію нормалізації з відпуском станини, яка приведена у прикладі 7.

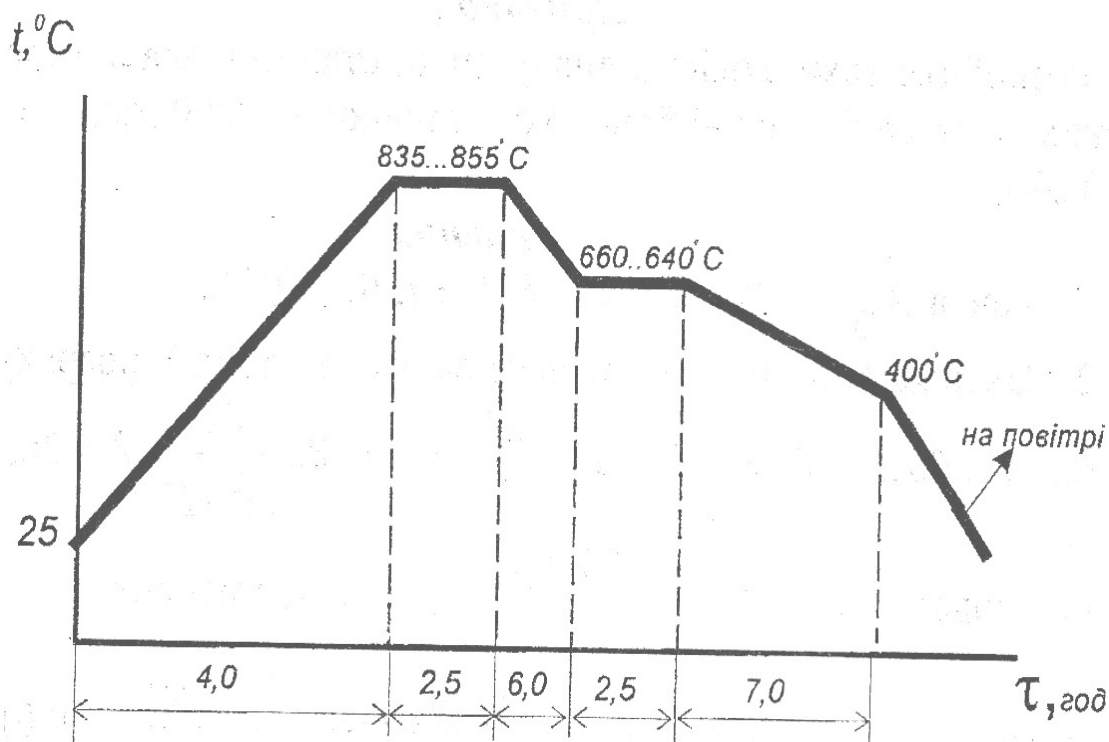
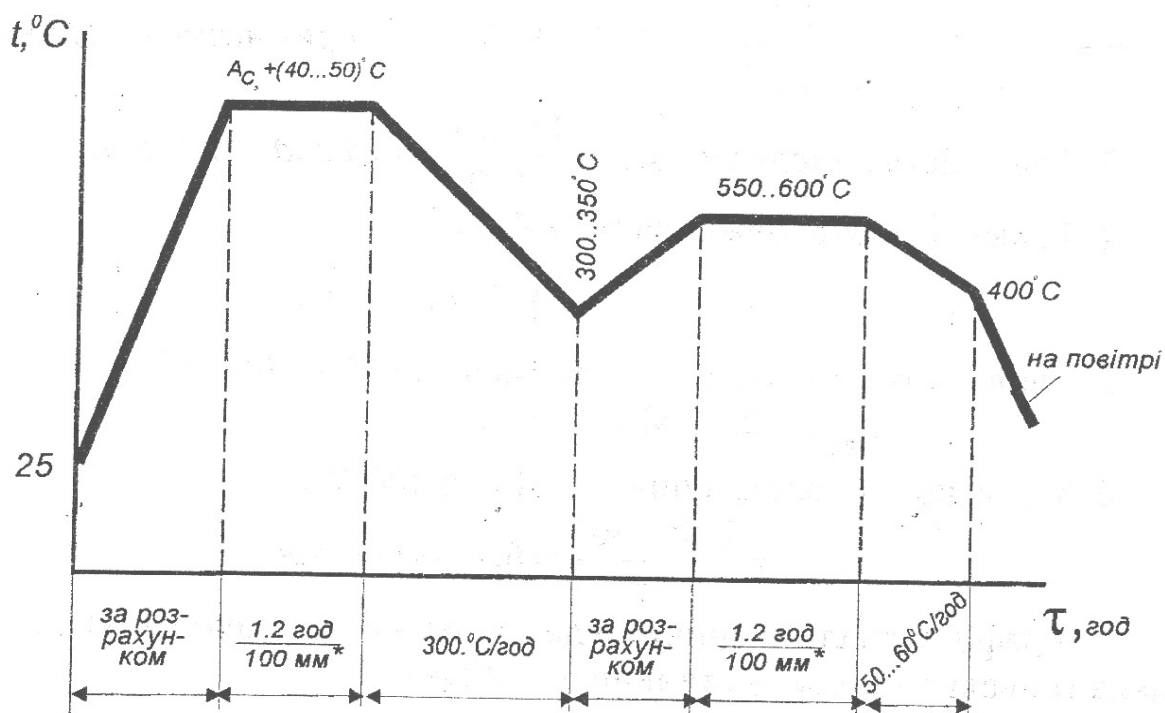


Рисунок 3 – Графік технології відпалу станини зі сталі 35ХГСЛ-II з товщиною стінки 200 мм



100 мм\* - розрахунковий перетин (див. табл.1)

Рисунок 4 – Графік типової технології нормалізації з відпуском сталевго литва

1 Температура нормалізації

$$t_n = A_{c3} + (40 \dots 50)^\circ\text{C} = 805 + (40 \dots 50) = 845 - 855^\circ\text{C}; t_{\text{нечі}} = 865^\circ\text{C}.$$

2 Тривалість нагрівання (див. розрахунок прикладу 1) складає 4 години.

3 Тривалість видержки (див. приклад 1)  $\tau_{\text{охол}} = 2,5 \text{ год.}$

4 Тривалість охолодження  $\tau_{\text{охол}} = \frac{855 - 325}{300} = 1,8 \text{ год} \approx 2 \text{ год.}$

5 Тривалість нагрівання до  $575^\circ\text{C}$ :

- температурний критерій  $\theta = \frac{t_c - t_{\text{м.кін}}}{t_c - t_{\text{м.поч}}} = \frac{575 - 550}{575 - 325} = 0,1.$

За графіком (додаток Д) і таблицею (додаток Б) критерій  $Fo = 3,5$ ;

$$a = 5,28 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}. \quad \tau = \frac{Fo S^2}{a} = \frac{3,5 \cdot 0,1^2}{5,28 \cdot 10^{-6}} = 6628 \text{ с} = 1,84 \text{ год} \approx 2 \text{ год.}$$

6 Тривалість видержки при відпуску  $\tau_{\text{вип}} = 4 \text{ год.}$

7 Тривалість охолодження від температури відпуску

$$\tau_{\text{охол}} = \frac{600 - 400}{50} = 4 \text{ год.}$$

8 Графік нормалізації з відпуском станини буде таким, як показано на рис. 5. Загальна тривалість нормалізації з відпуском станини складає 18,5. год.

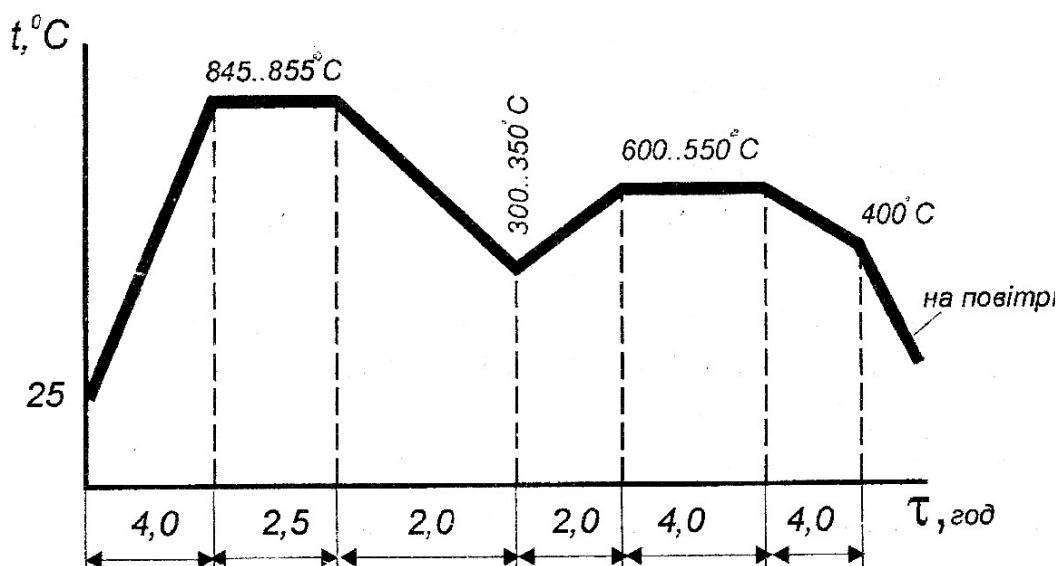
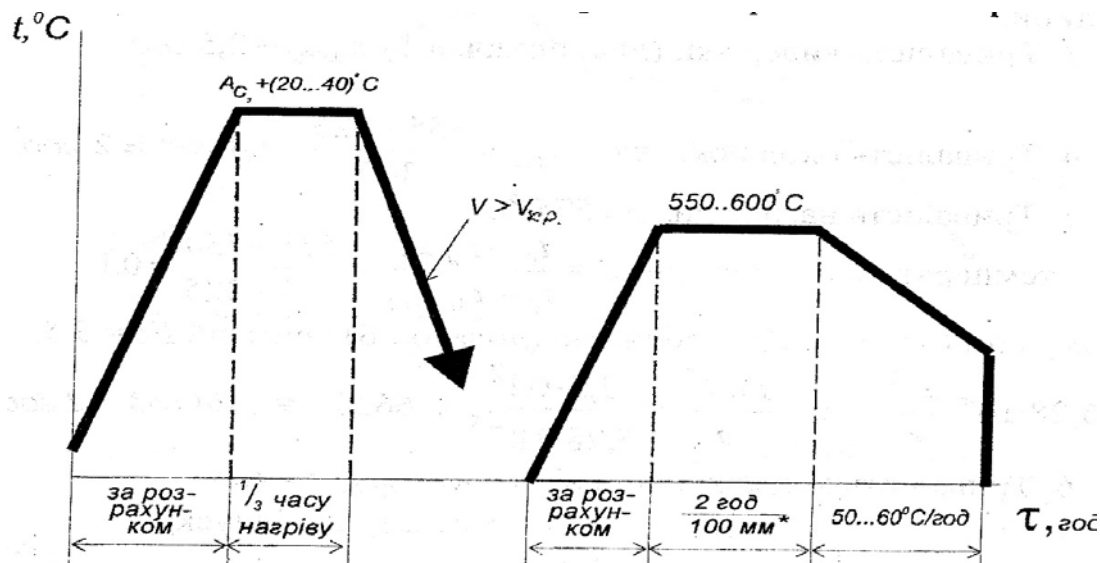


Рисунок 5 – Графік технології нормалізації станини з сталі 38ХГСЛ-II з товщиною стінки 200 мм

### 3.1.3 Термічне поліпшення сталевого литва (гартування з відпуском)

Проводиться відповідно до графіка, що приведений на рис. 6.



100 мм \*- розрахунковий перетин (див. табл.1)

Рисунок 6 – Графік типової технології термічного поліпшення (загартовки з високотемпературним відпуском) сталевого литва

#### Приклад 9

Провести термічну обробку литого елемента станини у вигляді пластини 200x400x1200 мм із сталі 35ХГ2СЛ-ІІІ для отримання за всім перетином високого поєднання міцності, в'язкості і пластичності.

#### Рішення

Потрібні механічні властивості можуть бути отримані гартуванням з наступним високотемпературним відпуском.

##### 1 Режим гартування.

Температура гартування  $t_2 = A_{c3} + (20...40) ^\circ C$ . Для сталі 35ХГ2СЛ  $A_{c3} = 805 ^\circ C$ .  $t_2 = 805 + (20...40) = 825...845 ^\circ C$ .

Температура печі  $855 ^\circ C$ .

Як встановлено у задачі прикладу 7, елемент, який розглядається, являє масивне тіло  $Bi = \frac{180 \cdot 0,1}{26,7} = 0,67$ .

Визначаємо температурний критерій :

$$\theta = \frac{t_c - t_{M.KIH}}{t_c - t_{M.ПOЧ}} = \frac{855 - 845}{855 - 25} = 0,012.$$

За графіком (додаток Д) для випадку  $Bi = 0,67$  і  $\theta = 0,012$  критерій  $Fo = 7,7$ . Тоді час нагрівання

$$\tau_H = \frac{Fo S^2}{a} = \frac{7,7 \cdot 0,1^2}{5,83 \cdot 10^{-6}} = 13207 \text{ с} = 3,7 \text{ год} \approx 4 \text{ год}.$$

$$\text{Тривалість видержки } \tau_{ВИД} = \frac{1}{3} \tau_H = \frac{1}{3} 4 = 1,3 \text{ год} = 1,5 \text{ год}.$$

Для визначення швидкості охолодження визначимо  $V_{кр}$ . За діаграмою ізотермічного розпаду аустеніту сталі 35ХГ2СЛ-ІІІ (рис. 7) визначаємо температуру мінімальної стійкості аустеніту  $t^* = 600^\circ\text{C}$ , час мінімальної стійкості переохолодженого аустеніту  $\tau^* = 6 \text{ с}$ .

$$V_{кр} = \frac{855 - 600}{10} = 25^\circ\text{C/с}.$$

Як середовище для охолодження призначаємо мінеральне масло. Тривалість видержки у маслі визначимо за формулою (13). Для цього з таблиць додатку Б визначаємо питому теплоємність сталі  $c = 695 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$ .

Середній коефіцієнт тепловіддачі у маслі  $\alpha = 400 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{K)}$ .

Активна поверхня пластини

$$F = 0,4 \cdot 0,2 \cdot 2 + 0,2 \cdot 1,2 \cdot 2 + 0,4 \cdot 1,2 \cdot 2 = 1,6 \text{ м}^2.$$

Маса пластини  $\rho = 7830 \text{ кг/м}^3$  (додаток Г)

$$G = 7830 \cdot 0,4 \cdot 0,2 \cdot 1,2 = 752 \text{ кг}.$$

За формулою (13) тривалість видержки пластини у маслі ( $t=30^\circ\text{C}$ ) при її гартуванні складе

$$\tau = \frac{752 \cdot 695}{400 \cdot 1,6} \ln\left(\frac{30 - 855}{30 - 100}\right) = 2014 \text{ с} = 0,56 \text{ год} \approx 40 \text{ хв}.$$

Марка сталі	Температури критичних точок, °C			
	$A_1$	$A_3$	$A_{cm}$	$M_H$
35ХГ2С	765	805		280

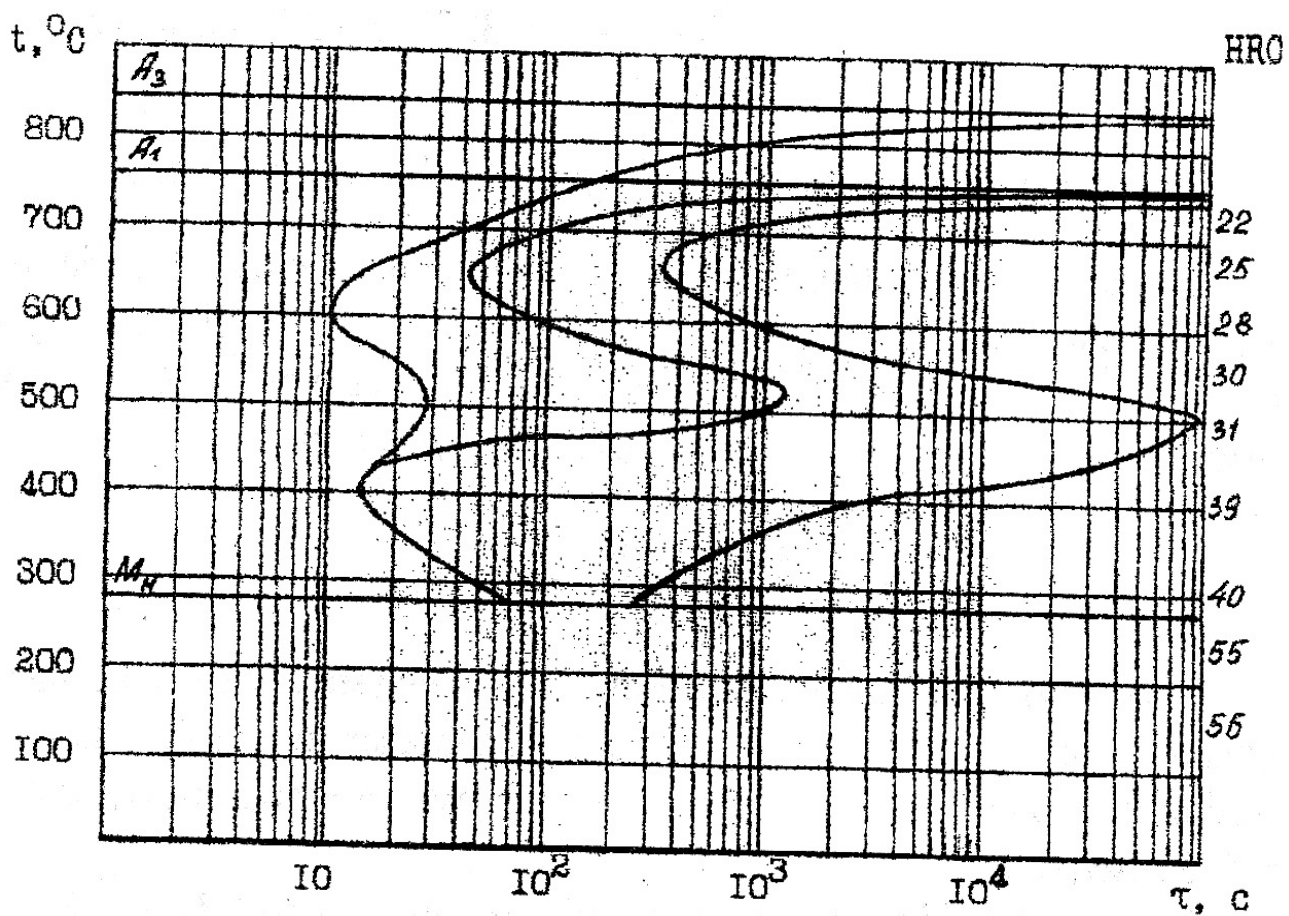


Рисунок 7 – Діаграма ізотермічного розпаду переохолодженого аустеніту сталі 35ХГ2С

## 2 Режим відпуску.

Температурний критерій

$$\theta = \frac{t_c - t_{\text{м.кін}}}{t_c - t_{\text{м.поч}}} = \frac{575 - 550}{575 - 25} = 0,245; \quad a = 5,28 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; \quad Fo = 4,8.$$

$$\text{Тривалість нагрівання } \tau = \frac{Fo S^2}{a} = \frac{4,8 \cdot 0,1^2}{5,28 \cdot 10^{-6}} = 9090 \text{ с} = 2,5 \text{ год.}$$

Тривалість видержки при відпуску 4 години.

Тривалість охолодження від температури відпуску

$$\tau = \frac{600 - 100}{50} = 10 \text{ год.}$$

Графік технології гартування з відпуском пластини із сталі 35ХГ2СЛ-ІІІ буде таким, як показано на рис. 8.

Загальна тривалість гартування з відпуском пластини із сталі 35ХГ2СЛ-ІІІ складе 22,6 години.

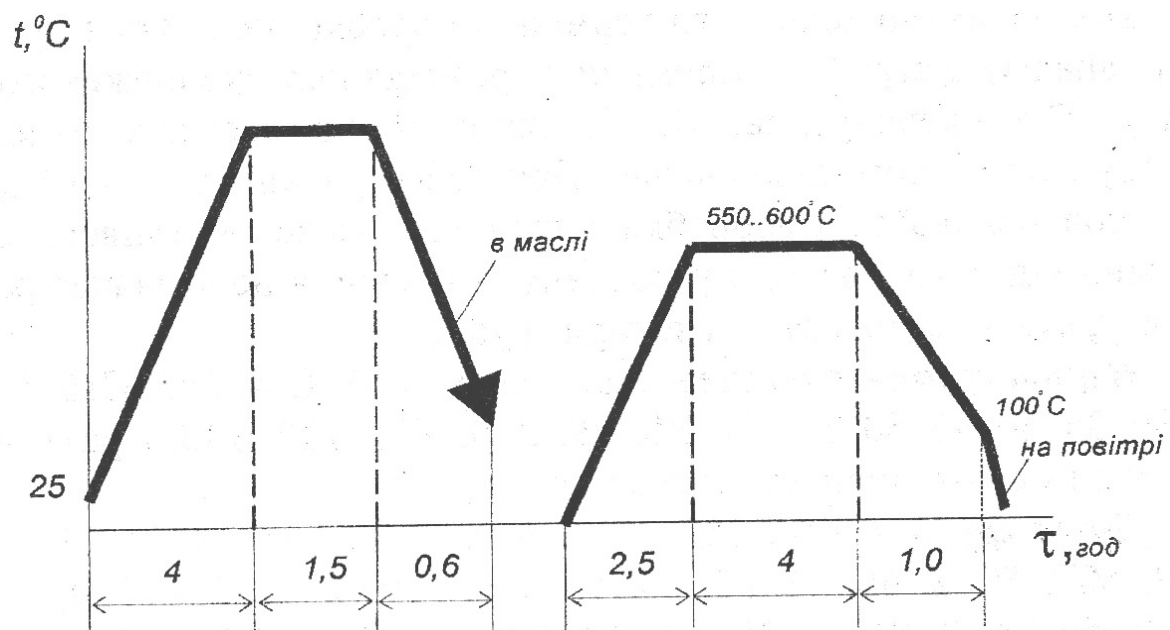


Рисунок 8 – Графік технології загартування з високотемпературним відпуском пластини 200x400x1200 мм

## 3.2 Технологія термічної обробки поковок

### 3.2.1 Загальні підходи до розроблення технології термообробки поковок

На заводах важкого машинобудування термічній обробці піддають великі поковки, а на заводах масового виробництва - деталі



автомобілів, тракторів, комбайнів, металорізючих верстатів та інше. Різноманітні види технології термічної обробки поковок діляться на попередню і кінцеву термообробку.

Попередня термообробка виконується безпосередньо після гарячої пластичної деформації виробів, “начорно” (без попередньої механічної обробки) і провадиться за режимами відпалу або нормалізації з відпуском.

Остаточна термічна обробка виконується після попередньої механічної обробки (обдирання) і провадиться за режимами гартування з наступним відпуском.

Основною метою попередньої термообробки великих поковок є зменшення флокеночутливості, зниження твердості для поліпшення оброблюваності різанням і підготовки структури для наступної термообробки.

Остаточна термічна обробка провадиться з метою одержання фізико-механічних властивостей згідно з вимогами креслення або технічних умов на виготовлення виробів.

При розробці технології термічної обробки виходять з природи сталі, аналізу діаграми ізотермічного розпаду переохолодженого аустеніту і її флокеночутливості. Від цих факторів залежить технологія відпалу і термічного поліпшення. При проектуванні технології відпалу як попередньої термообробки, виходять з флокеночутливості сталі. Залежно від схильності до утворення флокенів, а це визначає режим відпалу, сталі розділяють на чотири групи.

**Перша група** – вуглецеві сталі марок: Ст3, Ст4, Ст5, Ст6, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, У7, У8, У9, У10, У11, У12, У13. Практично у цих сталях флокени не утворюються.

**Друга група** – 20Х, 35Х, 40Х, 45Х, 50Х, 55Х, 90Х, 30Г2, 35Г, 35Г2, 50Г, 50Г2, 65Г, 10Г2, 60ХГ, 20ХГ, 50ХГ, ХВГ, 40ХФ, 45ХФ, 15ХФ, 50ХФ, 20ХМ, 34ХМ, 34ХМ1Н, 38ХМ, 40ХН, 60ХМ, 75ХМ, 20Х3М, 30Х3М, 90ХС, 38ХМЮА, 38ХГМ, 18ХГМ, 20ХМФ, 35ХМФ, 20ГС, 25ГС, 10ХСНД, 20ХГС, 30ХГС, 35ХГС, 40ХГС, 90ХГС, 90Х2СФ.

**Третя група** – 20ХН, 40ХН, 50ХН, 60ХН, 35ХНМ, 40ХНМ, 45ХНМ, 38ХНМ, 34ХН1Б, 38ХГН, 15ГН2М, 30Х2ГМТ, 12Х1М1Ф, 15Х1М1Ф, 20ХНМФ, 25Х2МФН, 38ХНВ, 5ХГМ.

**Четверта група** – 34ХН2М, 34ХН3М, 38ХН3МА, 5ХНМ, 5ХНТ, 18Х2Н4МА, 5ХНВ, 18Х2Н4ВМА, 38ХН3МФ.

Поковки II-IV груп після ковки охолоджують у ямних печах, температура цих поковок до відпалу не повинна знижуватись нижче 300...350 °С. Через це поковки з цих сталей для відпалу поступають гарячими, з температурою 300-350 °С.

### 3.2.2 Технологія відпалу поковок

Поковки із сталей першої групи флокеночутливості відпалюють за технологією, яка наведена на рис. 9.

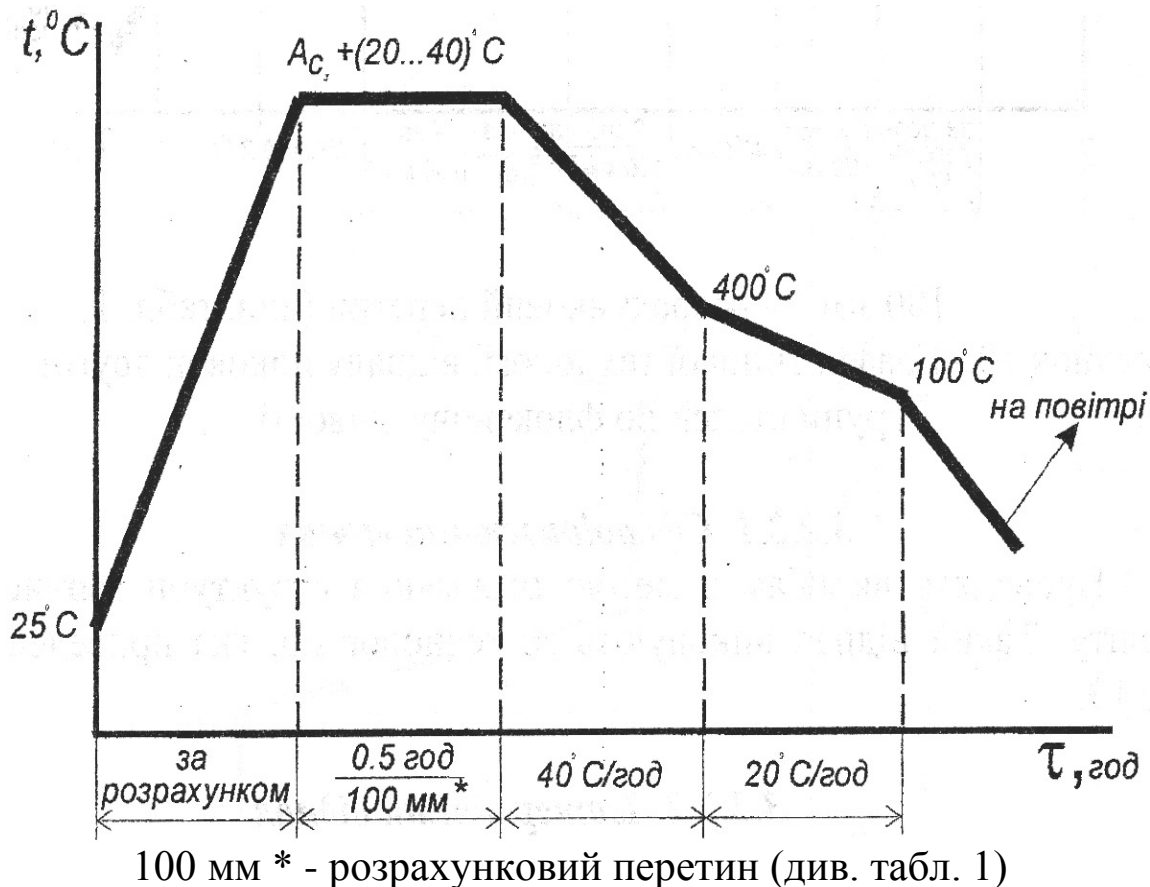
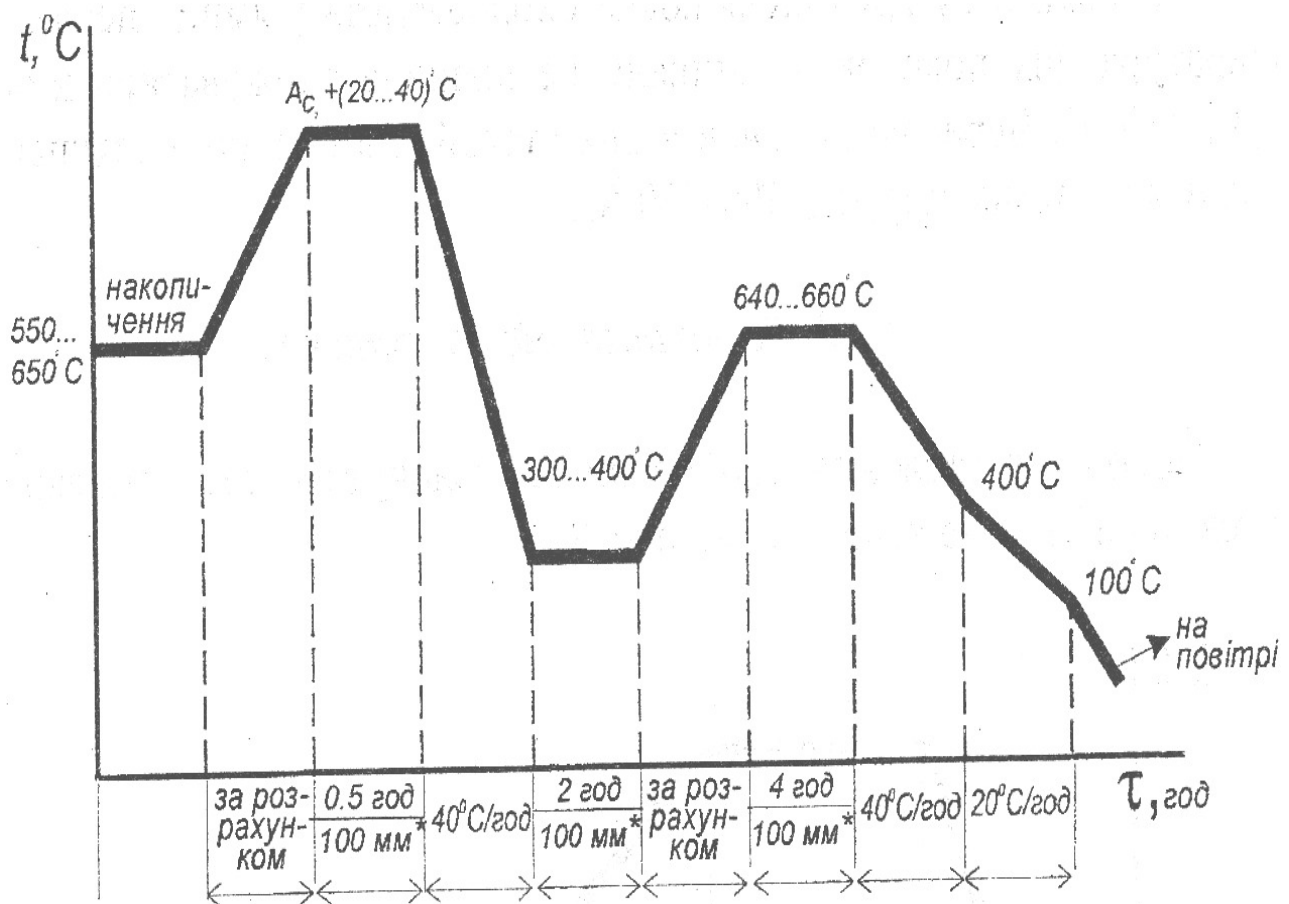


Рисунок 9 – Графік типової технології відпалу поковок першої групи сталей по флокеночутливості

Поковки із сталей другої групи флокеночутливості відпалюють за технологією, яка наведена на рис. 10.

Поковки із сталей третьої групи флокеночутливості відпалюють за технологією, наведеною на рис. 11.

Поковки із сталей четвертої групи флокеночутливості відпалюють за технологією, яка наведена на рис. 12.



100 мм \* - розрахунковий перетин (див. табл. 1)

Рисунок 10 - Графік типової технології відпалу поковок другої групи сталей по флокеночутливості

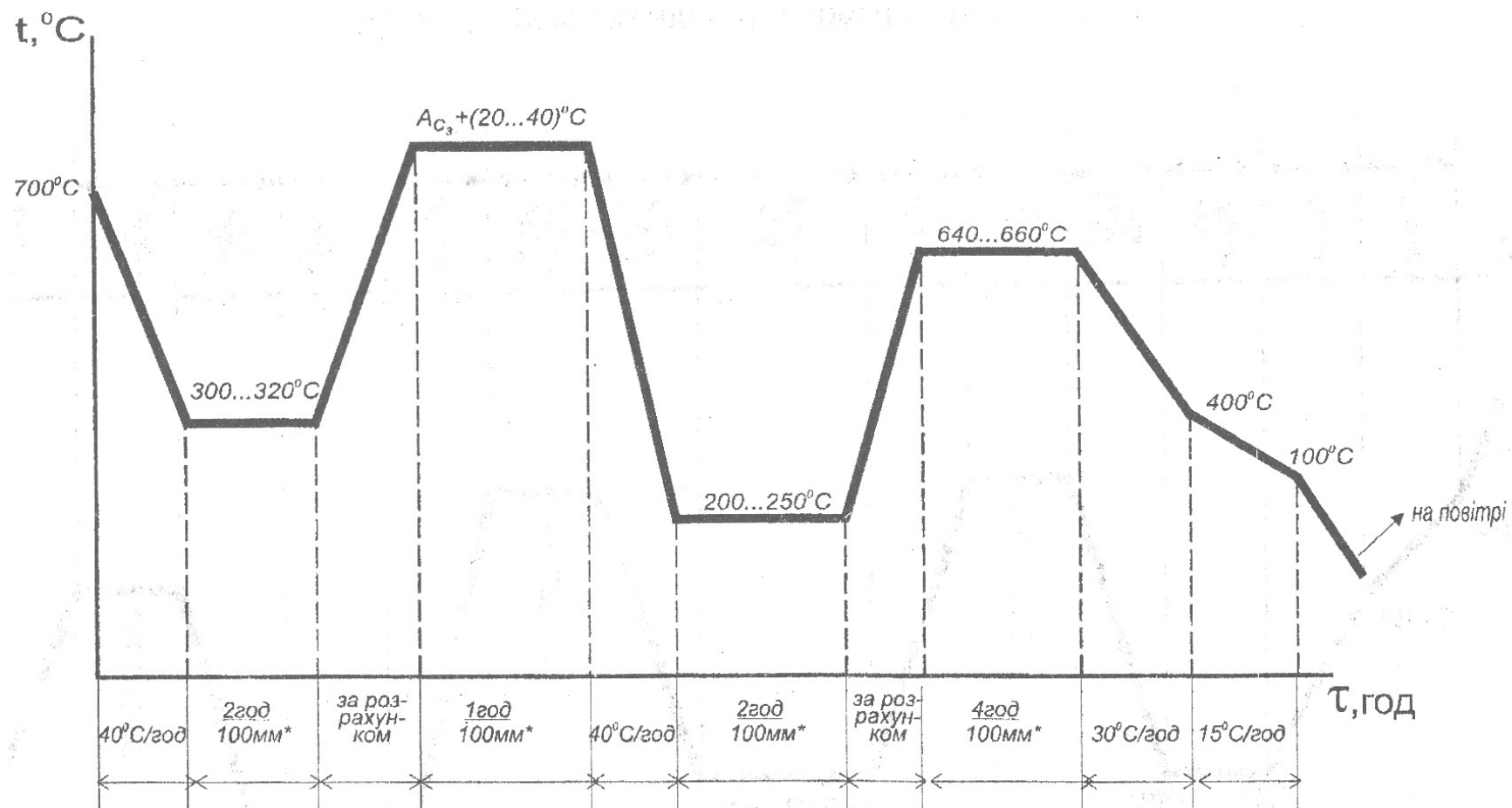
### 3.2.2.1 Сфероїдизуючий відпал

Проводять виробам з метою отримання структури зернистого перліту. Такий відпал виконують за технологією, яка приведена на рис.13.

### 3.2.2.2 Ізотермічний відпал

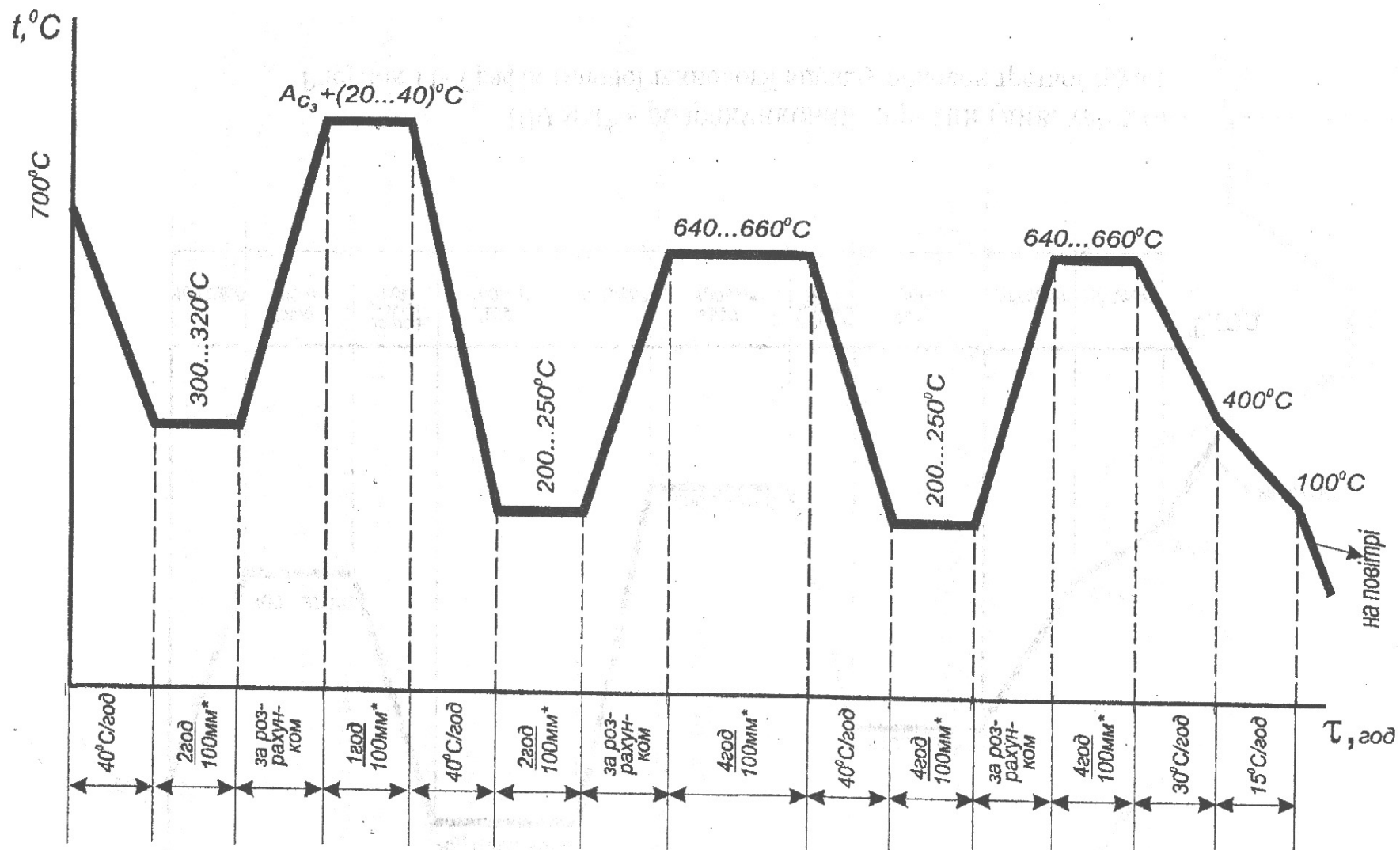
У цьому випадку поковки із сталей, переважно легованих, нагрівають до температури  $t_o = A_{c3} + (50...70) ^\circ C$  і порівняно швидко охолоджують до температури, яка лежить нижче точки  $A_1$  на  $100...120 ^\circ C$  залежно від характеру діаграми ізотермічного розпаду переохолодженого аустеніту. При цій температурі призначають ізотермічну видержку, яка необхідна для повного розпаду аустеніту, після чого поковки охолоджують на повітрі.

Типова технологія ізотермічного відпалу приведена на рис.14.



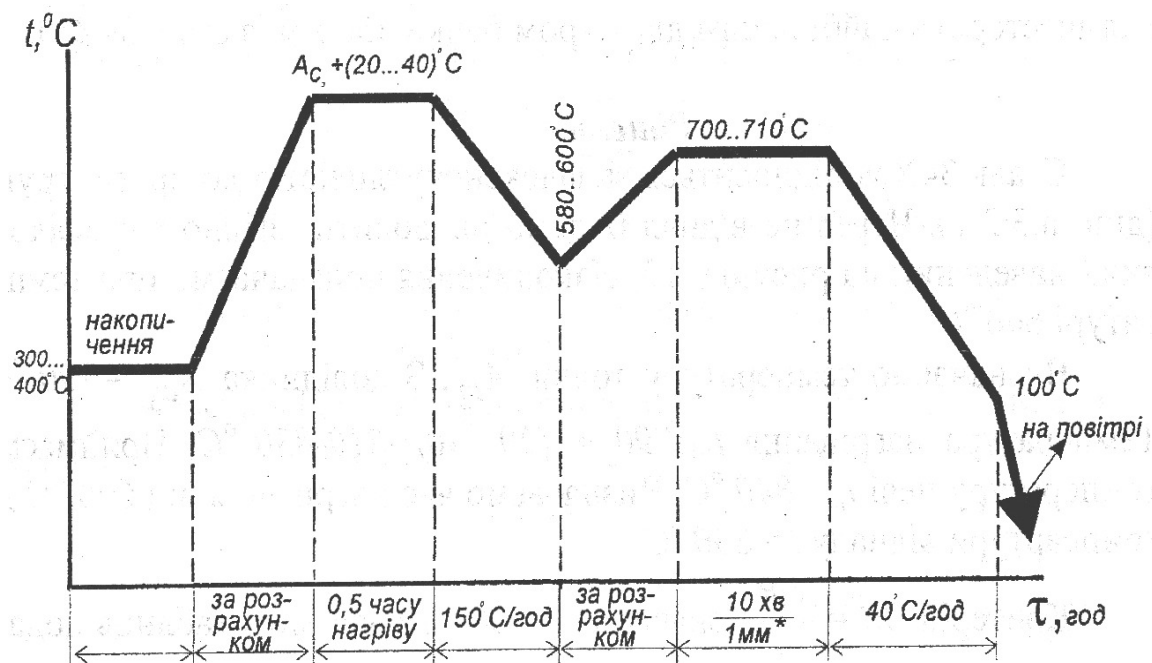
100 мм\* - розрахунковий перетин (див. табл.1)

Рисунок 11- Графік типової технології відпалу поковок третьої групи сталей по флокеночутливості



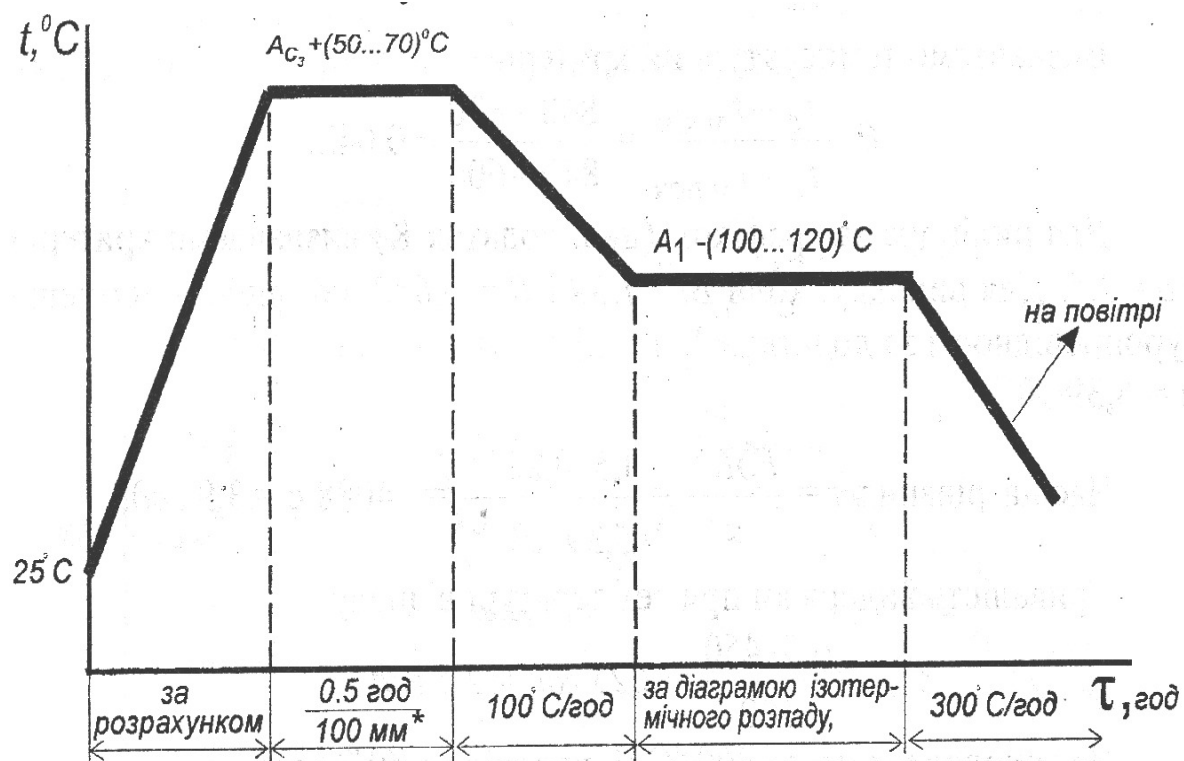
100 мм\* - розрахунковий перетин (див. табл.1)

Рисунок 12 – Графік типової технології відпалу поковок четвертої групи сталей по флокеночутливості



100 мм\* - розрахунковий перетин (див. табл. 1)

Рисунок 13 – Графік типової технології сфероїдизуючого відпалу поковок



100 мм\* - розрахунковий перетин (див. табл. 1)

Рисунок 14 – Графік типової технології ізотермічного відпалу поковок

### Приклад 10

Розробити технологію попередньої термообробки після кування вал-шестерні з найбільшим діаметром бочки 450 мм із сталі 34ХМ.

#### Рішення

Сталь 34ХМ відноситься за флокеночутливістю до другої групи (див. п.3.2.1). Через це відпал будемо проводити згідно з графіком, який наведений на рисунку 10. Накопичення призначаємо при температурі 600 °С.

Визначаємо температуру точки  $A_{\text{сз}}$ . З довідника  $A_{\text{сз}} = 790$  °С. Температура нагрівання  $t_o = 790 + (20...40) = 810-830$  °С. Приймаємо температуру печі  $t_n = 840$  °С. Визначаємо час нагрівання від 600 °С до температури відпалу  $t = 830$  °С.

Критерій  $Bi = \frac{\alpha R}{\lambda}$ ; значення  $\alpha$  і  $\lambda$  визначаємо з таблиць додатків 1 і 2. Середнє значення коефіцієнта тепловіддачі за цикл нагрівання  $\alpha = 180$  Вт/(м²·К); коефіцієнт теплопровідності для хромомолібденової сталі  $\lambda = 29,1$  Вт/(м·К).

$$Bi = \frac{180 \cdot 0,225}{29,1} = 1,39. \text{ Тіло масивне } (Bi > 0,25).$$

Визначаємо температурний критерій

$$\theta = \frac{t_c - t_{\text{м.кін}}}{t_c - t_{\text{м.поч}}} = \frac{840 - 830}{840 - 600} = 0,042.$$

Для циліндра за графіком (див. додаток К) визначаємо критерій  $Fo = 1,5$ . Для випадку, коли  $Bi = 1,39$  і  $\theta = 0,042$ , коефіцієнт теплопровідності за додатком Б для хромомолібденової сталі  $a = 5,39 \cdot 10^{-6}$ .

$$\text{Час нагрівання } \tau = \frac{Fo R^2}{a} = \frac{1,5 \cdot 0,225^2}{5,39 \cdot 10^{-6}} = 14088 \text{ с} = 3,9 \text{ год}.$$

Тривалість видержки при температурі відпалу

$$\tau_{\text{вид}} = \frac{0,5 \cdot 450}{100} = 2,25 \text{ год} \approx 2,5 \text{ год}.$$

Час охолодження до 300 °С зі швидкістю 40 °С/год

$$\tau_{\text{охол}} = \frac{830 - 300}{40} = 13,25 \text{ год} \approx 14 \text{ год}.$$

Тривалість видержки при 300...350 °С

$$\tau_{вид} = \frac{2.450}{100} = 9 \text{ год.}$$

Час нагрівання від 350 до 660 °C. Температурний критерій

$$\theta = \frac{t_c - t_{м.кін}}{t_c - t_{м.поч}} = \frac{660 - 640}{660 - 350} = 0,065.$$

Критерій  $Fo = 1,3$ ;  $a = 6,67 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  (додатки Б і К).

$$\text{Час нагрівання } \tau = \frac{1,3 \cdot 0,225^2}{6,67 \cdot 10^{-6}} = 9866 \text{ с} = 2,7 \text{ год} \approx 3 \text{ год.}$$

Тривалість видержки при температурі 640...660 °C обчислюється, виходячи з рекомендацій – 2 г на 25 мм діаметру:

$$\tau = \frac{2 \cdot 450}{25} = 36 \text{ год.}$$

Тривалість охолодження від 660 до 400 °C зі швидкістю 40 °C/год складе:  $\tau_{охол} = \frac{660 - 400}{40} = 6,5 \text{ год.}$

Тривалість охолодження від 400 до 100 °C зі швидкістю 20 °C/год складе:  $\tau_{охол} = \frac{400 - 100}{20} = 15 \text{ год.}$

В результаті розрахунків відпал вал-шестерні повинен проводитись за графіком, який приведений на рис. 15.

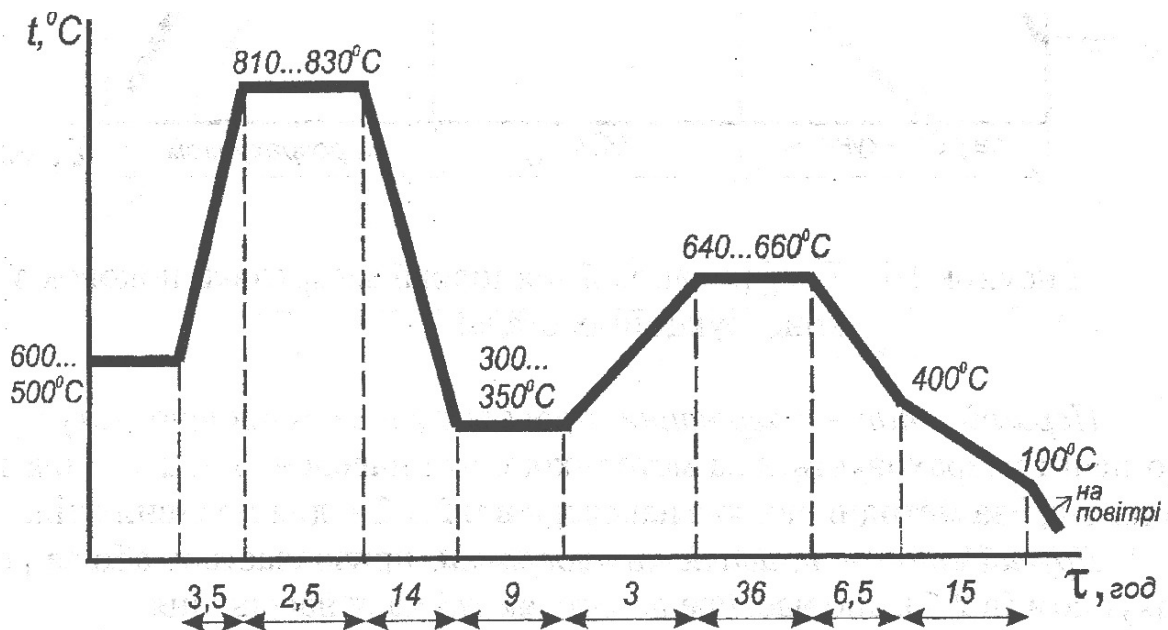


Рисунок 15 – Графік відпалу поковок вал-шестерні зі сталі 34ХМ з найбільшим діаметром 450 мм



Загальна тривалість циклу антифлюкенового відпалу вал-шестерні складає 72,5 годин.

### 3.2.3 Технологія термічного поліпшення заготовок (гартування з відпуском) з конструкційних сталей

Найкращим поєднанням міцності, в'язкості і пластичності володіє сталь з структурою однорідного сорбіту відпуску, який отримують шляхом гартування сталі на мартенсит з наступним високотемпературним відпуском.

Гартування рекомендується проводити відповідно до графіка, який приведений на рис. 16.

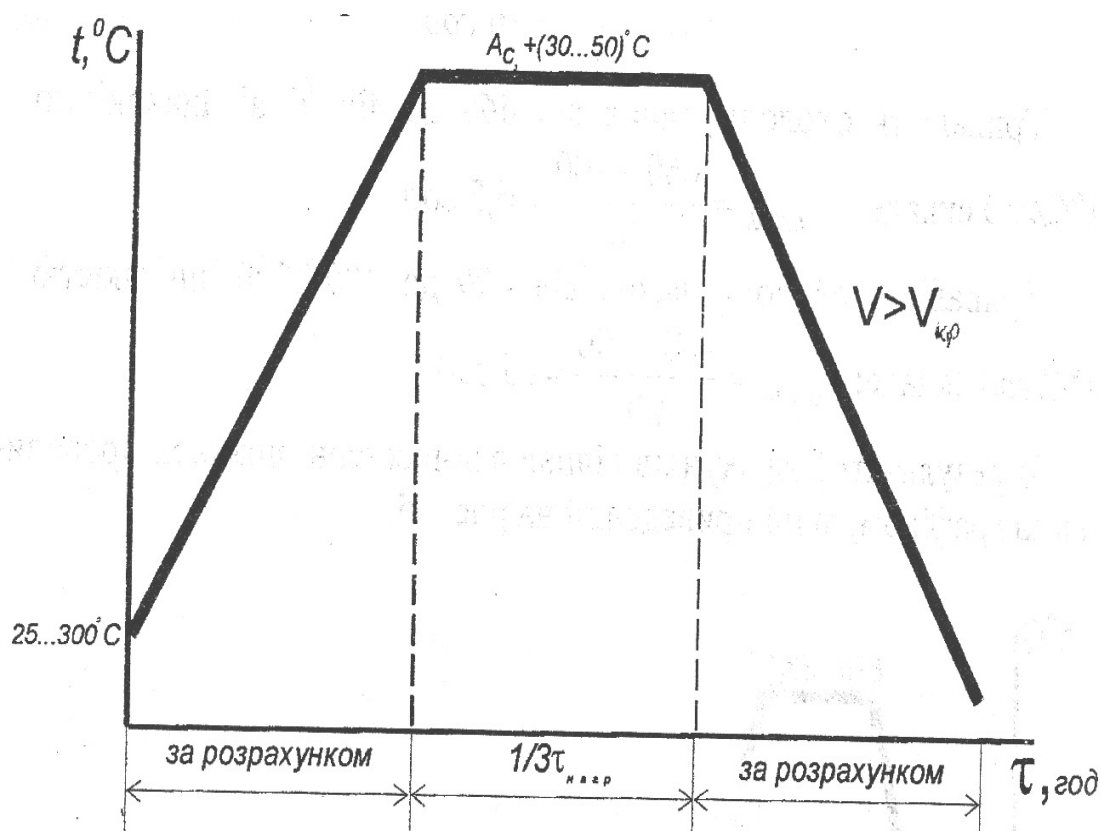


Рисунок 16 – Графік типової технології загартовки поковок з конструкційних сталей

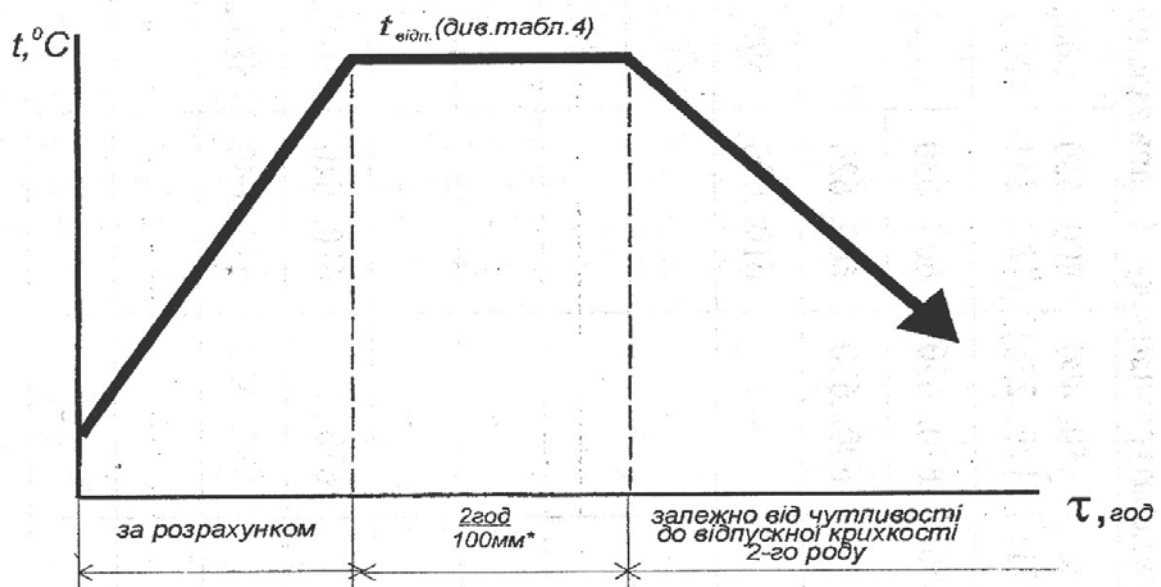
*Перший етап – нагрівання*, проводиться за тепловою потужністю печі і розраховується за методикою, яка наведена в п.2.1.1 для тонких тіл, і за методикою, яка наведена в п.2.1.2 – для масивних тіл.

Другий етап – тривалість видержки, призначається або за розрахунком (п.2.2), або частіше всього як 1/3 часу нагрівання.

Третій етап – охолодження, розраховується згідно з методикою, яка приведена у п.2.3.2. Тривалість видержки у середовищі для охолодження приведена у п.2.3.3.

Після гартування призначається відпуск, який проектують згідно з графіком, приведеним на рис.17. Перший етап – нагрівання, розробляють згідно з методикою, яка приведена в п.2.1. Другий етап – тривалість видержки - розраховують за графіком рис. 17. У випадку, коли температура відпуску нижча  $550^{\circ}\text{C}$ , тривалість видержки збільшують у 1,5 рази проти тієї, яка показана на графіку рис. 17. Температуру відпуску призначають залежно від необхідних механічних властивостей. При цьому рекомендують керуватись даними, які приведені у табл. 4.

Третій етап відпуску – охолодження, вибирається залежно від чутливості сталі до відпускнуї крихкості другого роду. Сталі, які не чутливі до отпускнуї крихкості другого роду, охолоджуються разом з піччю із швидкістю  $40^{\circ}\text{C}/\text{год}$ . Сталі, які чутливі до відпускнуї крихкості другого роду, для її придушення охолоджують у маслі. Час видержки у маслі призначають відповідно до рекомендацій, які приведені у п.2.3.3 з її корегуванням на температуру відпуску.



100 мм\* розрахунковий перетин (див. табл.1)

Рисунок 17 – Графік типової технології високотемпературного відпуску поковок з конструкційних сталей

Таблиця 4 – Температури високого відпуску

Марка сталі	Температура відпуску, °С, при заданій межі текучості, МПа (в дужках – НВ)						
	300...350 (170...271)	350...400 (179...228)	400...450 (187...241)	500...550 (207...255)	600...650 (228...269)	750...800 (269...321)	800...850 (293...331)
40	630...650	620...650	600...630				
45		600...630	600...620				
35ХМА			610...600	590...640	580...620		
34ХНМА				610...650	590...640	570...590	
38ХН3МА				630...650	600...640	570...600	550...570
38ХН3МФА						580...600	550...580
34ХН3М						580...620	550...600
40Х		630...650	610...640	580...620			
40ХН		630...650	610...640	580...620			
40ХНМА							600...620
30ХГС							580...590

## 4 ХІМІКО-ТЕРМІЧНА ОБРОБКА ВИРОБІВ (ХТО)

На заводах ХТО піддають деталі для отримання високої поверхневої твердості і зносостійкості при в'язкій серцевині. Деталі із маловуглецевих сталей піддають цементації або нітроцементації, а із сталей, які термopolіпшуються, - азотуванню.

### 4.1 Технологія цементації

Сталі для цементації ділять на три групи.

**Перша група** – вуглецеві і низьколеговані (15, 20, 20Х, 20ХФ, 20ХМ, 18ХГ, 20ХН).

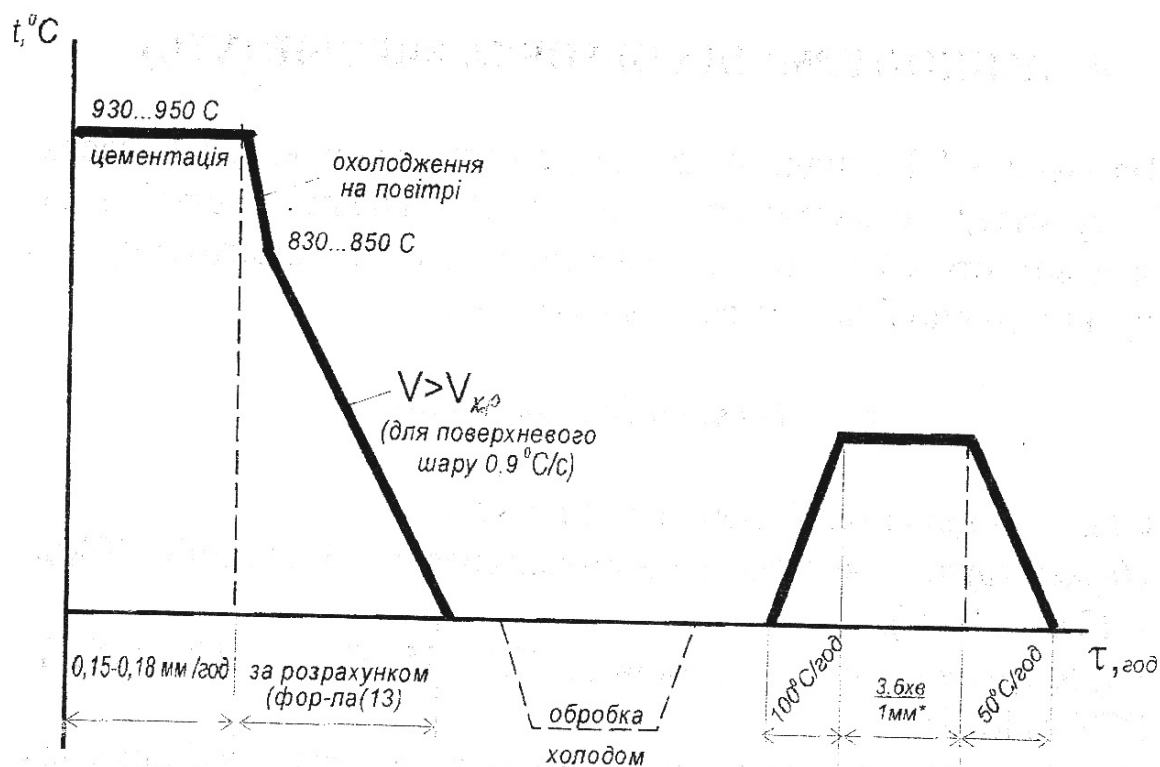
**Друга група** – сталі з титаном (18ХГТ, 25ХГТ, 30ХГТ, 20ХНТ, 20ХГНТР та інші).

**Третя група** – високолеговані хромонікелеві сталі, які використовуються для дуже відповідальних деталей (12Х2Н4А, 20Х2Н4А, 18Х2Н4ВА, 18Х2Н4МА та інші).

Для отримання необхідної твердості на поверхні у межах не нижче 58 HRC деталі після цементації піддають гартуванню з наступним низьким відпуском. Твердість серцевини 35...40 HRC. Частіше застосовують газову цементацію при температурі 930-950 °С. Тривалість видержки призначають, виходячи з необхідної глибини шару з урахуванням середньої швидкості науглецювання 0,15...0,18 мм/год. Як правило глибина шару цементування 0,8...1,5 мм. Вміст вуглецю у поверхневому шарі 0,9...1,0%. Процес цементації і наступне термооброблювання можуть виконуватись за трьома варіантами залежно від ступеня відповідальності деталей. Графік технології для невідповідальних деталей наведений на рис.18.

На рис. 19 приведений графік технології цементації з наступною термічною обробкою для деталей з підвищеними вимогами до структури і властивостей.

Для задоволення особливо високих вимог, які пред'являються до механічних властивостей деталей, режим цементації і термообробки виконують за графіком, наведеним на рис. 20 (подвійне гартування).



1 мм\* - розрахунковий перетин (див. табл. 1)  
Рисунок 18 – Графік типової технології цементації і після-цементаційної термообробки невідповідальних деталей машин

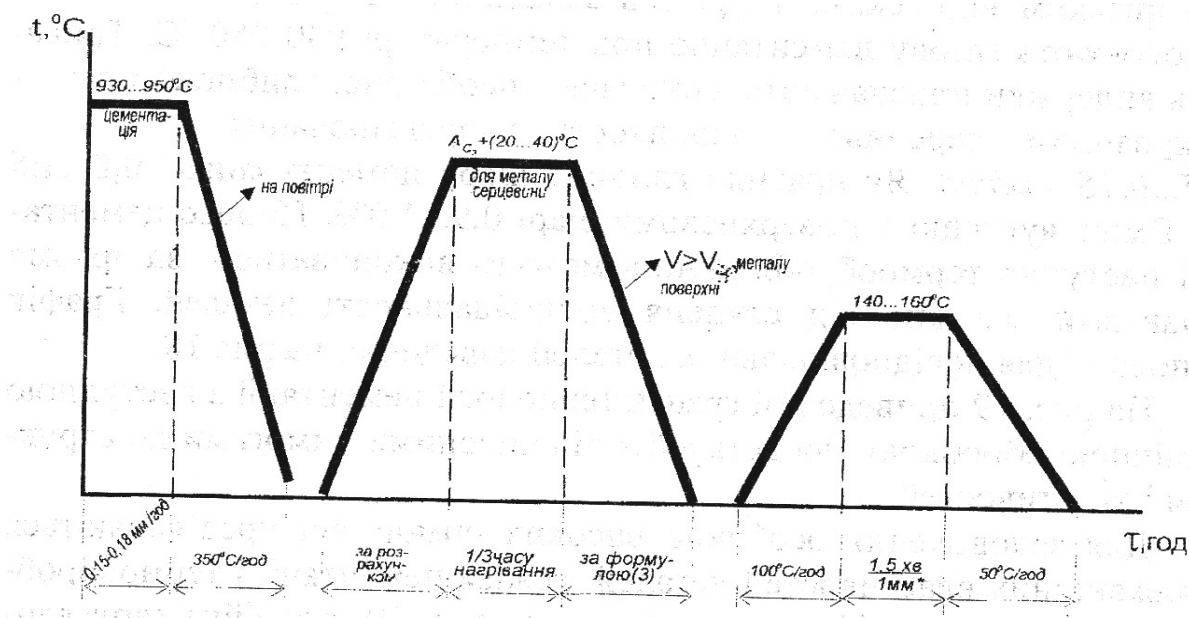
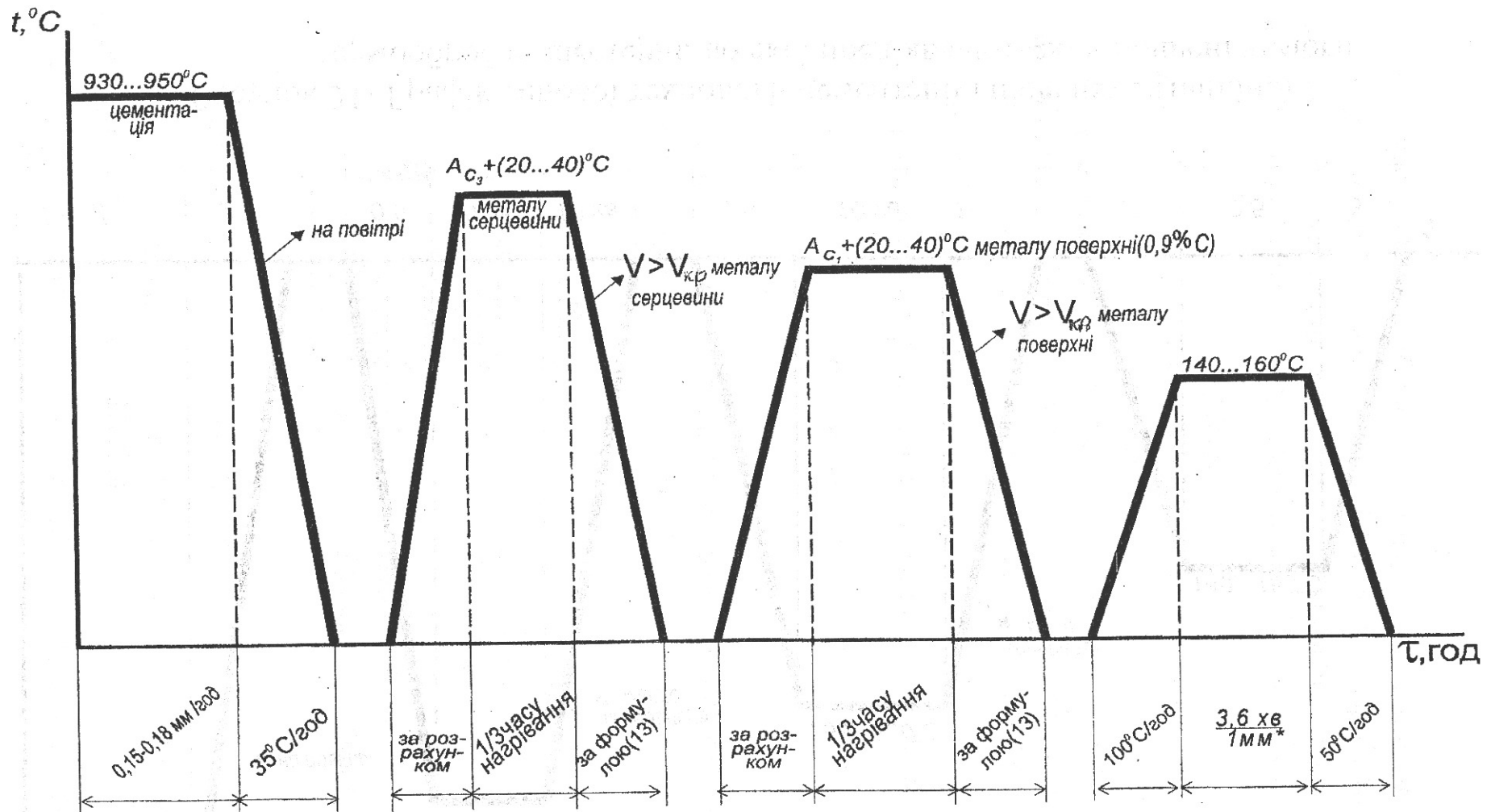


Рисунок 19 – Графік типової технології цементації і після-цементаційної термообробки деталей з підвищеними вимогами за експлуатаційними характеристиками



1 мм\* - розрахунковий перетин

Рисунок 20 – Графік типової технології цементації і післяцементіаційної термообробки деталей з особливо високими вимогами за експлуатаційними характеристиками

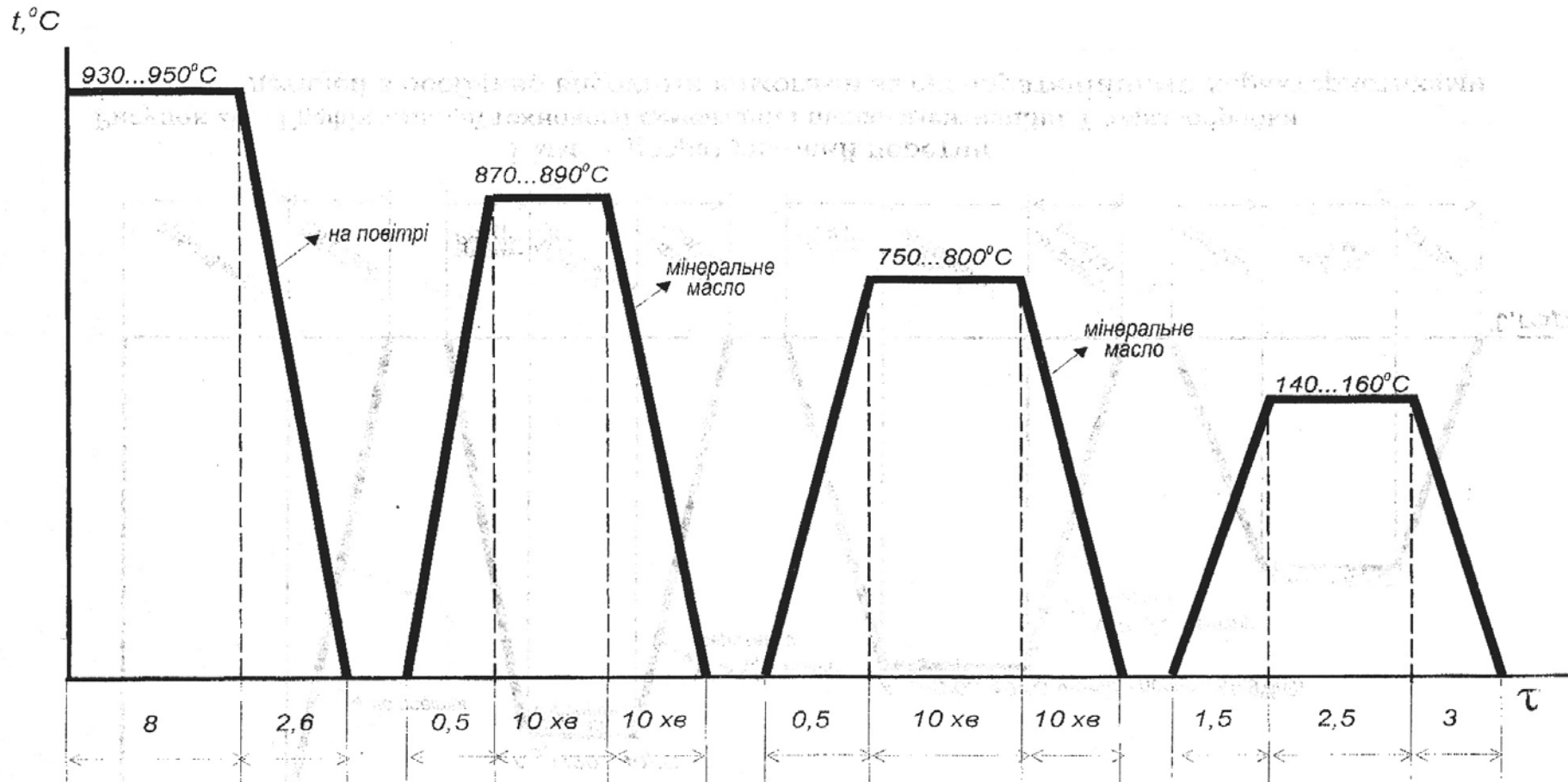


Рисунок 21- Графік типової технології цементації і післяцементаційної термообробки шестерні, до якої пред'являються підвищені вимоги

### Приклад 11

Шестерня діаметром 200 мм з висотою маточини 40 мм, діаметр отвору 30 мм, виготовлена із сталі 12Х2Н4А. Розробити режим хіміко-термічної і термічної обробки для отримання на поверхні зуба твердості 60...62 HRC, а в серцевині зуба – 35...38 HRC.

### Рішення

Шестерня (рис. 22) виготовлена із сталі третьої групи, отже, деталь відповідального призначення. Необхідні властивості можуть бути забезпечені цементацією з наступним подвійним гартуванням і низьким відпуском. Призначаємо глибину цементації 1,2 мм.

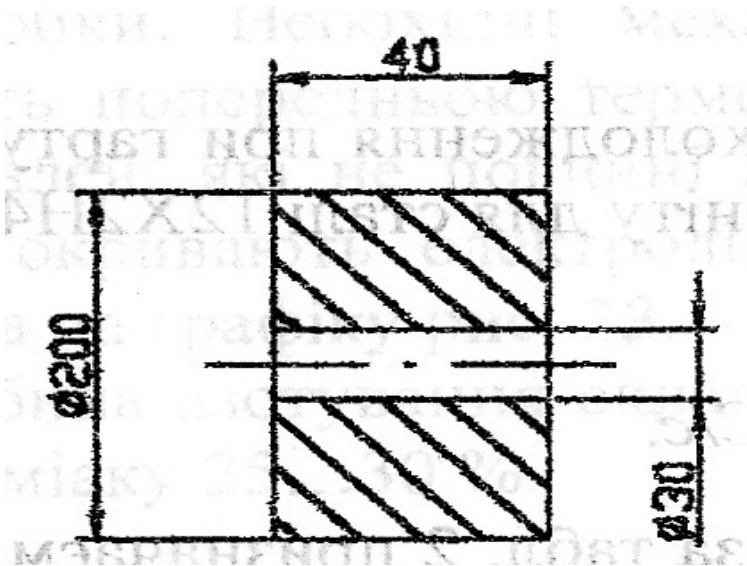
Графік технології будуємо у відповідності до рис. 21. Проводимо розрахунок етапів технології.

1 Тривалість видержки при цементації:  $\frac{1,2}{0,15} = 8 \text{ год.}$

2 Після цементації охолодження на повітрі протягом часу

$$\tau_{\text{охол}} = \frac{940 - 25}{350} = 2,6 \text{ год.}$$

3 Час нагрівання на перше гартування. Визначаємо розрахунковий перетин з табл.1 (схема 4).



$$D_n = 200 \text{ мм;}$$

$$L = 40 \text{ мм;}$$

$$d_{\text{вн}} = 30 \text{ мм;}$$

$$b = 85 \text{ мм;}$$

$$\text{Варіант } b > L < D_n;$$

$$D_{\text{розрах}} = L = 40 \text{ мм}$$

Рисунок 22 - Ескіз поковки шестерні із сталі 12Х2Н4А

Розглядаємо шестерню як пластину  $2S = L = 40 \text{ мм}$ . Температура гартування для сталі 12Х2Н4А



$$t_2 = A_{c3} + (20 \dots 40) = 850 + (20 \dots 40) = 870 \dots 890 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad Bi = \frac{\alpha S}{\lambda}.$$

З таблиць додатків А і Б визначаємо:

- середній коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha = 180 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;
- коефіцієнт теплопровідності  $\lambda = 26,4 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ .

$$Bi = \frac{180 \cdot 0,2}{26,4} = 0,136. \quad Bi > 0,25; \text{ тіло тонке.}$$

Час нагрівання визначається за формулою (7):

$$\tau = \frac{Gc}{\alpha F} \ln \left( \frac{t_c - t_{\text{м.поч}}}{t_c - t_{\text{м.кін}}} \right).$$

$$\text{Маса } G = \frac{\pi D_H^2}{4} L \rho - \frac{\pi d_{BH}^2}{4} L \rho = \left( \frac{\pi}{4} \right) L \rho (D_H^2 - d_{BH}^2).$$

Густота сталі  $\rho = 7830 \text{ кг}/\text{м}^3$  (додаток Г).

$$G = 0,785 \cdot 0,04 \cdot 7830 \cdot (0,2^2 - 0,03^2) = 9,6 \text{ кг.}$$

Середня теплоємність (таблиця додатку Б)

$$c = 687 \text{ Дж}/\text{кг} \cdot \text{К}.$$

Площа активної поверхні, яка сприймає тепло:

$$F = \pi D_H L + \frac{\pi D_H^2}{4} 2 + \pi d_{BH} L - \frac{\pi d_{BH}^2}{4} 2 =$$

$$3,14 \cdot 0,2 \cdot 0,04 + 0,785 \cdot 0,04 \cdot 2 + 3,14 \cdot 0,03 \cdot 0,2 -$$

$$0,785 \cdot 0,0009 \cdot 0,2 = 0,107 \text{ м}^2.$$

Час нагрівання  $\tau = \frac{9,6 \cdot 687}{180 \cdot 0,107} \ln \left( \frac{900 - 25}{900 - 850} \right) = 1631 \text{ с} = 25 \text{ хв.}$  Приймаємо 0,5 години.

4 Визначаємо середовище для охолодження при гартуванні. За діаграмою ізотермічного розпаду аустеніту для сталі 12Х2Н4А

$$t^* = 400 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad \tau^* = 8 \text{ с.}$$

$$V_{кр} = \frac{890 - 400}{8} = 73 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{с}.$$

Як середовище для охолодження за табл. 2 призначаємо мінеральне масло. Час видержки у маслі розраховуємо за

формулою (13):

$$\tau = \frac{Gc}{\alpha F} \ln \left( \frac{t_c - t_{\text{м.поч}}}{t_c - t_{\text{м.кін}}} \right).$$

$G = 9,6 \text{ кг}$ ,  $c = 687 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$ ,  $\alpha = 400 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$  (додаток А),  $t_c = 50^\circ \text{C}$ ,  
 $t_{\text{м.поч}} = 890^\circ \text{C}$ ,  $t_{\text{м.кін}} = 100^\circ \text{C}$ .

$$\tau = \frac{9,6 \cdot 687}{400 \cdot 0,107} \ln \left( \frac{50 - 890}{50 - 100} \right) = 434 \text{ с} = 7,2 \text{ хв.}$$
 Приймаємо 10

хвилин.

5 Визначаємо режим другого гартування. Температура нагрівання  $t_r = A_{\text{г1}} + (20 \dots 40)^\circ \text{C}$ . Для сталі типу 90Х2Н4А  $A_{\text{г1}} = 760^\circ \text{C}$ .

$$t_r = 760 + (20 \dots 40) = 789 \dots 800^\circ \text{C}.$$

Час нагрівання за формулою (7)

$$\tau = \frac{9,6 \cdot 687}{180 \cdot 0,107} \ln \left( \frac{800 - 25}{810 - 800} \right) = 1489 \text{ с} = 24 \text{ хв.}$$
 Приймаємо 0,5 години

і весь тепловий режим повторюємо.

6 Режим відпуску. Час нагрівання  $\frac{150}{100} = 1,5 \text{ год.}$

Тривалість видержки  $3,6 \cdot 40 = 144 \text{ хв} = 2,4 \text{ год.}$  Приймаємо  $\tau_{\text{вид}} = 2,5 \text{ год.}$

Тривалість охолодження  $\tau_{\text{охол}} = \frac{150}{50} = 3 \text{ год.}$

Загальний цикл всієї технології 20,1 год.

#### 4.2 Технологія азотування

Внаслідок азотування деталі отримують виключно високу твердість ( $HV = 1000 \dots 1200$ ), високий опір стомленості і корозійну стійкість (на повітрі, у воді). Азотують спеціальні сталі, відомі під назвою нітролої (38ХМЮА, 38Х2МЮА). Після азотування не проводять ніякої обробки. Необхідні механічні властивості серцевини деталі отримують попередньою термообробкою (термічним поліпшенням). Зони деталей, які не повинні азотуватися попередньо, перед азотуванням покривають електролітично міддю. Технологія азотування приведена на графіку рис. 23.

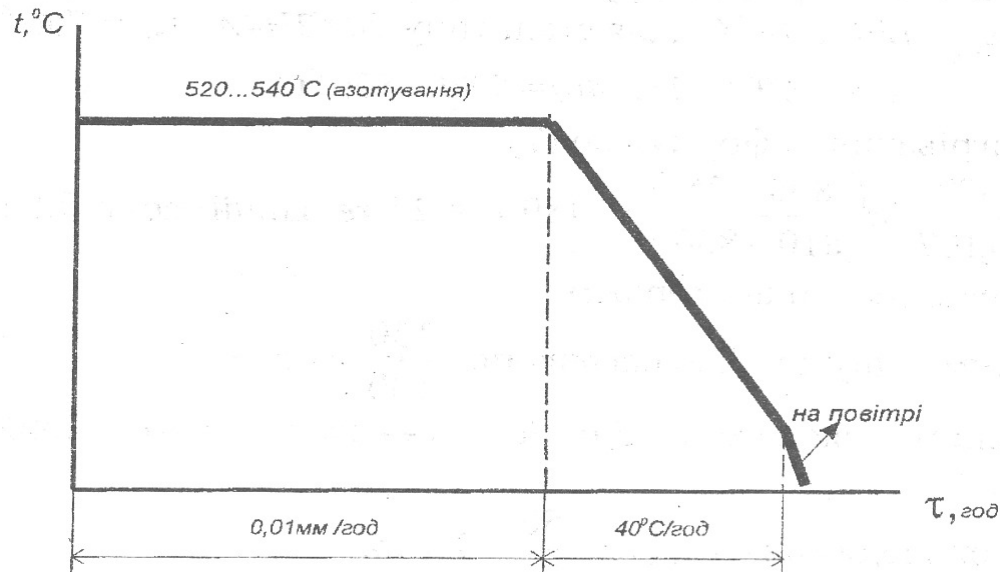
Глибина азотування складає звичайно 0,2...0,3 мм. Ступінь дисоціації аміаку 25...30 %.

### 5 ТЕРМІЧНА ОБРОБКА ПРУЖИН І РЕСОР

Ресорно-пружинні сталі повинні мати високий опір малим пластичним деформаціям, високу межу видержки при достатніх пластич-

ності та опорі крихкому руйнуванню. Сталі повинні мати також гарну загартовуваність і прогартовуваність. Вказані властивості досягаються використанням відповідних марок сталей і термічною обробкою на троостит відпуску.

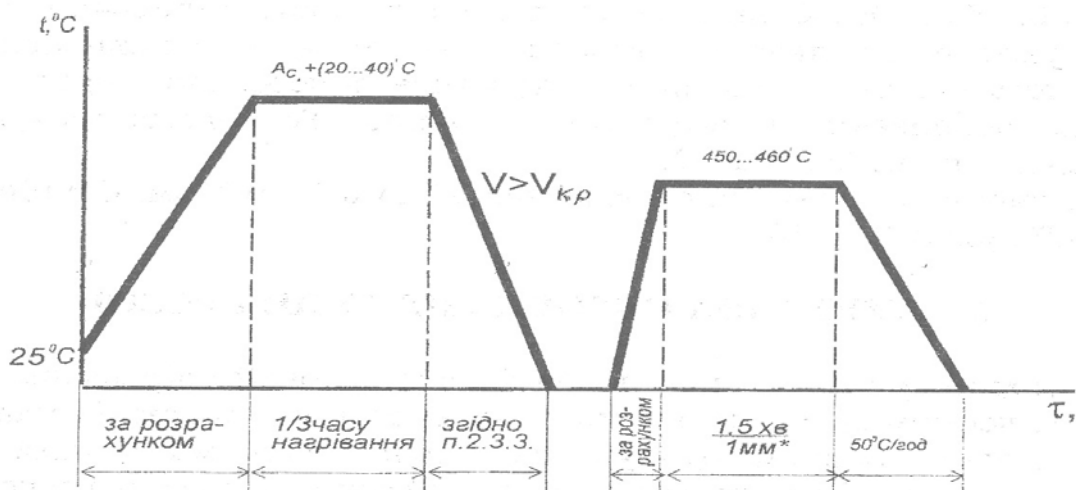
Ри-  
23 –  
фік  
вої  
НОЛО-  
азоту  
вання



сунок  
Гра-  
типо-  
тех-  
гії  
ту-

Використовуються такі сталі: 65, 75, 85, 50C2A, 55C2A, 70C3A, 60C2, 60C2ХФА, 60C2ВА, 60C2Н2А, 50ХГА, 50ХФА.

Термічна обробка проводиться за технологією, яка приведена на рис. 24.



1 мм\* - розрахунковий перетин за табл. 1

Рисунок 24 – Графік типової технології остаточної термообробки пружин та ресор

## 6 ТЕРМІЧНА ОБРОБКА ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ СТАЛЕЙ

Інструментальні сталі характеризуються підвищеним вмістом вуглецю (вище 0,7%) та наявністю карбідоутворюючих елементів хрому, вольфраму, молібдену, ванадію та інших. Самі інструменти, які виготовляються з цих сталей, мають досить складну форму, де часто буває велика різниця між робочою кромкою інструмента і його основним тілом. Багато інструментів після гартування і відпуску піддаються тільки шліфуванню, а через це для них під час нагрівання для гартування дуже важливим є відсутність знеуглецювання поверхневого шару, що досягається спеціальними умовами нагрівання.

Завдяки цьому попередня, і особливо остаточна, термічна обробка інструментальних сталей у багатьох випадках відрізняється від аналогічних видів термічної обробки, прийнятих для конструкційних сталей.

Найбільш доцільно попередню і остаточну термічну обробку інструментальних сталей призначати в залежності від їх хімічного складу.

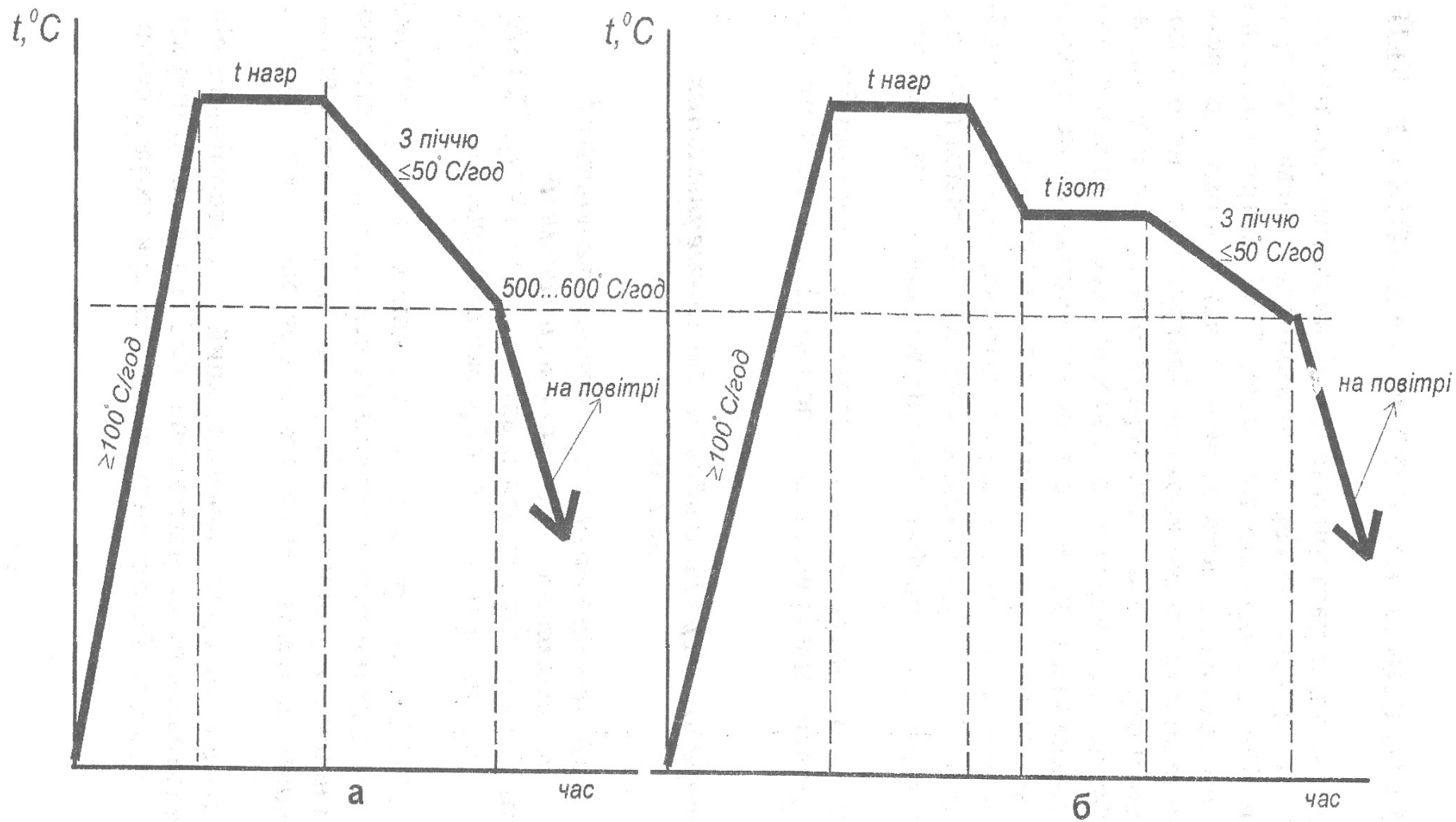
## ***6.1 Попередня термічна обробка інструментальних сталей***

### ***6.1.1 Попередня термічна обробка вуглецевих і легированих інструментальних сталей***

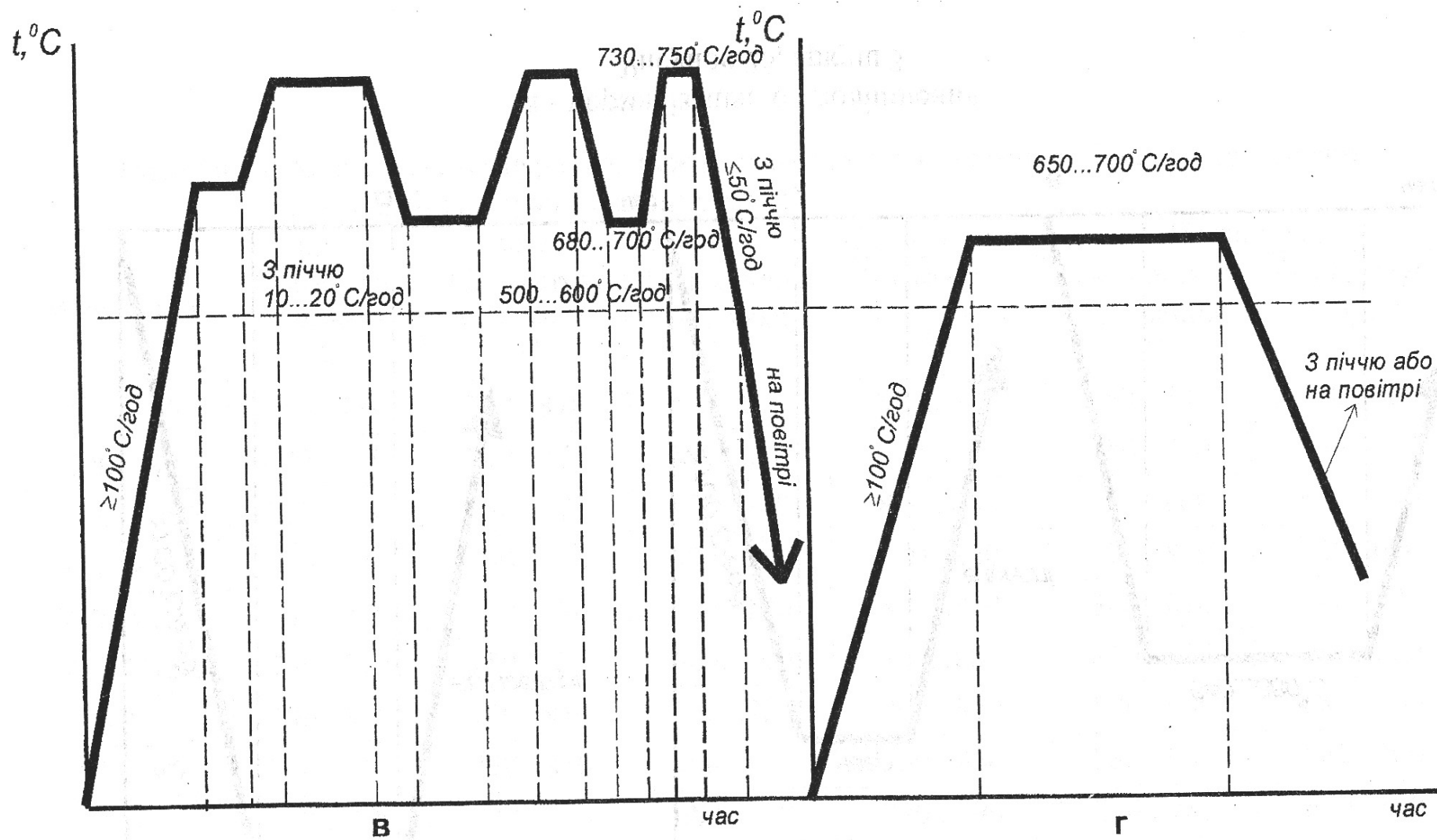
До цієї групи сталей відносяться сталі У7...У13 (У7А...У13А). Основні режими попередньої термічної обробки приведені на рис.25 і в табл.5.

Для сталей У7 і У8 використовують неповний та ізотермічний відпал. Тривалість видержки після нагрівання всієї садки до температури відпалу: при неповному відпалі - 4...5 годин, при ізотермічному відпалі - 1...2 години. Ізотермічна видержка при охолодженні - 1...2 години.

Для інших сталей використовують повний та ізотермічний відпал. Тривалість видержки після нагрівання всієї садки до температури відпалу - 1...2 години. Ізотермічна видержка при охолодженні - 1...2 години.

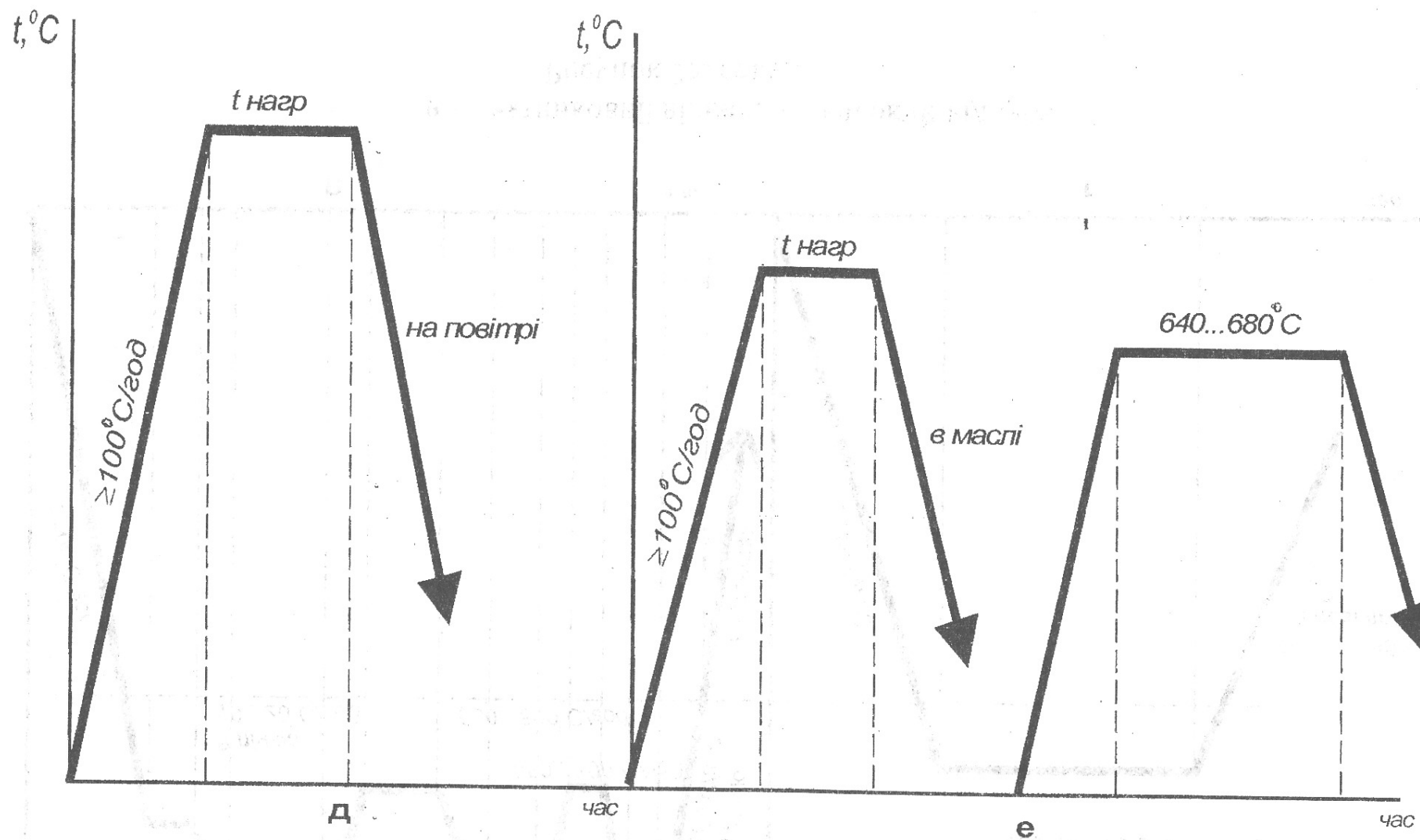


а - відпал з безперервним охолодженням; б - ізотермічний відпал  
 Рисунок 25, аркуш 1 – Графік типової технології попередньої термообробки  
 виробів з вуглецевих та легованих сталей



в - маятниковий відпал; г - високий відпуск

Рисунок 25, аркуш 2



д - нормалізація; е - поліпшення

Рисунок 25, аркуш 3

Таблиця 5 – Характерні температури режимів попередньої термічної обробки вуглецевих і легованих інструментальних сталей

Марка сталі	Відпал	Ізотермічний відпал		Нормалізація	Поліпшення	
	Температура нагрівання, °C	Температура нагрівання, °C	Ізотермічна видержка, °C	Температура нагрівання, °C	Температура гартування, °C	Температура відпуску, °C
У7, У7А	690...710	790...810	650...680	800...820	780...800	640...680
У8, У8А	690...710	740...760	650...680	760...780	780...800	640...680
У10, У10А	750...770	750...770	680...700	830...850	750...800	640...680
У11, У11А	750...770	750...770	680...700	840...860	790...800	640...650
У12, У12А	750...770	750...770	680...700	850...870	800...820	640...680
У13, У13А	750...770	750...770	680...700	860...880	810...830	640...680
9ХС	790...810	790...810	700...720	900...920	880...900	680...700
ХГСВФ	790...810	790...810	700...720	900...920	880...900	680...700
ХВГ	770...790	770...790	680...700	970...990	840...860	660...680



Сфероїдизацію (маятниковий відпал) використовують для отримання структури зернистого перліту. Тривалість видержки на кожній ступені 0,5...1 година.

Високий відпуск слід використовувати для зняття наклепу після холодної пластичної деформації (так званий рекристалізаційний відпал); для зняття внутрішніх напружень від обробки різанням, що передує гартуванню; перед повторним гартуванням виробів, які мають понижену твердість після термічної обробки. Тривалість видержки при високому відпуску - 2...3 години після нагрівання всієї садки.

Нормалізацію використовують для подрібнення зерна перегрітої сталі та для усунення сітки цементиту. Нагрівання при нормалізації може проводитись у печах і соляних ваннах.

Покращання використовують для отримання підвищеної чистоти поверхні при обробці різанням у тих випадках, коли сталь у відпаленому стані має твердість  $HB < 183$ .

### ***6.1.2 Попередня термічна обробка ледебуритних інструментальних сталей***

Ледебуритні інструментальні сталі мають підвищену зносостійкість. До них належать високохромисті сталі Х6ВФ, Х12МФ і швидкоріжучі сталі Р18, Р6М5 та інші.

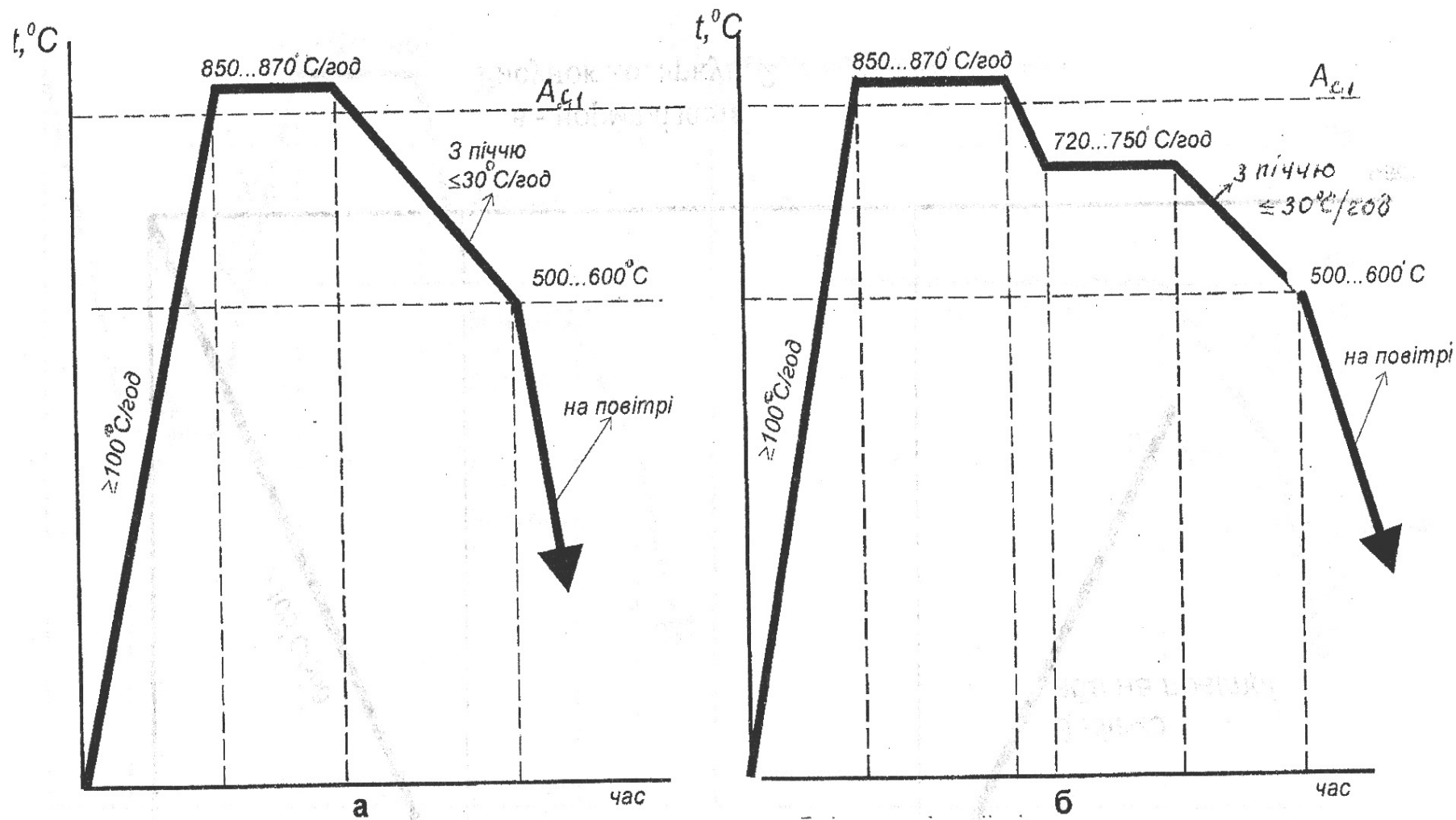
Попередня термічна обробка високохромистих сталей включає відпал з безперервним охолодженням, ізотермічний відпал, високий відпуск (рис. 26).

Тривалість видержки після нагрівання всієї садки до температури термообробки - 1...2 години. Ізотермічна видержка при охолодженні - 3...4 години.

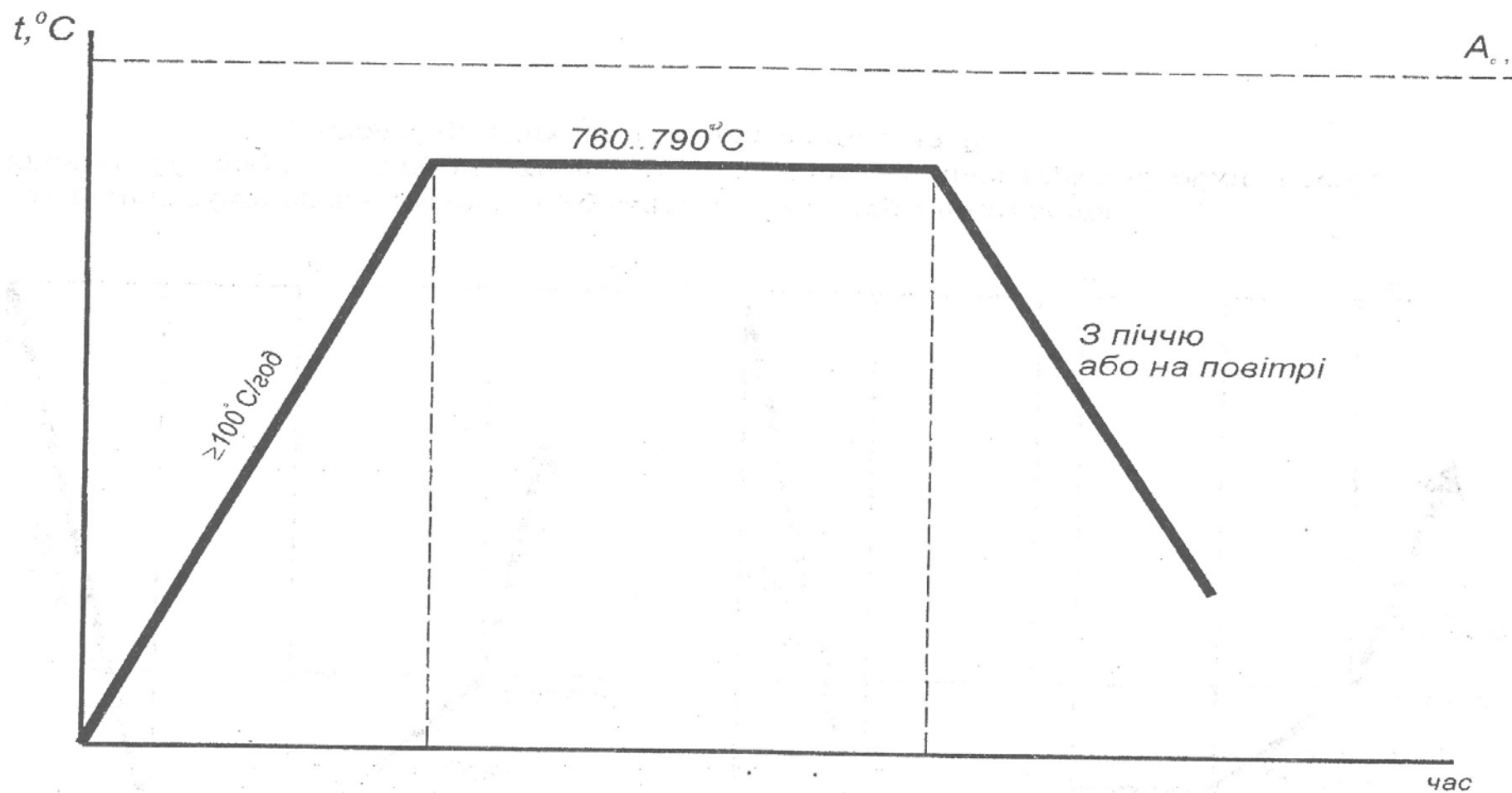
При необхідності отримання більш низької твердості сталь після відпалу піддають додатково високому відпуску; тривалість видержки - 2...3 години після нагрівання всієї садки.

Попередня термічна обробка швидкоріжучих сталей включає до свого складу ізотермічний відпал після гарячої механічної обробки і зварювання, високий відпуск для поліпшення деформування у холодному стані, який проводиться після відпалу, обробку для поліпшення чистоти поверхні при різанні, обробку перед повторним загартуванням (рис. 27).

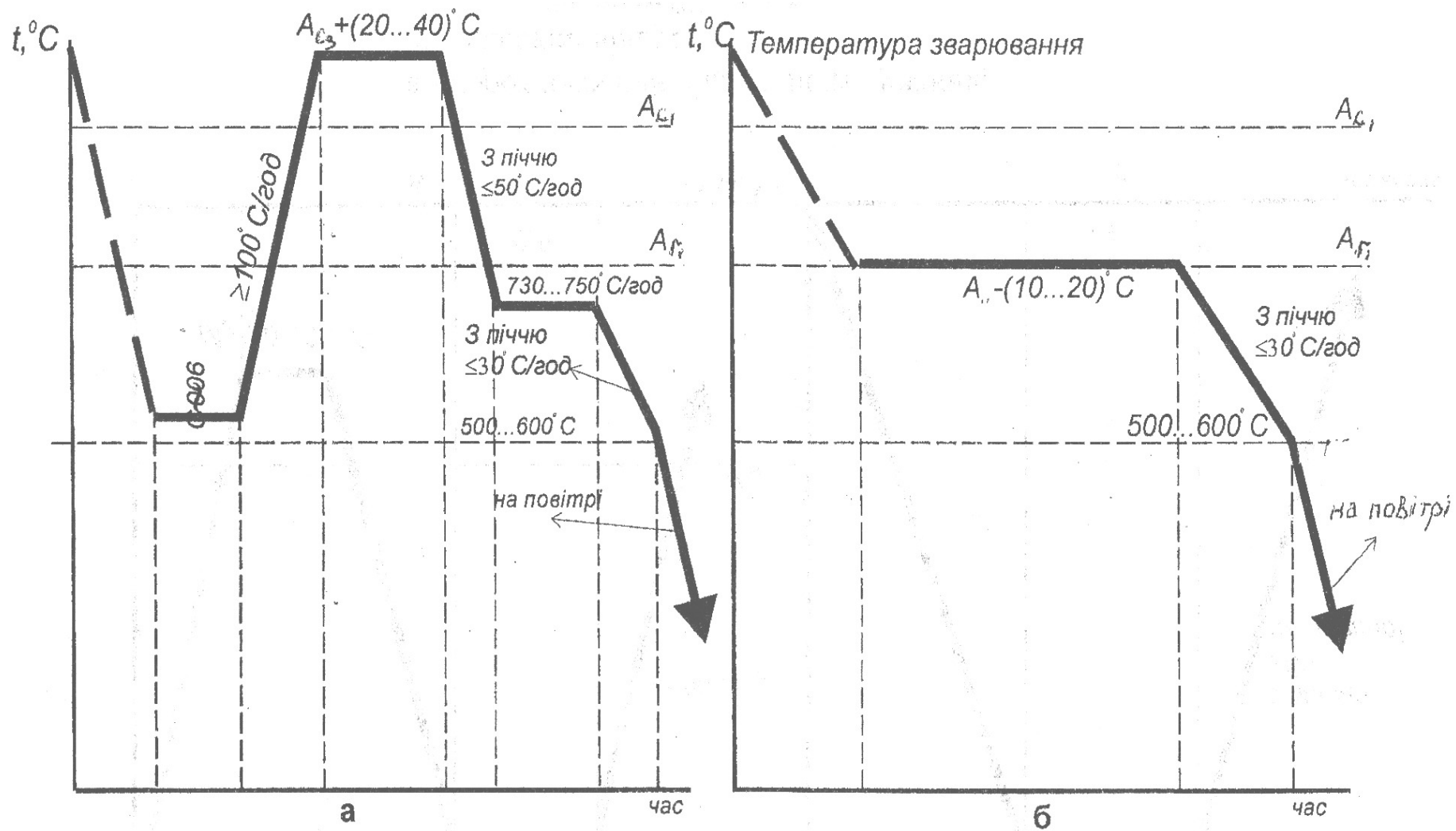
Швидкість нагрівання при відпалі у печах не більше  $100^{\circ}$  за годину. Тривалість видержки після нагрівання всієї садки до



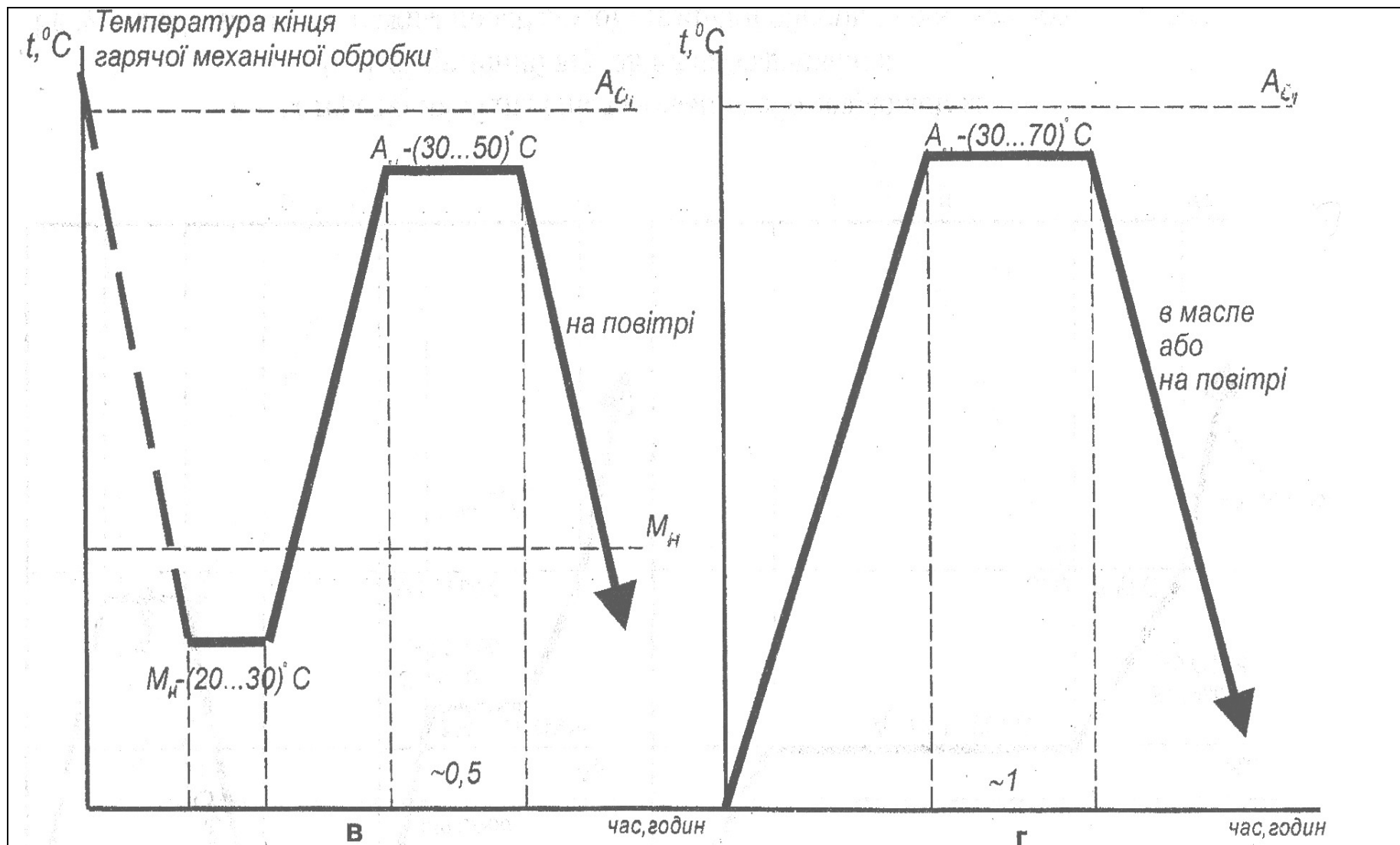
а - відпал з безперервним охолодженням; б - ізотермічний відпал  
 Рисунок 26, аркуш 1 – Графік типової технології попередньої термообробки виробів  
 з ледебуритних інструментальних сталей



в - нормалізація  
Рисунок 26, аркуш 2

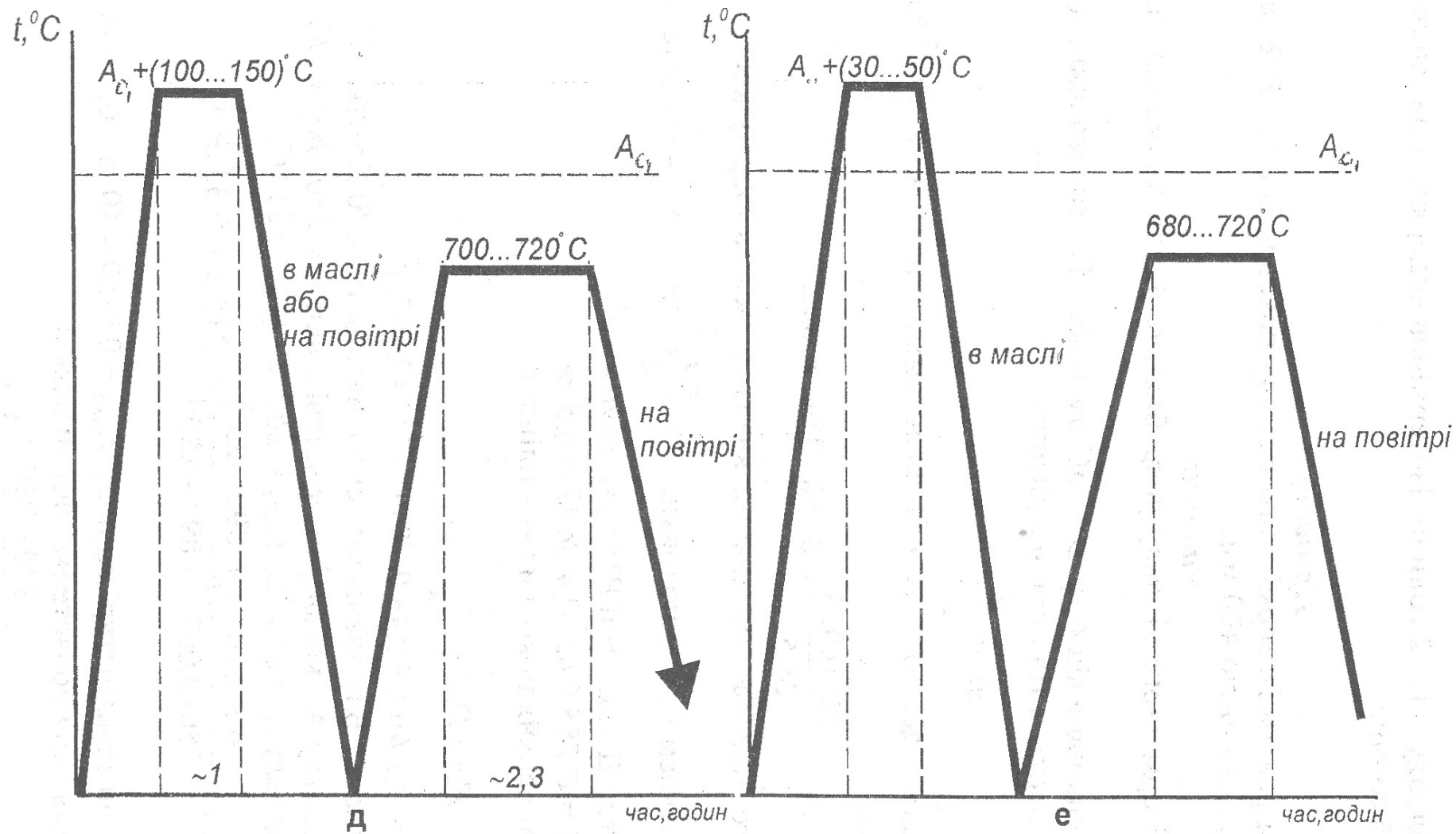


а - ізоермічний відпал після кування або зварювання; б - ізоермічний відпал після зварювання  
Рисунок 27, аркуш 1 – Режим попередньої термічної обробки швидкоріжучих сталей



в - короточасний відпал після кування; г - високий відпуск

Рисунок 27, аркуш 2



д - обробка для поліпшення чистоти поверхні; е - обробка перед повторним гартуванням

Рисунок 27, аркуш 3

температури відпалу - 1...2 години. Ізотермічна видержка при охолодженні - 4...6 годин.

### Приклад 12

Розробити режим ізотермічного відпалу поковок із сталі Р18 діаметром 50 мм, довжиною 400 мм.

#### Рішення

Режим ізотермічного відпалу розробляємо, йдучи двома шляхами.

1 Розрахунковий діаметр  $D_n = 50$  мм (табл. 1). Визначаємо, до якого типу відноситься тіло при нагріванні.

$$Bi = \frac{\alpha R}{\lambda}.$$

За таблицями додатків А і Б визначаємо  $\alpha = 180 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ,  $\lambda = 28,5 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ .

$$Bi = \frac{180 \cdot 0,025}{28,5} = 0,158. \text{ Тіло тонке.}$$

Для такого тіла час нагрівання визначається за формулою (7).

Для цього визначаємо масу поковки:  $G = \frac{\pi D_n^2}{4} \ell \rho$ , де  $\rho$  - густота за таблицею додатку Д для сталі Р18:  $\rho = 8690 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

$$G = 0,785 \cdot 0,05^2 \cdot 0,4 \cdot 8690 = 6,8 \text{ кг.}$$

Активна поверхня поковки (як циліндра)

$$F = \pi D_n \ell + \frac{\pi D_n^2}{4} 2;$$

$$F = 3,14 \cdot 0,05 \cdot 0,4 + 0,785 \cdot 0,0522 = 0,067 \text{ м}^2.$$

За таблицею додатку Б визначаємо теплоємність:  $c = 670 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ .

За таблицею додатку А - коефіцієнт тепловіддачі:  $\alpha = 250 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

Температура відпалу  $t_{\text{в}} = 890^\circ \text{C}$ ;  $t_{\text{м.кін}} = 880^\circ \text{C}$ ;  $t_{\text{м.поч}} = 25^\circ \text{C}$ .

$$\text{Час нагрівання } \tau = \frac{6,8 \cdot 670}{250 \cdot 0,067} \ln \left( \frac{890 - 25}{890 - 880} \right) = 1213 \text{ с} = 0,33 \text{ год} = 0,4 \text{ год.}$$

Час видержки при температурі відпалу  $\tau_{\text{вид}} = 0,8 \cdot 50 = 40 \text{ хв} = 0,7 \text{ год.}$

Час охолодження до ізотермічної видержки

$$\tau_{\text{вид}} = \frac{880 - 730}{50} = 3 \text{ год.}$$

Час видержки до повного розпаду аустеніту згідно з діаграмою ізотермічного розпаду аустеніту сталі Р18 при температурі 730°C складає  $15000\text{ с} = 4,2\text{ год} \approx 4,5\text{ год}$ .

Час охолодження з піччю після ізотермічної видержки

$$\tau_{\text{охол}} = \frac{730 - 600}{30} = 2,3\text{ год} \approx 2,5\text{ год}.$$

Час охолодження на повітрі

$$\tau_{\text{охол}} = \frac{600 - 25}{350} = 1,6\text{ год} \approx 2,5\text{ год}.$$

Розроблена технологія ізотермічного відпалу приведена на рис.28. Загальна тривалість відпалу однієї поковки складає 12,7 годин.

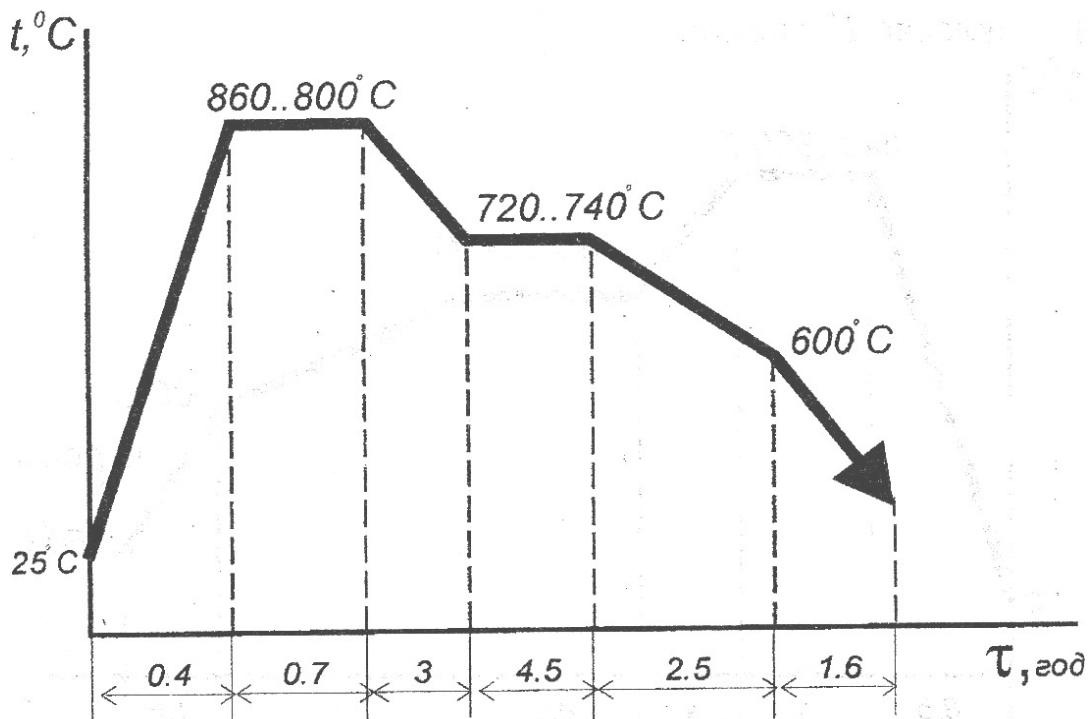


Рисунок 28 – Графік технології ізотермічного відпалу поковки зі сталі Р18 діаметром 50 мм, довжиною 400 мм

2 У разі, коли мова йде про велику кількість поковок, нагрівання ведуть зі швидкістю  $\leq 100\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{годину}$  (див. рис. 27,а).

$$\tau_{\text{нагр}} = \frac{850 - 25}{100} = 8,25\text{ год} \approx 8,5\text{ год}.$$

Температуру відпалу призначають  $A_{c1} + (20...40)\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Для сталі Р18  $A_{c1} = 820\text{ }^{\circ}\text{C}$ , отже  $t_g = 820 + (20...40)\text{ }^{\circ}\text{C} = 840...860\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



Температура ізотермічної видержки, яка пов'язана з перетворенням переохолодженого аустеніту, мусить бути такою, як у попередньому розрахунку.

Охолодження до температури ізотермічної видержки, а також після ізотермічної видержки в пічі, можливі також такі, як у попередньому розрахунку. Охолодження більшої садки металу з температури 600 °С на повітрі буде проходити з меншою швидкістю ( $\approx 250^\circ\text{C}/\text{год}$ ) і час його буде складати

$$\tau_{\text{охол}} = \frac{600 - 25}{250} = 2,3 \text{ год.}$$

Загальний вигляд ізотермічного відпалу для великої садки поковок із сталі Р18 наведений на рис. 29.

Загальна тривалість відпалу великої садки поковок (наприклад, 100 шт.) складає 22 години.

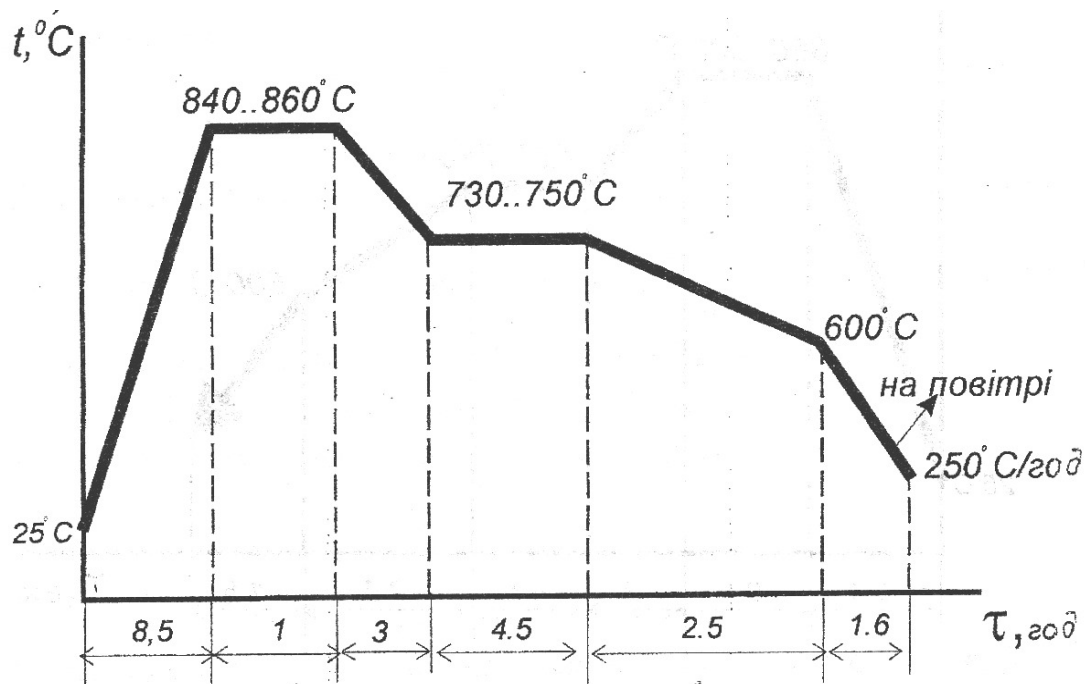


Рисунок 29 – Графік технології ізотермічного відпалу великої садки поковок із сталі Р18

### **6.1.3 Попередня термічна обробка штампових сталей гарячого деформування**

До штампових сталей гарячого деформування відносяться сталі 5ХНМ, 5ХНВ, 5ХГМ, 4Х5МФС, 4Х2В5МФ, 3Х2В8Ф та інші, які піддаються відпалу з метою подрібнення структури крупних заготовок,

мало деформованих при куванні або катанні, а також з метою запобігання утворенню флокенів. Типовий режим такого відпалу приведений на рисунку 12.

## 6.2 Остаточна термічна обробка інструментальних сталей

Остаточною термічною обробкою для інструментальних сталей є гартування з відпуском. Найбільш важливою операцією є гартування, при якому нагрівання інструменту до температури гартування повністю або частини його, велике значення має видержка при температурі нагрівання. Через це для інструментів тривалість нагрівання рекомендують визначати за формулою

$$\tau = WK, \quad (14)$$

де  $W$ - геометричний показник, який залежить від форми та розмірів тіла, що нагрівається, виражається у сантиметрах (табл.6);

$K$  – підсумковий фізичний фактор, який враховує умови нагрівання (додаток Л).

Таблиця 6 – Формули для обчислювання геометричного показника  $W$  тіл простої форми

Форма тіла	Формула $W = \frac{V}{F}$ , см (15)
Суцільний циліндр, який нагрівається з усіх сторін	$\frac{D\ell}{4\ell + 2D}$ (16)
Суцільний циліндр, який нагрівається з одного кінця	$\frac{DL}{4\ell_1 + D}$ (17)
Порожнистий циліндр, який нагрівається з усіх сторін	$\frac{(D-d)\ell}{4\ell + 2(D-d)}$ (18)
Прямокутна пластина, яка нагрівається з усіх сторін	$\frac{Ba\ell}{2(B\ell + Ba + a\ell)}$ (19)
Куля	$D/6$ (20)
Куб	$B/6$ (21)
Пряма призма у вигляді квадрата, рівнобічного трикутника або правиль-	$\frac{D_1\ell}{4\ell + 2D_1}$ (22)

ного шестикутника	
-------------------	--

Умовні позначення:

$V$  – об’єм тіла,  $\text{см}^3$ ;

$F$  – площа поверхні тіла,  $\text{м}^2$ ;

$D$  – зовнішній діаметр,  $\text{см}$ ;

$d$  – внутрішній діаметр,  $\text{см}$ ;

$D_I$  – діаметр кола, яке вписане у даний багатогранник,  $\text{см}$ ;

$\ell$  – повна довжина тіла,  $\text{см}$ ;

$\ell_1$  – довжина тіла, що нагрівається,  $\text{см}$ ;

$v$  – ребро куба, товщина пластини,  $\text{см}$ ;

$a$  – ширина пластини,  $\text{см}$ .

Одержані значення  $\tau$  відповідають тривалості нагрівання та ви-  
держки.

При підрахуванні  $W$  інструментів складної форми вводиться по-  
правка на його конфігурацію:

$$D_{\text{розрах}} = D - h,$$

якщо ріжуча частина інструменту розміщена зовні, та

$$D_{\text{розрах}} = d + h,$$

якщо ріжуча частина розміщена всередині інструменту;

де  $D$  – зовнішній діаметр інструменту,  $\text{см}$ ;

$d$  – внутрішній діаметр інструменту,  $\text{см}$ ;

$h$  – глибина канавки для виведення стружки (незалежно від  
кількості канавок, якщо їх число більше 2).

### ***6.2.1 Типова технологія остаточної термічної обробки ріжучих інструментів із вуглецевих і легованих сталей***

В залежності від розрахункової товщини (діаметра) ріжучі ін-  
струменти із вуглецевих і легованих сталей нагрівають до температу-  
ри гартування з підігріванням і без нього. Підігрівання призначається  
при температурі  $600...650^\circ\text{C}$ , якщо розрахункова товщина перевищує  
20 мм.

Графік технології остаточної термічної обробки інструментів із  
вуглецевих і легованих сталей приведений на рис. 30.

### ***Приклад 13***

Розробити технологію остаточної термічної обробки зенкерів і  
розверток для наскрізних та глухих отворів.

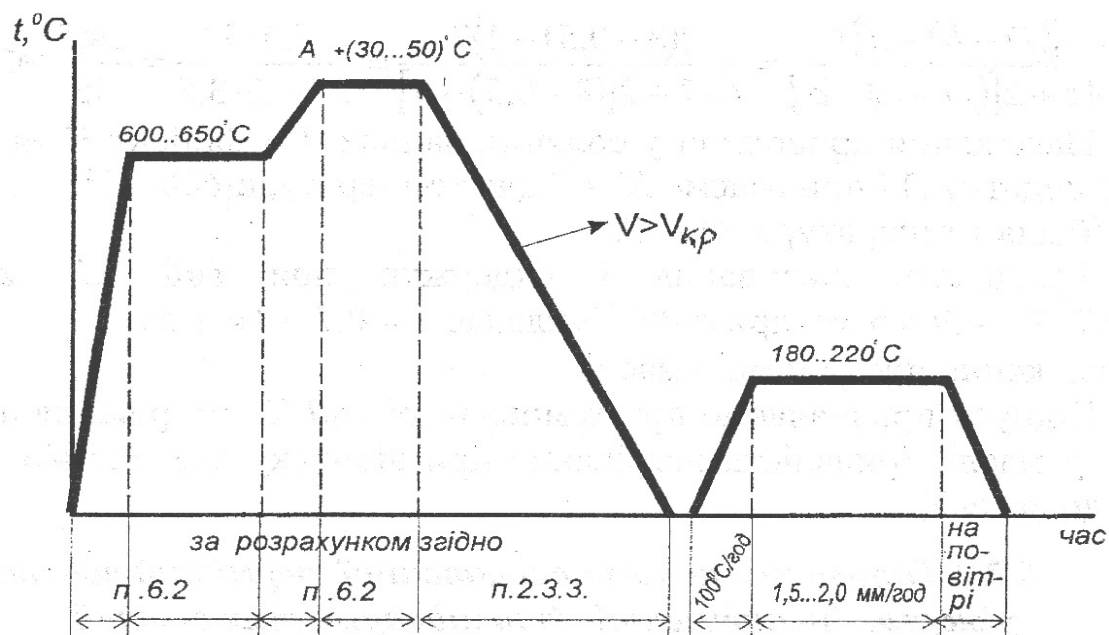


Рисунок 30 – Графік типової технології остаточної термообробки інструментів з вуглецевих та легованих сталей

Марка сталі: ХВГ. Зовнішній діаметр  $D = 80$  мм, внутрішній діаметр  $d = 40$  мм, довжина  $\ell = 70$  мм, глибина канавки  $h = 5$  мм. HRC 61...64.

### Рішення

Призначаємо температуру гартування  $A_{c1} + (30...50)^\circ\text{C} = 750 + (30...50) = 780...800^\circ\text{C}$ . Враховуючи дослідницьку практику, відому з літератури, приймаємо температуру гартування для цієї сталі  $820...850^\circ\text{C}$ . Розрахункова товщина складає

$$B = \frac{D - d}{2} = \frac{80 - 40}{2} = 20 \text{ мм.}$$

Призначаємо підігрівання при температурі  $600^\circ\text{C}$ .

Час нагрівання і видержки при  $600$  і  $850^\circ\text{C}$  визначаємо з формули (14):  $\tau = WK$ .

$W$  визначаємо з формули (18), вважаючи, що наш інструмент являє собою порожнистий циліндр, який нагрівається з усіх сторін:

$$W = \frac{(D - d)\ell}{4\ell + 2(D - d)}.$$

Замість  $D$  приймаємо  $D_{\text{розр}}$  із формули (23), враховуючи те, що ріжуча частина інструменту розміщена зовні.

$$W = \frac{\{(D-h)-d\}\ell}{4\ell + 2[(D-h)-d]} = \frac{\{(8-0,5)-4\}7}{4 \cdot 7 + 2[(8-0,5)-4]} = \frac{3,5 \cdot 7}{28 + 2 \cdot 3,5} = \frac{24,5}{35} = 0,7 \text{ см.}$$

Нагрівання проводили у соляних ваннах. Коефіцієнт  $K$  визначаємо з додатку Л і приймаємо  $K = 7$  для температури  $600^\circ\text{C}$  і  $K = 10$  для температури  $850^\circ\text{C}$ .

Тривалість нагрівання і видержки при  $600^\circ\text{C}$  складає  $\tau = 0,7 \cdot 7 = 4,9 \approx 5 \text{ хв}$ , при  $850^\circ\text{C}$  складає  $\tau = 0,7 \cdot 10 = 7 \text{ хв}$ .

Охолодження проводимо у маслі.

Відпуск призначаємо при температурі  $180^\circ\text{C}$ , нагрівання проводимо у маслі, тривалість нагрівання при відпуску визначаємо з таблиці додатку Е.

### ***6.2.2 Типова технологія остаточної термічної обробки ріжучих інструментів із швидкоріжучих сталей***

Залежно від розрахункової товщини (діаметра) ріжучі інструменти із швидкоріжучих сталей нагрівають до температури гартування з одноразовим і дворазовим підігріванням. Дворазове підігрівання при  $600...650$  та  $800...850^\circ\text{C}$  призначається, якщо розрахункова товщина перевищує  $20 \text{ мм}$ .

Графік технології термічної обробки інструментів із швидкоріжучих сталей наведений на рис. 31.

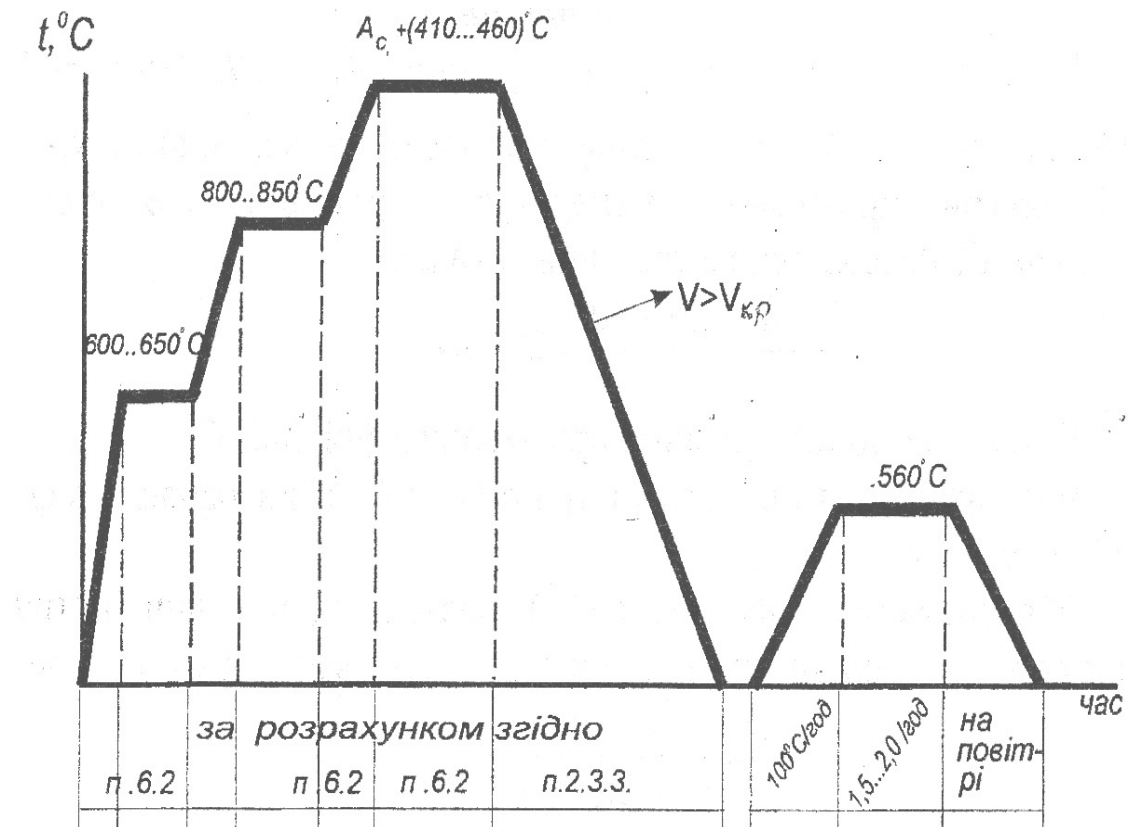


Рисунок 31- Графік типової технології остаточної термообробки інструментів із швидкоріжучих сталей

Відпуск після гартування повторюють 2...3 рази до зберігання у структурі сталі не більше 5% залишкового аустеніту.

### Приклад 14

Розробити технологію гартування з відпуском свердла із сталі P18 діаметром 50 мм, довжиною ріжучої частини 255 мм. Загальна довжина свердла - 440 мм, глибина канавки - 15 мм.

### Рішення

Приймаємо, що свердло є суцільний циліндр, який нагрівається з одного кінця, а через це розрахунки нагрівання і видержки ведемо, користуючись формулами (14) і (17). Нагрівання проводимо у соляних ваннах. Згідно з літературними рекомендаціями [5] розрахунковий перетин для свердла приймається рівним половині діаметра свердла. У нашому випадку цей перетин складає 25 мм, а через це свердло до температури нагрівання нагріваємо з двома підігріваннями при 600 і 800 °C. Температуру гартування приймаємо 1270...1290 °C ( $A_{c1} = 820$  °C).

Визначаємо  $W$  з формули (17)

$$W = \frac{DL}{4\ell_1 + D} = \frac{(D-h)L}{4\ell_1 + (Dh)} = \frac{(5,0-1,5)44}{4 \cdot 25,5 + (5,0-1,5)} = \frac{3,5 \cdot 4,4}{4 \cdot 25,5 + 3,5} =$$

$$= \frac{154}{105,5} = 1,5 \text{ см.}$$

Користуючись формулою (14) і таблицею додатку, знаходимо: час нагрівання і видержки при  $600^\circ\text{C}$  складає  $7,5 \cdot 1,5 = 10,5 \text{ хв}$ ; при  $800^\circ\text{C}$  -  $13 \cdot 1,5 - 7 \cdot 1,5 = 9 \text{ хв}$ ; при  $1280^\circ\text{C}$  -  $5 \cdot 1,5 = 7,5 \text{ хв}$ .

Необхідно відмітити, що нагрівання і видержку при другому підігріванні слід призначати з врахуванням нагрівання і видержки при першому підігріванні, як це показано на прикладі відносно температури  $800^\circ\text{C}$ .

Критична швидкість гартування за формулою (12) складає

$$V_{кр} = \frac{t_H - t^*}{\tau^*} = \frac{1290 - 750}{100} = 5,4^\circ\text{C}/\text{с.}$$

Приймаємо гартування у мінеральному маслі.

Тривалість видержки у маслі визначаємо за формулою (13), приймаючи, що активна поверхня свердла складає  $F = 0,067 \text{ м}^2$ , маса  $G = 6,8 \text{ кг}$ , теплоємність  $c = 670 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$ . Коефіцієнт тепловіддачі при охолодженні у маслі  $\alpha = 400 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{K}$  (таблиця додатку А).

$$\tau = \frac{6,8 \cdot 670}{400 \cdot 0,067} \ln \left( \frac{20 - 1280}{20 - 100} \right) = 458 \text{ с} = 7,8 \text{ хв} = 10 \text{ хв.}$$

Режим відпуску (нагрівання в печі):

час нагрівання за формулою (7) при коефіцієнтах  $c = 548 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$ ,  $\alpha = 90 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{K}$  (таблиці додатків А і Б),  $t_c = 570^\circ\text{C}$ ,  $t_{м.поч} = 25^\circ\text{C}$ .

$$\tau = \frac{6,8 \cdot 548}{90 \cdot 0,067} \ln \left( \frac{570 - 25}{570 - 560} \right) = 2493 \text{ с} \approx 41 \text{ хв} \approx 40 \text{ хв.}$$

Час охолодження (з розрахунку швидкості охолодження

$$6^\circ\text{C}/\text{хв}) \tau_{охол} = \frac{560 - 25}{6} = 79 \text{ хв} \approx 80 \text{ хв.}$$

### **6.2.3 Типова технологія остаточної термічної обробки штампів холодного і гарячого формування металу**

Залежно від розрахункової товщини (діаметра) штампів пуансонів і матриць для холодного і гарячого деформування металу їх нагрівають до температури гартування з одноразовим підігріванням або

без нього. Одноразове підігрівання призначається при  $600...650\text{ }^{\circ}\text{C}$ , якщо розрахункова товщина перевищує  $20\text{ мм}$ .

Режим остаточної термічної обробки штампів для холодного і гарячого деформування металу приведений на рис. 32 та в табл. 7, 8.

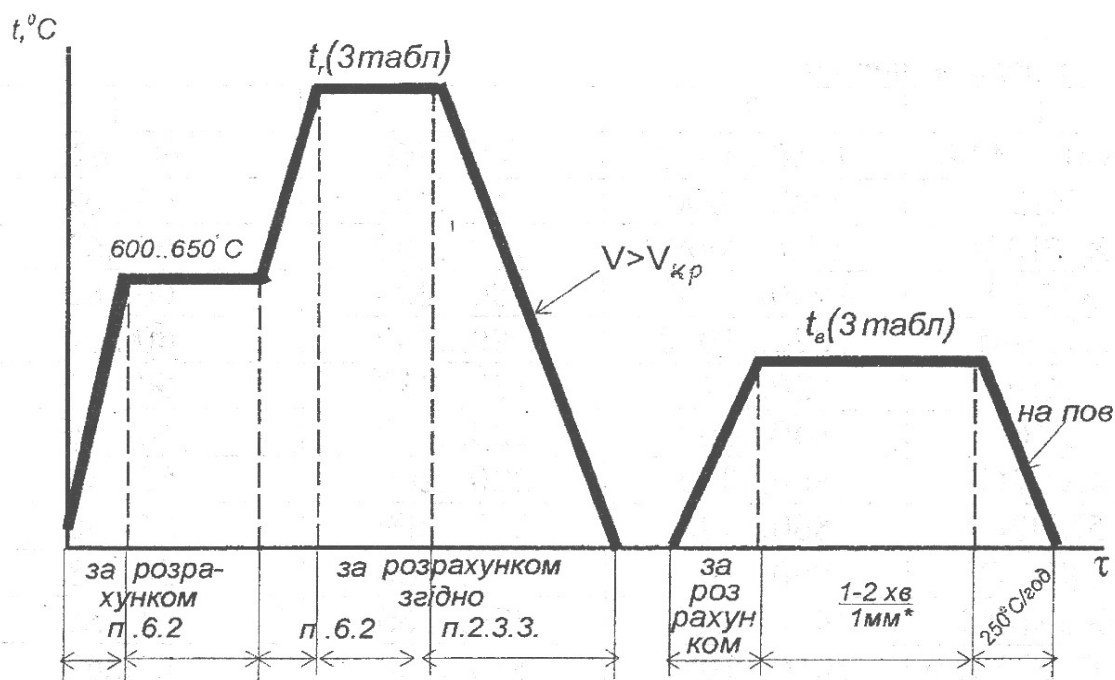
#### **6.2.4 Типова технологія остаточної термічної обробки інструментів із високохромистих ледебуритних сталей**

Високохромисті ледебуритні сталі типу Х6ВФ, Х12МФ використовуються для виготовлення штампів холодного деформування, які працюють в умовах незначного (до  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) і значного (до  $300...350\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) розігрівання робочої кромки.

У першому разі для них призначають гартування з відпуском на первинну твердість, у другому – на вторинну твердість.

Графік типової технології термічної обробки інструментів на первинну твердість приведений на рис. 33.

Підігрівання призначається для інструментів, якщо розрахункова товщина перевищує  $20\text{ мм}$ .



1 мм\* - розрахунковий перетин

Рисунок 32- Графік типової технології остаточної термічної обробки штампів для холодного та гарячого деформування

Таблиця 7 – Температурні режими остаточної термічної обробки штампів сталей холодного деформування



Марка сталі	Температура, °C		<i>HRC</i>
	гартування $t_2$	відпуску $t_6$	
1	2	3	4
У8	760	150...170	62...63
У9	780	150...170	62...63
У12	780	150...170	62...63
11ХФ	840...860	150...170	62...63
ХВЧ	820...840	140...170	62...65
90Х	820...850	160...180	59...61
90ХС	840...860	160...180	58...62
ХГС	820...860	150...160	61...63
ХВСТ	840...860	140...160	60...62
Х6ВФ	980...1000	150...170	60...63
Х6Ф4М	980...1020	160...180	61...62
6Х6В3МФ	980...1020	160...180	61...62

Продовження табл. 7

1	2	3	4
8X4B3M3Φ	1150...1170	540...560	60...62 <sup>*</sup>
X12	950...1000	180...200	60...62
X12MΦ	950...1000	190...200	60...62
X12Φ1	1050...1100	180...200	60...62
X12BM	1020...1040	180...200	60...62
9XBΓ	820...840	170...230	60...62
6XC	840...860	220...260	54...56
4XB2C	860...900	220...260	52...54
5XB2C	860...900	220...260	54...56
6XB2C	860...900	220...260	54...58
6X3MΦC	980...1020	220...260	54...56
8X4B2C2MΦ	1060...1090	540...560	62...63 <sup>*</sup>

\* При гартуванні на вторинну твердість, відпуск повторюють 2...3 рази.

Таблиця 8- Температурні режими остаточної термічної обробки штампових сталей для гарячого деформування металу

Марка сталі	Температура, °C		
	гартування $t_2$	відпуску $t_6$ на <i>HRC 50...45</i>	відпуску $t_6$ на <i>HRC 45...40</i>
1	2	3	4
5XHM	830...860	420...500	500...550
5XHB	840...850	420...480	480...550
5XHBC	860...880	480...540	540...560
5XΓM	820...850	420...500	500...540
4XHMΦC	940...960	460...520	520...540
5X2HMΦ	960...980	480...540	540...560
4XMΦC	920...930	500...550	550...600
4X5MΦC	1000...1020	550...590	590...620
3X2B8Φ	1075...1125	590...620	620...640
4X2B5MΦ	1060...1080	600...640	600...640
5X3B3MΦC	1120...1140	610...650	650...680
4X2B2ΦC	1080...1100	610...640	640...680
4X5B2ΦC	1030...1050	570...600	600...620
4X4BMΦC	1050...1070	600...640	640...670
4X3BMΦ	1040...1060	580...620	620...650

Продовження табл. 8

1	2	3	4
3X3M3Ф	1030-1050	560-580	580-600
4X5MΦC	1020-1040	570-600	600-630
7X3	850-880	460-490	490-530
8X3	850-880	520-560	560-600

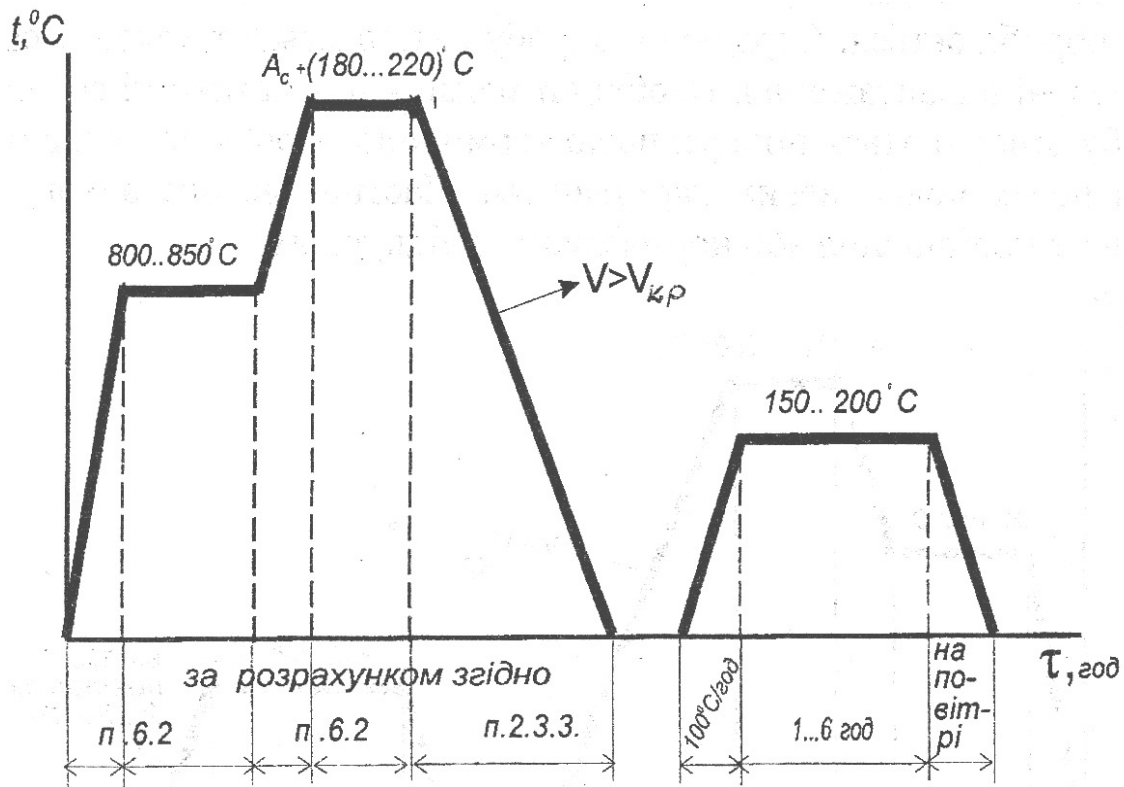


Рисунок 33 – Графік типової технології остаточної термічної обробки інструментів з високохромистих ледебуритних сталей на первинну твердість

Графік типової технології термічної обробки інструментів на вторинну твердість наведений на рис. 34.

Відпуск після гартування повторюють 2...3 рази до зберігання в структурі сталі не більше 5% залишкового аустеніту.

Гартуванню на вторинну твердість піддають в основному сталі з 12% Cr.

Конкретні дані з температур гартування і відпуску для деяких марок високохромистих сталей приведені у табл. 8.

## 7 ПОВЕРХНЕВЕ ГАРТУВАННЯ З ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВАННЯ

### 7.1 Загальні положення

При поверхневому гартуванні на деяку (задану) глибину загартовується тільки поверхневий шар, тоді як серцевина виробу залишається незагартованою. Основне призначення поверхневого гартування – підвищення твердості, зносостійкості та межі витривалості виробу, який оброблюється. Серцевина виробу залишається в'язкою і сприймає ударні навантаження. Необхідні механічні властивості серцевини виробу створюються попередньою термічною обробкою, яка виконується перед поверхневим гартуванням. Частіше всього виконується термічне поліпшення або нормалізація з відпуском.

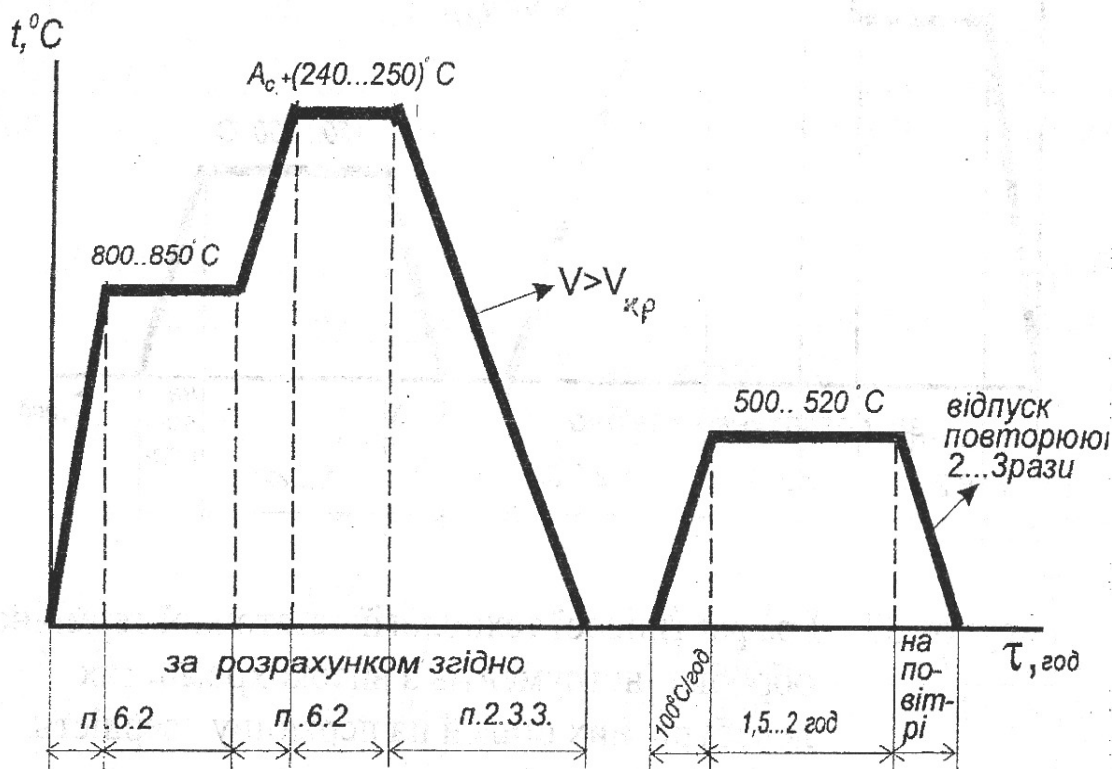


Рисунок 34- Графік типової технології остаточної термічної обробки інструментів з високохромистих ледебуритних сталей на вторинну твердість

Поверхневому індукційному гартуванню піддають вуглецеві сталі, що містять  $0,4 \dots 0,5\% \text{ C}$ , які після гартування мають високу твердість (HRC 55...62) і опір зносу, рідше – леговані сталі (хромисті 35X, 40X, 45X), хромонікелеві (40XH) або хромонікельмолібденові (40XHM). Особливу групу складають валкові сталі, які застосовують

для виготовлення валків холодного прокатування, а також піддають поверхневому гартуванню з індукційного нагрівання (сталі 9Х, 9ХФ, 9ХФС, 9Х2, 9Х2МФ, 9Х2В, 9Х2СВФ, 60Х2СМФ).

Після гартування з індукційного нагрівання вироби піддають низькому відпуску при 180...220 °С (див. рис. 29 – відпуск).

Вибір оптимальної товщини шару, що зміцнюється, визначається умовами роботи деталі. Глибина загартованого шару мілких деталей, що працюють тільки на зношення, складають 1,5...3,0 мм; в умовах високих контактних тисків і можливої перешліфовки виробів глибина загартованого шару призначається в межах 4,0...5,0 мм. У випадку особливо великих контактних навантажень (наприклад, для валків холодного прокатування) товщина загартованого шару досягає 10...15 мм. Вважають, що площа перерізу, яка загартовується, повинна бути в межах 0,15...0,20 площі всього перерізу.

Технологічно глибина загартованого шару визначається частотою струму, що застосовується, а умови нагрівання (температура і швидкість) визначаються питомою потужністю струму, що підводиться. Вона повинна складати 0,35...0,50 кВт/см<sup>2</sup>; глибина загартованого шару пов'язана з частотою електричного струму формулою

$$\delta = 5,05 \cdot 10^4 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}, \quad (23)$$

де  $\delta$  - глибина проникнення струму, мм;

$\rho$  - питомий електричний опір;

$\mu$  - магнітна проникність;

$f$  - частота струму, Гц.

Орієнтовно для вибору частоти струму  $f$  при встановленні режиму гартування сталі можна користуватись таким співвідношенням:

$$\delta = \frac{50}{\sqrt{f}}. \quad (24)$$

## **7.2 Основні підходи до розробки технології поверхневого гартування з індукційного нагрівання**

Це завдання зводиться до вирішення таких технологічних задач:

1 Встановити потрібну глибину шару (якщо вона не задана технічними умовами на виготовлення виробу).

2 Знаючи потрібну глибину загартованого шару, користуючись формулою (17), встановити орієнтовно потрібну частоту електрично-

го струму, що є підставою для вибору потрібного нагрівального обладнання (генератора струму високої частоти).

3 Визначивши потрібну частоту електричного струму, вибрати генератор струму, користуючись даними, що наведені в табл. 9 і 10.

Таблиця 9 - Технічні характеристики машинних генераторів для нагрівання токами високої частоти

Показники	Типи перетворювача			
	ПВ 50/2500	ПВС 100/2500-1	ПВ 100/8000-IV	ВГО 500/2500
Потужність, кВт	50	100	100	500
Напруга, Вт	750/375	750/375	750/375	1000/500
Сила струму, А	74/148	148/296	148/296	500/1000
Частота струму, Гц	2650	2650	8000	2500

Таблиця 10 – Технічні характеристики лампових генераторів для нагрівання струмами високої частоти

Показники	Типи установок					
	ЛГЗ 10-А	ЛПЗ-37	ЛПЗ-67	ЛЗ-107	ЛЗ-207	ЛПС-500
Робоча частота струму, кГц	300...450	1...10	60...74	60...74	60...74	6000...9000
Номінальна потужність, кВт	10	30	60	100	200	500

4 Номінальна потужність вибраного нагрівального пристрою служить підставою для визначення способу індукційного гартування (одночасний, послідовний, безперервно-послідовний), а також габаритів індуктора. Підставою для такого розрахунку служить умова швидкого нагрівання: питома електрична потужність, тобто потужність струму, що приходить на кожний квадратний сантиметр деталі, яка нагрівається. Виходячи з цього положення, визначити площу одночасного нагрівання, геометричні параметри індуктора (висота індуктора та його внутрішній діаметр). При визначенні внутрішнього діаметра індуктора приймається зазор між зовнішнім діаметром деталі і внутрішнім діаметром індуктора в межах 3...4 мм.

### Приклад

Вибрати нагрівальне обладнання і параметри технології гартування з індукційного нагрівання валика діаметром 50 мм та довжиною 400 мм для отримання поверхневої твердості 55...56 HRC.

### Рішення

Для виготовлення валика приймаємо матеріал – сталь 45, що містить 0,45% С.

Далі визначаємо потрібну глибину загартованої зони. Приймаємо площу загартованої зони 15% від загальної площі поперечного перерізу валика –  $S_{\text{заг}}$ . Тоді площа серцевини складе  $0,85 S_{\text{заг}}$ . Виходячи з геометричних міркувань та позначивши глибину гартування  $\delta$ , запишемо рівність  $\pi(R - \delta)^2 = 0,85 R^2 \pi$

$$(R - \text{радіус валика}), \text{ або } R - \delta = \sqrt{0,85 R^2} ; \quad \delta = R - \sqrt{0,85 R^2} .$$

$$\delta = 25 - \sqrt{0,85 \cdot 25^2} = 25 - \sqrt{0,85 \cdot 625} = 1,95 \text{ мм.}$$

Приймаємо  $\delta = 2 \text{ мм}$ .

Визначаємо потрібну частоту електричного струму для отримання заданої глибини гартування, виходячи з формули (17):

$$f = \left( \frac{50}{8} \right)^2 ; \text{ звідки } f = 625 \text{ Гц.}$$

За таблицею 10 найбільш прийнятним генератором є ламповий генератор ЛПЗ-37 з номінальною частотою струму 1000 Гц та номінальною потужністю електричного струму 30 кВт. В цьому випадку фактична глибина загартованої зони складе

$$\delta = \frac{50}{\sqrt{f}} = \frac{50}{\sqrt{1000}} = 1,6 \text{ мм.}$$

Визначаємо площу поверхні, яка одночасно нагрівається.

Приймаємо питому потужність  $0,35 \text{ кВт/см}^2$ , тоді площа, яка одночасно нагрівається, складе  $30 : 0,35 = 85,7 \text{ см}^2$ .

Площа циліндра, який одночасно нагрівається, складе  $2\pi RH$ , де  $H$  – висота індуктора. Отже можна записати рівняння

$$2\pi RH = 85,7 \text{ см}^2, \text{ або } H = \frac{85,7}{2 \cdot 3,14 \cdot 2,5} = 5,4 \text{ см} = 54 \text{ мм.}$$

Приймаємо висоту індуктора 50 мм.

Таким чином, валик заданої геометрії можна загартувати безперервно-послідовним способом, тому що довжина валика 400 мм, а

довжина, яка одночасно нагрівається, відповідає висоті індуктора, тобто 50 мм, з використанням лампового генератора.

## **8 ТЕХНОЛОГІЯ І РЕЖИМИ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ЧАВУНУ**

### **8.1 Загальні положення**

Сірі, модифіковані, високоміцні, ковкі та, особливо, леговані чавуни піддають термічній обробці, мета якої зв'язана з особливостями виливка, потрібними механічними властивостями та структурою. В залежності від мети застосовують такі види термообробки чавунних виливок:

- низькотемпературний відпал для зняття внутрішніх (ливарних) напружень;
- графітизуючий відпал для усунення відбілу (переводу цементиту в графіт) та поліпшення обробляємості різанням;
- нормалізація для підвищення дисперсності металічної матриці, наслідком чого являється збільшення міцносних характеристик;
- гартування з відпуском для зміни будови металічної матриці;
- відпал білого чавуну на ковкий.

### **8.2 Режими відпалу для зняття внутрішніх (ливарних) напружень**

Технологія низькотемпературного відпалу чавунних виливок різного призначення приведена в табл. 11. Ці режими застосовуються поза всякою залежністю від марки чавуну.

### **8.3 Повний відпал**

Застосовується для отримання чавуну однорідного за структурою, хімічним складом та величиною зерна, з доброю обробляемістю різанням. Застосовується в основному для феритних та ферито-перлітних чавунів.

Режими відпалу приведені в табл. 12.

### **8.4 Графітизуючий відпал**

Застосовується для зняття відбілу (розчинення цементиту), проводиться за технологією, приведеною в табл. 13.



**Таблиця 11 – Режими відпалу чавунних виливок для зняття внутрішніх напружень**

Характеристика (найменування) виливок	Маса виливка, т	Товщина стінок виливка, мм	Режими відпалу				
			Температура, °С	Швидкість нагрівання, °С /год	Час витримки, год	Час охолодження, год	Температура розвантаження, °С
Рами та інші виливки складної форми	1,5...15,0	70...100	500	75	10	8	150
		40...70	450	70	8	8	150
		10...40	425	60	6	7	150
Установочні плити, кришки і рами редукторів, станини	4...35	70...150	500... 550	75	12	13	100
Виливки металорізальних верстатів	1,2...2,0	8...60	525... 550	100	4...5	24	100
Дрібні виливки металорізальних верстатів	<1,0	<10	500... 600	170	2,5... 3,0	6...8	150
Деталі сільськогосподарських машин	<0,5	<5	600	80	2,5	15	150
Поршні	0,2	15...30	500	100	3	4	200
Обичайки для поршневих кілець	0,04... 0,25	13...40	550... 600	100	2	3	150
Поршневі кільця	<0,005	<10	600	70	1,5	На повітрі	
Інші деталі-виливки	До 0,01	6...8	550	100	0,5... 1,0	3	200

Таблиця 12 – Технологічні режими повного відпалу виливок з сірого чавуну

Марка чавуну	Товщина стінки виливки, мм	Режим відпалу				
		Температура посадки, °С	Швидкість нагрівання, °С /год	Температура нагрівання, °С	Час витримки, год	Швидкість охолодження, °С /год
СЧ00	До 10, 10...20	250	150...180	860...880	2,0	120...150
СЧ15	20...30, > 30	200	140...170	840...860	2,5	120...150
СЧ18	До 20, 20...30	200	120...150	820...840	2,5	100...120
СЧ21	30...40, > 40	150	110...140	800...820	3,0	100...120
СЧ24	До 20, 20...30	150	80...120	790...810	3,5	80...110
СЧ28	30...40, > 30	150	80...120	780...810	3,5	80...110

Таблиця 13 – Режими графітізуючого відпалу

Характеристика відбілу	Вихідна мікроструктура	Режими відпалу				
		Температура посадки, °С	Швидкість нагрівання, °С /год	Температура нагрівання, °С	Час витримки, год	Умови охолодження
Місцевий неглибокий відбіл	Перлітоцементитна	200...250	150...180	850...900	0,5...0,25	Разом з піччю (50 °С /год)
Глибокий відбілений шар	Те ж	150...200	80...100	900...1050	3,0...1,0	Те ж

## 8.5 Нормалізація чавунних виливків

Виконується за тими ж технологічними режимами, що і повний відпал (див. табл. 13), з тією лише різницею, що виливки після витримки видають на повітря, швидкість охолодження - 250...300 °C/год.

## 8.6 Гартування з наступним відпалом

Ця операція виконується з метою підвищення міцності чавунних виливків. Металічна матриця отримує трооститну (рідше сорбітну) структуру. Перед проведенням гартування виливки відпалюють за режимами, наведеними в табл. 13. Причому виливки малого розміру та простої форми нагрівають без підігрівання, а виливки великого розміру та складної форми – з попереднім підігріванням. Швидкість нагрівання - 150...180 °C /год, середовище для охолодження – мінеральне масло. В цьому випадку швидкість охолодження хоча і менше критичної швидкості гартування, проте таке середовище для охолодження зменшує вірогідність утворення тріщин.

Температуру гартування призначають в залежності від кількості зв'язаного вуглецю у чавуні і залежить від марки чавуну: при малій кількості зв'язаного вуглецю (велика кількість надлишкового фериту) температуру гартування беруть вищою, а при великій – нижчою.

В табл. 14 приведені температура гартування сірих чавунів різних марок і твердість, яку при цьому отримують.

В табл. 15 приведені режими відпуску.

Таблиця 14 – Режимы гартування сірих чавунів

Марка чавуну	Температура посадки, °C	Швидкість нагрівання, °C /год	Температура нагрівання, °C	Час витримки, год	Твердість після гартування, HB
СЧ12	200...250	200...210	860...880	2,0	450...500
СЧ15	180...200	200...210	860...880	2,0	450...500
СЧ18	150...180	180...200	820...840	2,0	450...500
СЧ21	150...180	180...200	820...840	2,0	430...480
СЧ24	150...180	180...200	790...810	2,0	430...480
СЧ28	140...150	150...180	780...800	2,0	400...430

Таблиця 15 – Режими відпуску загартованих сірих чавунів

Марка чавуну	Твердість після гартування, HB	Температура відпуску, °C	Час витримки, год	Твердість після відпуску, HB
СЧ 12	450...500	150...170 380...400	0,5 0,5	430...450 330...390
СЧ15	450...500	150...170 650...670	0,75 0,30	430...450 150...230
СЧ18	450...500	500...530	1,0	230...270
СЧ21	430...480	280...300	0,75	400...410
СЧ24	430...480	280...300	0,75	400...410
СЧ28	400...430	560...570	1,50	190...260

### 8.7 Режими термічної обробки легованих і модифікованих сірих чавунів

8.7.1 Антифрикційні перліто-феритні сірі чавуни отримують шляхом відпалу з нагрівання нижче критичної точки  $A_1$ . Температура нагрівання 670...700 °C. При цьому відбувається розпад цементиту з утворенням фериту. Час витримки складає 1,0...1,5 годин для утворення біля 20% фериту, далі – охолодження разом з піччю із швидкістю 50...60 °C /год. Твердість після такого відпалу HB 187...262.

8.7.2 Антифрикційні перліто-цементитні чавуни отримують в результаті нормалізації з відпуском. Режими наведені в табл. 16.

Таблиця 16 – Режими нормалізації і відпуску антифрикційних чавунів

Найменування чавуну	Температура, °C		Витримка при нормалізації	Твердість, HB
	нормалізації	відпуску		
Легований хромистий чавун	820...870	300...500	1 год на 25 мм товщини або діаметра	170...230
Високоміцний чавун	850...950	200...350	виливка	220...270

Поліпшення механічних властивостей модифікованих і високоміцних чавунів іноді досягається за допомогою гартування та високого відпуску. Гартування проводиться при температурі 870...900 °С, а відпуску – при 500...600 °С.

## 8.8 Режими відпалу білого чавуну на ковкий

8.8.1 Відпал білого чавуну на ковкий феритний (чорносердечний) проводиться згідно з графіком, приведеним на рис.35.

8.8.2 Відпал білого чавуну на ковкий (білосердечний) проводиться згідно з графіком, наведеним на рис. 36.

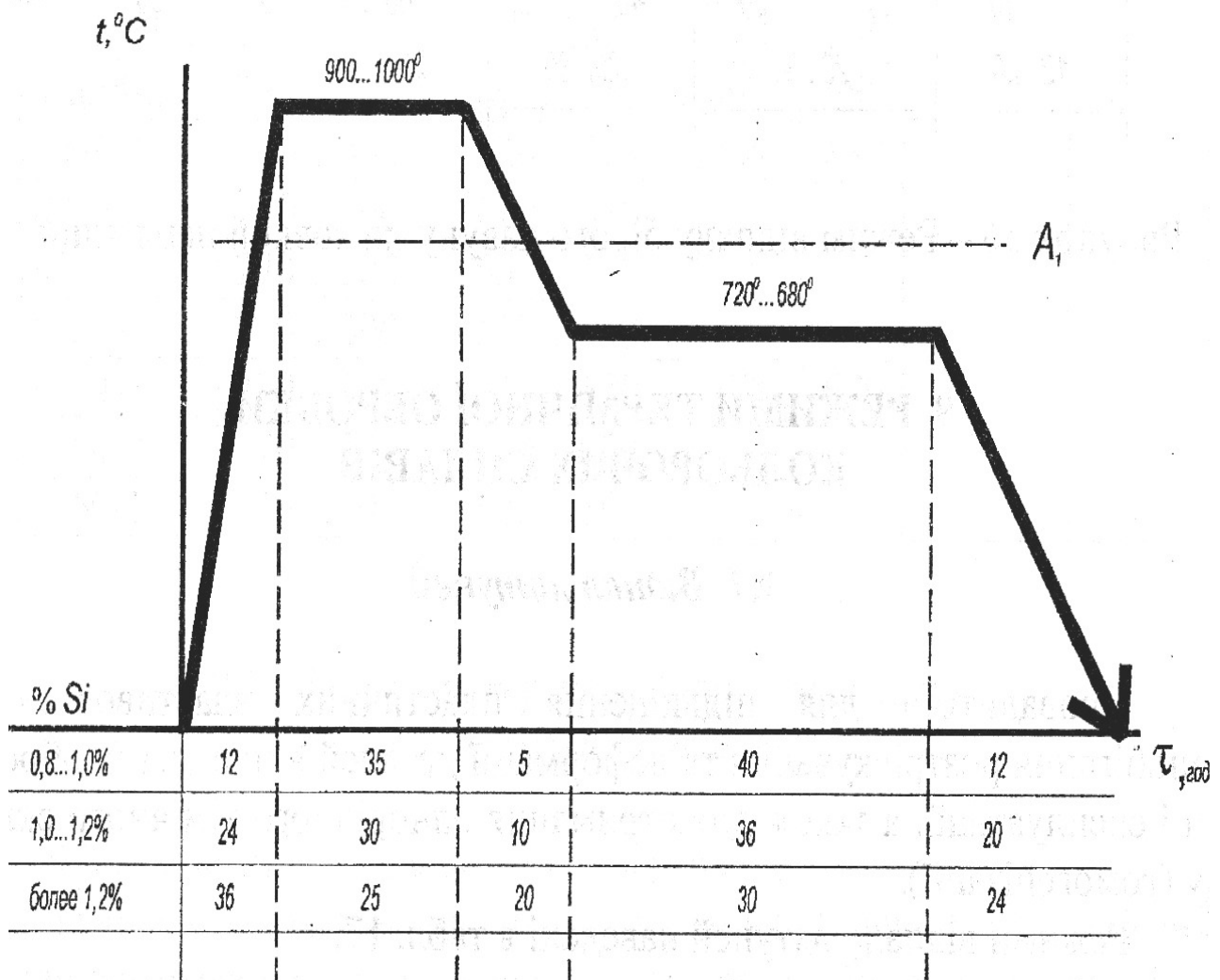


Рисунок 35 – Режим відпалу білого чавуну на ковкий феритний

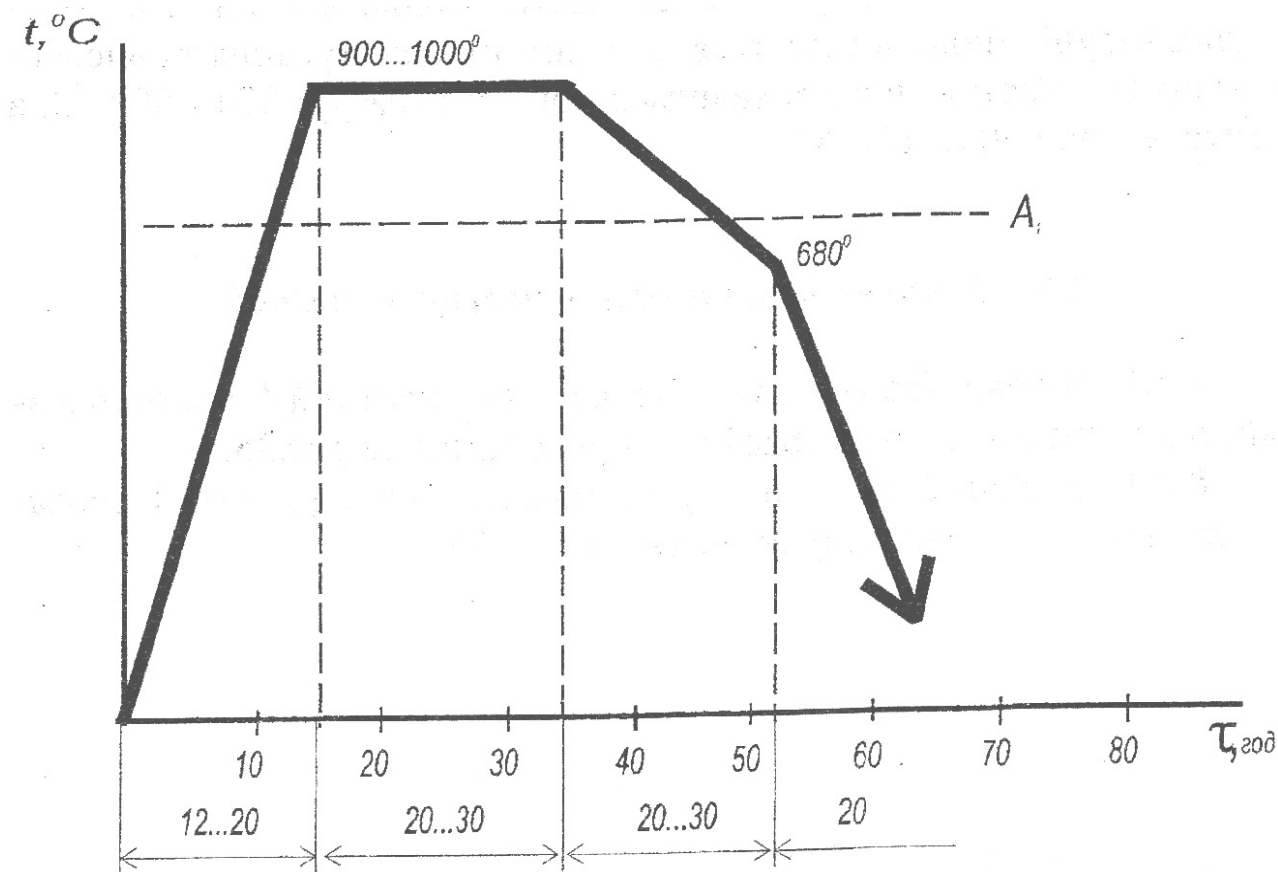


Рисунок 36 – Режим відпалу білого чавуну на ковкий перлітний

## 9 РЕЖИМИ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ КОЛЬОРОВИХ СПЛАВІВ

### 9.1 Відпал латуней

Проводиться для підвищення пластичних властивостей і запобігання розтріскування та деформації деталей в процесі їх обробки і експлуатації, а також для отримання однорідного хімічного складу (гомогенізації).

Режими відпалу латуней наведені в табл. 17.

### 9.2 Термічна обробка бронз

Бронзи піддають відпалу для зняття ливарних напружень. Режимми відпалу наведені в табл. 18. Окремі марки бронз піддають гартуванню та відпуску. Режими цієї термообробки наведені в табл. 19.

Таблиця 17 – Режими відпалу латуней

Марка латуні	Температура, °С			Час витримки	Охолодження
	З метою виключення розтріскування	З метою зменшення деформації	Гомогенізація		
Л96	270...300	600...700	750...770	З розрахунку 5 хв на 1 мм максимального перерізу виробу	Зі швидкістю 250...300 °С/год
Л90	270...300	600...720	750...770		
Л85	270...300	600...700	750...770		
Л80	270...300	600...700	750...770		
Л70	270...300	600...700	750...770		
Л68	270...300	550...650	750...770		
Л62	270...300	550...650	750...770		
ЛА77-2	270...300	600...650	750...770		
ЛАН59-3-2	270...300	600...650	600...650		
ЛН65-5	270...300	600...650	-		
ЛЖМц59-1-1	270...300	600...650	600...650		
ЛМц58-2	270...300	600...650	600...650		
ЛО70-1	270...300	620...670	620...630		
ЛО62-2	270...300	620...670	-		
ЛО63-3	270...300	650...720	-		
ЛС59-1	270...300	560...650	-		
ЛС74-1	270...300	630...670	620...670		
ЛС64-2	270...300	600...650	-		
ЛС60-1	270...300	600...650	-		

### 9.3 Режими термічної обробки сплавів на алюмінієвій основі

#### 9.3.1 Алюмінієві сплави, що деформуються

Тривалість нагрівання під гартування (відпал) алюмінієвих сплавів визначається в залежності від товщини або діаметра виробу з врахуванням нагрівального пристрою і може бути визначена за табл. 20. Режими термообробки приведені в табл. 21.

Таблиця 18 – Режими відпалу бронз

Марка бронзи	Температурний режим			Умови охолодження
	Для отримання однорідної структури, °С	Для усунення мікропористості, °С	Умови нагрівання	
БрОФ6,5-0,15	600...650	700...710	Завантаження в піч при температурі відпалу. Час витримки з розрахунку 5 хв на 1 мм перерізу	Охолодження разом з піччю зі швидкістю 40...50 °С/год до 200°С, далі – на повітрі
БрОЦС4-4-2,5	600...650	700...710		
БрОФ4-0,25	600...650	700...710		
БрА5	600...670	-		
БрА7	650...750	-		
БрАЖ9-4	700...750	-		
БрАМц9-2	650...750	-		
БрАЖМц10-3-1,5	650...750	-		
БрКМц3-1	700...750	-		
БрАЖН10-4-4	700...750	-		
БрМц5	700...750	-		
БрБ2	630...750	-		
БрКН1-3	630...750	-		
БрОФ10-1	600...650	700...710		

Таблиця 19 – Режими гартування і відпуску деяких бронз

Марка бронзи	Гартування				Відпуск			Твердість, НВ
	Середовище для охолодження	Температура, °С	Температура посадки, °С	Швидкість нагрівання, °С/год	Температура, °С	Температура посадки, °С	Швидкість нагрівання, °С/год	
БрАЖ9-4	Вода	850	150...200	100	350	200	100	160...187
БрАМц9-2	Вода	800	150...200	120	400	200	120	150...187
БрАЖМц10-3-1,5	Вода	845	180...210	130	325	200	130	207...285
БрАЖН10-4-4	Вода	920	300...350	130	650	200	130	200...240
БрКМц3-1	Вода	800	150...200	140	450	200	140	130...180
БрБ2	Вода	790	120...150	130	325	200	130	340...370



**Таблиця 20 – Тривалість нагрівання під гартування (відпал)  
алюмінієвих сплавів**

Нагріваль- ний при- стрій	Товщина або діаметр виробу, мм									
	До 0,8	0,8... 2,5	2,5... 5,0	5...12	12...20	20...50	60	70	80	90
	Час нагрівання, хв									
Селітрова ванна	8	10	12	15	30	40	60	70	80	90
Електро- піч	12	25	40	80	90	110	130	140	180	190

**Таблиця 21 – Режими відпалу, гартування і відпуску (старіння)  
алюмінієвих сплавів, що деформуються**

Мар- ка спла- ву	Відпал (нормалізація)				Відпуск (ста- ріння)		Твер- дість піс- ля гарту- вання і відпалу, НВ
	Темпе- ратура, °С	Середо- вище для охолод- ження	Темпе- ратура, °С	Середо- вище для охолод- ження	Тем- пера- тура, °С	Час ви- трим- ки, год	
1	2	3	4	5	6	7	8
АМц	350... 410	Повітря або вода	Не за- стосову- ється	-	-	-	30 (після відпалу)
АМг	350... 410	Те ж	Те ж	-	-	-	45 (після відпалу)
АМг5	340... 370	Повітря	Те ж	-	-	-	70 (після відпалу)
Д1	340... 370	Те ж	490...515	Вода	20	96	100
Д6	340... 370	Те ж	498...503	Вода	20		105
Д16	340- 370	Те ж	498...505	Вода	20		105
ДЗП	340... 370	-	-	-	-		45
ДЗП	-	-	490...500	Вода	20		80
Д18	340... 370	Повітря	-	-	-		38
Д18	-	-	490...505	Вода	20	96	70
АВ	340... 370	Повітря	-	-	-	-	30
АВ	-	-	515...525	Вода	150... 160	6	95

Продовження табл.21

1	2	3	4	5	6	7	8
AK	Не піддається						
AK2	350... 450	Повітря	-	-	-	-	45
AK2	-	-	510...520	Вода	165... 175	15...18	100
AK4	350... 450	Повітря	-	-	-	-	45
AK4	-	-	510...520	Вода	165... 175	15...18	110
AK6	350... 460	Повітря	-	-	-	-	60
AK6	-	-	505...515	Вода	150... 160	12...15	105
AK8	350... 460	Повітря	-	-	-	-	40
AK8	-	-	500...510	Вода	175... 180	8	130
B95	420... 440	Піч	-	-	-	-	70
B95	-	-	465...475	Вода	120... 125	24	150

9.3.2 Режими термообробки ливарних алюмінієвих сплавів на основі алюмінію наведені в табл. 22.

Таблиця 22 - Режими термообробки ливарних алюмінієвих сплавів на основі алюмінію

Марка сплаву	Гартування			Відпал, відпуск (старіння)			Твердість, НВ
	Температура, °C	Витримка, год	Середовище для охолодження	Температура, °C	Витримка, год	Середовище для охолодження	
1	2	3	4	5	6	7	8
АЛ1	510... 520	2...4	Вода 50... 100°C або повітря	210...230	2...4	Повітря	95
АЛ2	-	-	-	280...300	2...4	Піч до 80°C, далі-повітря	85

Продовження табл. 22

1	2	3	4	5	6	7	8
АЛ3	-	-	-	175...185	5	Повітря	70
	-	-	-	280...300	2...4	Повітря	65
	520...530	4...6	Вода 50 <sup>0</sup> С	175...185	5	Повітря	75
	520...530	4...6	Вода 50 <sup>0</sup> С	225...235	5	Повітря	70
	520...530	4...6	Вода 50 <sup>0</sup> С	325...335	3	Повітря	65
АЛ4	-	-	-	170...180	15	Повітря	70
	570...545	2...6	Вода 50 <sup>0</sup> С	170...180	15	Повітря	65
АЛ5	-	-	-	175...185	15	Повітря	65
	520...530	4	Вода 50 <sup>0</sup> С	175...185	5	Повітря	70
	520...530	4	Вода 50 <sup>0</sup> С	225...235	5	Повітря	65
АЛ6	-	-	-	280...300	3	Повітря	45
АЛ7	510...520	10...15	Вода 50 <sup>0</sup> С	-	-	-	60
	510...520	10...15	Вода 50 <sup>0</sup> С	145...155	2-4	Повітря	70
АЛ8	430...440	15...20	Вода 50 <sup>0</sup> С або масло	-	-	-	60
АЛ9	530...540	12	Вода 50 <sup>0</sup> С	-	-	-	50
	530...540	12	Вода 50 <sup>0</sup> С	145...155	1...3	Повітря	60

#### 9.4 Режими термообробки сплавів на магнієвій основі

Ці сплави легко окислюються, тому нагрівання ведуть в печах з захисною атмосферою (муфельних печах). Як захисну атмосферу застосовують суміш повітря з 1% сірчастого газу. Сірчастий газ іноді замінюють сірчастим колчеданом, який закладають в робочий простір (під муфель) з розрахунку 3...4 кг на 1 т деталей, що термічно обробляються: згораючи, він утворює сірчастий газ.

Температурні режими відпалу, гартування і старіння сплавів на основі магнію наведені в табл. 23.

Таблиця 23 – Температурні режими термообробки сплавів на магнієвій основі

Марка сплаву	Відпал і гартування			Старіння (відпуск)			Твердість, НВ
	Температура, <sup>0</sup> С	Витримка, год	Середовище для охолодження	Температура, <sup>0</sup> С	Витримка, год	Середовище для охолодження	
1	2	3	4	5	6	7	8
Ливарні сплави							
МЛ1	200...250	3...5	3 піччю	-	-	-	40
МЛ2	200...250	3...5	Те ж	-	-	-	30
МЛ3	170...250	3...5	Те ж	-	-	-	40

Продовження табл.23

1	2	3	4	5	6	7	8
МЛ4	170...250	3...5	Те ж	-	-	-	50
	375...385	10...16	Повітря	-	-	-	55
	375...385	10...16	Те ж	170...180	16	Повітря	60
МЛ5	170...250	3...5	З піччю	-	-	-	50
	410...420	12...16	Повітря	-	-	-	50
	410...420	12...16	Те ж	170...180	16	Повітря	60
МЛ6	170...250	3...5	З піччю	-	-	-	50
	410...420	16...24	Повітря	-	-	-	60
	410...420	16...24	Те ж	170...180	16	Повітря	65
Сплави, що деформуються							
МА1	340...400	3...5	Повітря	-	-	-	40
МА2	300...400	3...5	Повітря	-	-	-	45
МА3	320...380	4...8	Повітря	-	-	-	50
МА4	320...350	4...6	Повітря	-	-	-	70
	330...340	2...3	Повітря	-	-	-	70
	275...385	4...10	Гаряча вода	-	-	-	80
МА5	350...380	3...6	Повітря	-	-	-	60
	410...420	4...12	Гаряча вода	-	-	-	65
	410...420	4...6	Те ж	170...180	16...24	Повітря	70
МА8	280...320	2...3	Повітря	-	-	-	55

### 9.5 Термічна обробка нікелевих і міднонікелевих сплавів

Вироби з цих сплавів застосовують в електропромисловості як електроопори. Вироби із сплавів на нікелевій і міднонікелевій основі піддають або звичайному відпалу, або безокисному, нагріваючи їх в спеціальних контейнерах. Через контейнер пропускають осушений водень, генераторний газ або дисоційований осушений аміак. Розкривають контейнер при температурі не вище 100...150 °С.

Режими відпалу наведені в табл. 24.

Таблиця 24 – Марки сплавів на нікелевій і міднонікелевій основі та температури їх відпалу

Назва сплаву	Марка сплаву	Температура відпалу, °С	Час витримки, год	Твердість, НВ
1	2	3	4	5
Ніхром	Х20Н80	850...900	2...4	140
Нікель-марганцовистий	НМц2,5	800...850	2...3	147
Нікель-марганцовистий	НМц5	900...950	1,5...2	120...130

Продовження табл. 24

1	2	3	4	5
Алюмель	НМцАК2-2-1	850...900	2,3...3	150...200
Хромель	НХ9,5	800...850	4,5...5	135...210
Монель-метал	НМЖМц28-2,5-1,5	750...850	3,0...4,0	180...230
Фероніхром	Х15Н60	800...850	3...4	85...90
Копель	МННМц43-0,5	800...850	3...4	75...90
Константан	МНМц40-1,5	780...810	5...6	60...70
Мельхіор	МНЖМц30-0,8-1	750...780	1,0...2	60...70
Сплав ТБ	МН16	700...750	4...5	70
Нейзильбер	НМц15-20	700...750	3...4	120
Манганін	МНМц3-12	500	2...3	50...60
Сплав ТП	МН0,6	600...700	3...5	70...80
Мельхіор	МН19	Гартування у воді 900 <sup>0</sup> С, від- пуск 500 <sup>0</sup> С	1,5...2,0	260
Куніаль	МНА13-3		-	210
Куніаль	МНА6-1,5		3...4	215

### 9.6 Термічна обробка сплавів на основі титану

Титанові сплави представляють інтерес для промисловості завдяки їх високій питомій міцності (відношення межі міцності до щільності) і корозійній стійкості. Їх застосовують як жароміцні матеріали для роботи при температурах 450...500 °С, коли неможливо використати алюмінієві сплави.

Режими термічної обробки титанових сплавів досить схожі з аналогічними режимами термічної обробки сталі. В табл. 25 наведені основні марки титанових сплавів та режими їх термообробки.

Титановим промисловим сплавам притаманна одна важлива особливість: відпуск їх після гартування повинен проводитись при таких підвищених температурах, які дають можливість уникнути утворення  $\omega$ -фази, яка окрихчує сплав (табл. 25).

Таблиця 25 – Режими зміцнюючої термообробки титанових сплавів

№ групи	Марка сплаву	Відпал			Гартування			Відпуск		
		Температура, °С	Швидкість нагрівання, °С /год	Середовище для охолодження	Температура, °С	Швидкість нагрівання, °С /год	Середовище для охолодження	Температура, °С	Швидкість нагрівання, °С /год	Середовище для охолодження
1	BT5-1	850...860	80	В пічі, повітря	-	-	-	-	-	-
	BT4	840...850	90		-	-	-	-	-	-
	OT4-1	860...880	90		-	-	-	-	-	-
2	BT6	-	-	-	860	120	Вода	450...475	200	Повітря
	BT8	-	-	-	870	140	Вода	460...480	220	
	BT14	-	-	-	880	150	Вода	450...475	210	
	BT3	-	-	-	800...810	140	Вода	500...510	210	
	BT3-1	-	-	-	825...845	120	Вода	550...560	200	
3	MST-2 SA-16V	-	-	-	720...730	100	Вода	525...500	200	Повітря
4	BT15	-	-	-	760...770	120	Вода	470...480	140	Повітря

## ЛІТЕРАТУРА

- 1 Соколов К.Н., Коротич И.К. Технология термической обработки и проектирование термических цехов.-М: Металлургия, 1988. - 383 с.
- 2 Лахтин Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов.- М.: Металлургия, 1983. - 359 с.
- 3 Рустем С.Л. Оборудование и проектирование термических цехов.- М.: Машгиз, 1962. - 588 с.
- 4 Гуляев А.П., Малинина К.Н., Северина С.М. Инструментальные стали: Справочник. – М.: Машгиз, 1961. – 207 с.
- 5 Сергейчев И.М., Печковский А.М. Термическая обработка режущего и измерительного инструмента. – М.: Машиностроение, 1967.- 224 с.

# Додаток А

Орієнтовні значення коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha$ , Вт / (м<sup>2</sup> · К)

Таблиця А.1

Середовище	Температура поверхні тіла, °С					
	100	200	300	400	500	600
Нагрівання в печі з температурою, °С:						
1100	145	160	170	190	210	225
900	100	110	125	140	155	170
600	60	65	70	85	100	115
Охолодження від 900 °С:						
у воді 20 °С	800	2000	1200	400	500	2000
у маслі 50 °С	200	400	500	700	1000	1200
на повітрі	15	18	22	30	40	50

Таблиця А.2

Температура поверхні тіла, °С					За цикл 320 °С до $t$ , °С	
700	800	900	1000	1100	$t$ , °С	$\alpha_{сер}$
245	270	300	330	400	1100	250
185	200	320	-	-	900	180
-	-	-	-	-	600	90
1500	1000	-	-	-	-	2000...1000
700	300	250	-	-	-	500...300
55	70	85	100	125	125	50...30



## Додаток Б

## Фізичні властивості низьколегованих сталей [2]

[illegible]

Продовження табл. Б.1

Властивості	Температура, °C									
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Коефіцієнт температу- ропровідності сталей $\alpha 10^{-6}, \text{м}^2/\text{с}$ :										
-хромистих										
-марганцовистих	11,38	10,28	8,89	7,50	6,39	5,28	3,55	5,83	-	-
-хромокремнистих	10,56	9,72	8,89	7,78	6,39	5,56	3,33	5,83	-	-
-кремнемарганцовистих	10,41	9,44	8,47	7,50	6,11	5,28	-	5,83	-	-
-хромомолібденових	10,56	10,00	8,89	8,05	6,67	5,83	3,61	7,22	-	-
-хромованадієвих	11,11	10,00	9,44	8,05	6,67	5,28	3,33	5,39	6,11	-
-хромонікелевих	13,33	11,67	10,55	9,44	8,61	7,78	-	-	-	-
	9,72	9,17	8,33	7,50	6,39	5,28	3,06	5,83	5,56	5,83

## Додаток В

# Фізичні властивості вуглецевих сталей

Властивості	Температура, °C					
	100	200	300	400	500	600
Середня теплоємність $C$ від $0$ до $t$ °C, кДж/(кг·K)	0,486	0,507	0,523	0,540	0,561	0,590
Коефіцієнт теплопровідності сталей $\lambda$ , Вт/(м·K):						
маловуглецевих	55,6	52,7	48,5	45,0	40,8	37,1
середньовуглецевих	49,3	48,1	45,6	42,4	39,1	35,7
високовуглецевих	46,5	44,0	40,8	37,7	35,0	32,3
Коефіцієнт температуропровідності сталей $\alpha 10^2, m^2/год$ :						
маловуглецевих	5,2	4,6	4,2	3,5	2,9	2,3
середньовуглецевих	4,7	4,2	3,8	3,3	2,8	2,3
високовуглецевих	4,3	3,8	3,4	2,9	2,5	2,2

Таблица В.2

Властивості	Температура, °C						
	700	800	900	1000	1100	1200	1300
Середня теплоємність $C$ від $0$ до $t$ °C, кДж/(кг·K)	0,620	0,695	0,695	0,691	0,687	0,682	0,682
Коефіцієнт теплопровідності сталей $\lambda$ , Вт/(м·K):							
маловуглецевих	34,2	30,1	27,3	27,7	28,5	29,8	-
середньовуглецевих	32,4	26,2	26,0	26,9	28,0	29,5	-
високовуглецевих	29,2	24,1	25,2	26,5	27,9	29,4	-

Продовження табл. В.2

Властивості	Температура, °С						
	700	800	900	1000	1100	1200	1300
Коефіцієнт температуропровідності сталей $\alpha 10^{-6}, \text{м}^2/\text{с}$ :							
маловуглецевих	4,72	4,44	5,56	5,56	5,83	-	-
середньовуглецевих	5,00	5,00	5,56	5,56	5,56	-	-
високовуглецевих	3,61	5,56	5,56	5,56	5,83	-	-

Додаток Г  
Густота сталей [2]

Таблиця Г.1

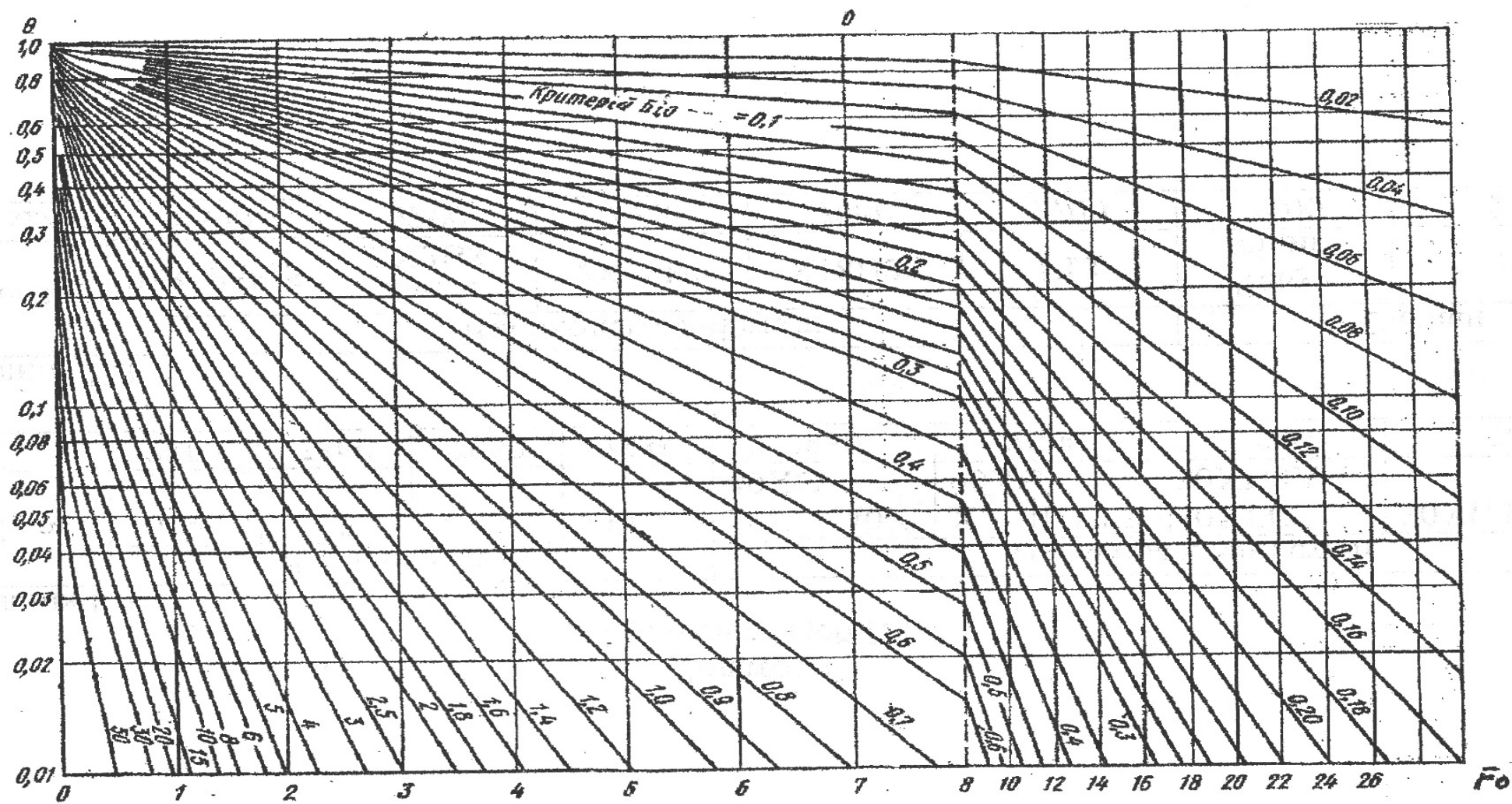
Матеріали	Вуглецеві сталі				Низьколеговані сталі			
	08кп	20	50	У10	50Г, 40Х, 40ХС	Х, ШХ15, 90ХС	30ХГС, 20ХН3А	30ХН3М
Густота, $кг/м^3$	7880	7860	7850	7830	7830	7800	7840	7830

Таблиця Г.2

Матеріали	Високолеговані сталі					Сплави	
	Р18, Р6М5	3Х13, 3Х2В8	2Х18Н9	Х18Н25	Г13	Чавун сірий	Д16
Густота, $кг/м^3$	8690	8200	7920	7800	7700	7100	2750

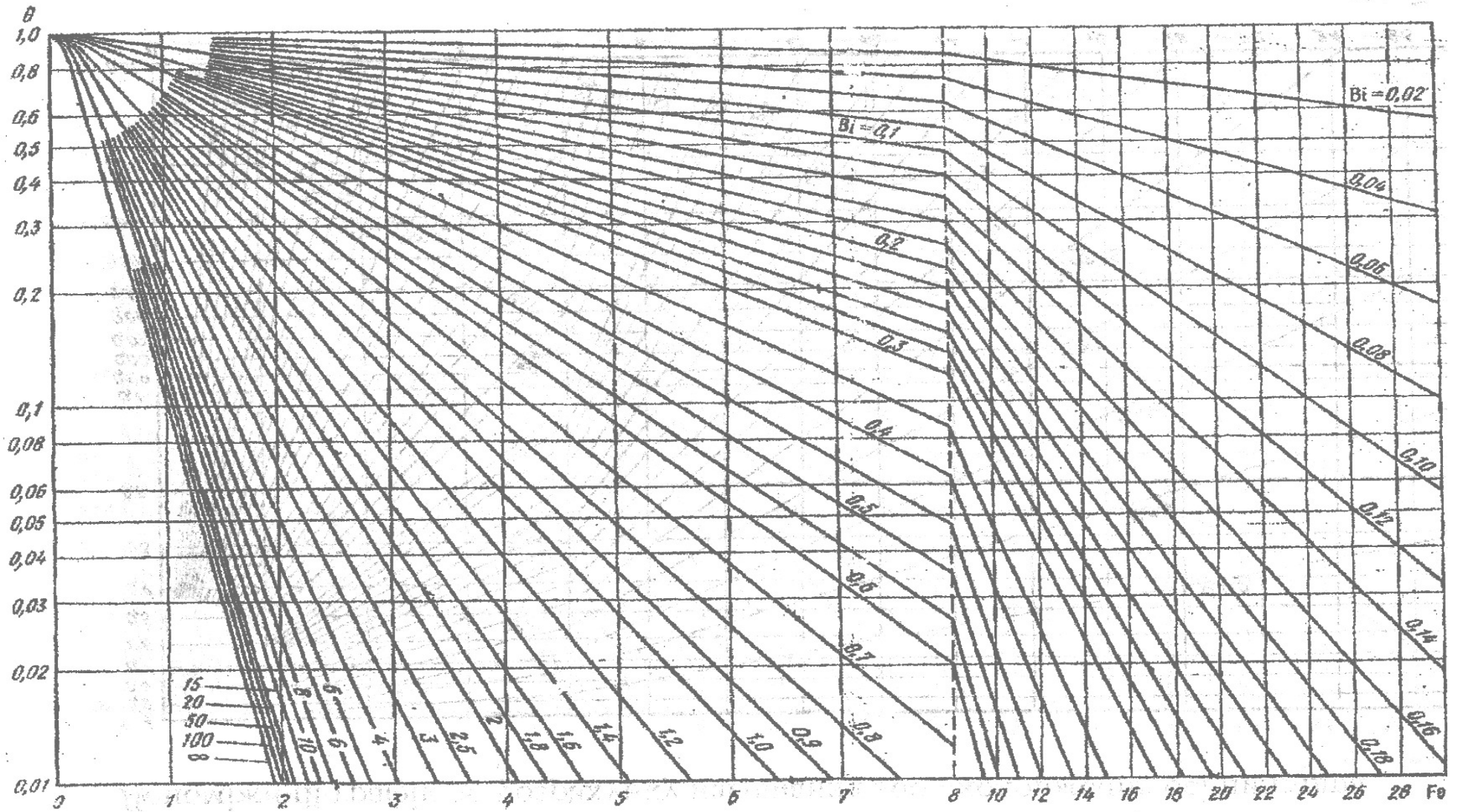
Додаток Д

Відносна температура  $\theta$  поверхні пластини ( $x/S=1$ ) при значеннях  $Fo =$  від 0 до 30



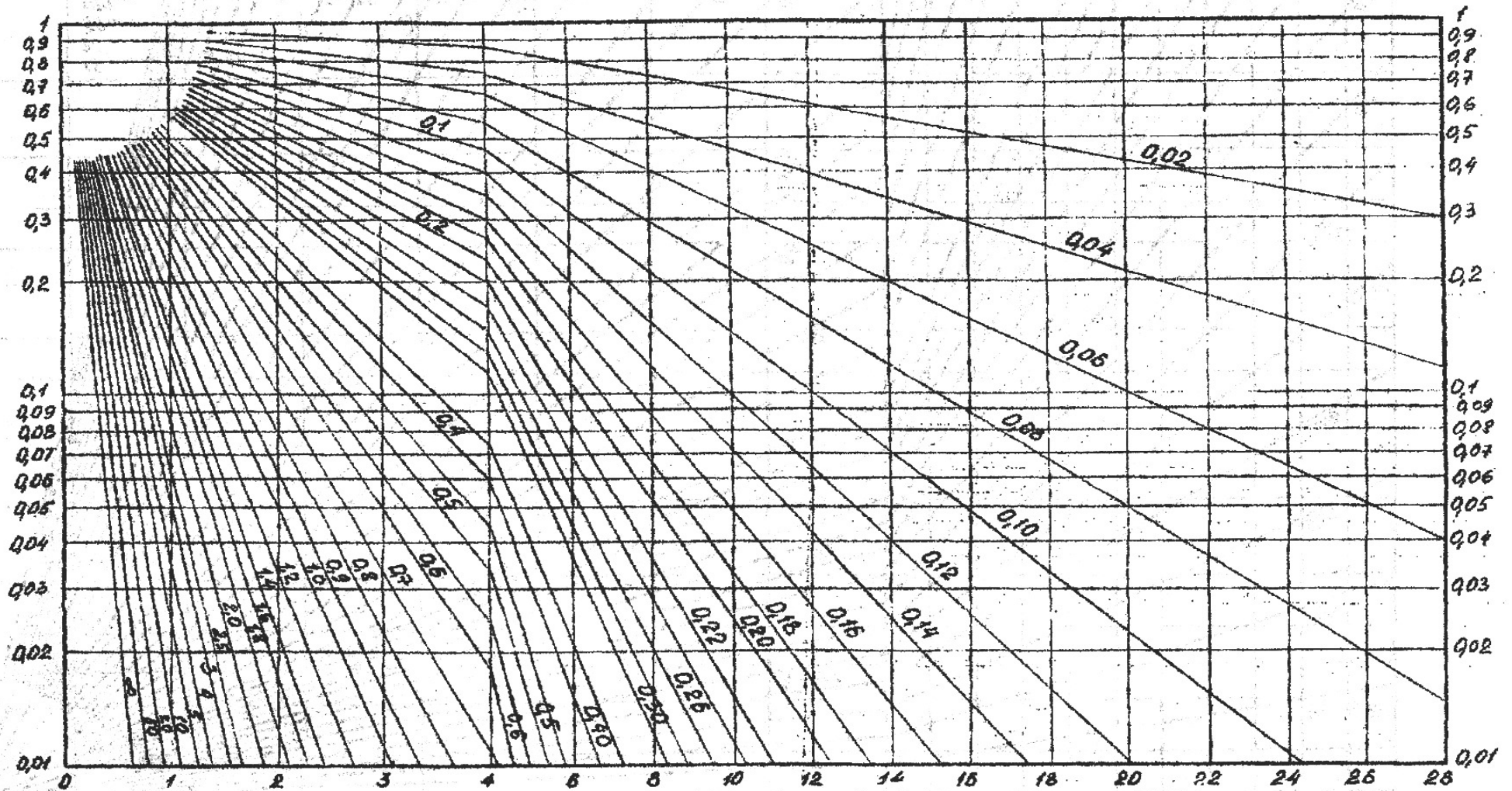
# Додаток Е

Відносна температура  $\theta$  поверхні пластини ( $x/S=0$ ) при значеннях  $Fo = \text{від } 0 \text{ до } 30$



# Додаток Ж

Допоміжний графік до розрахунку нагрівання або охолодження осі циліндра

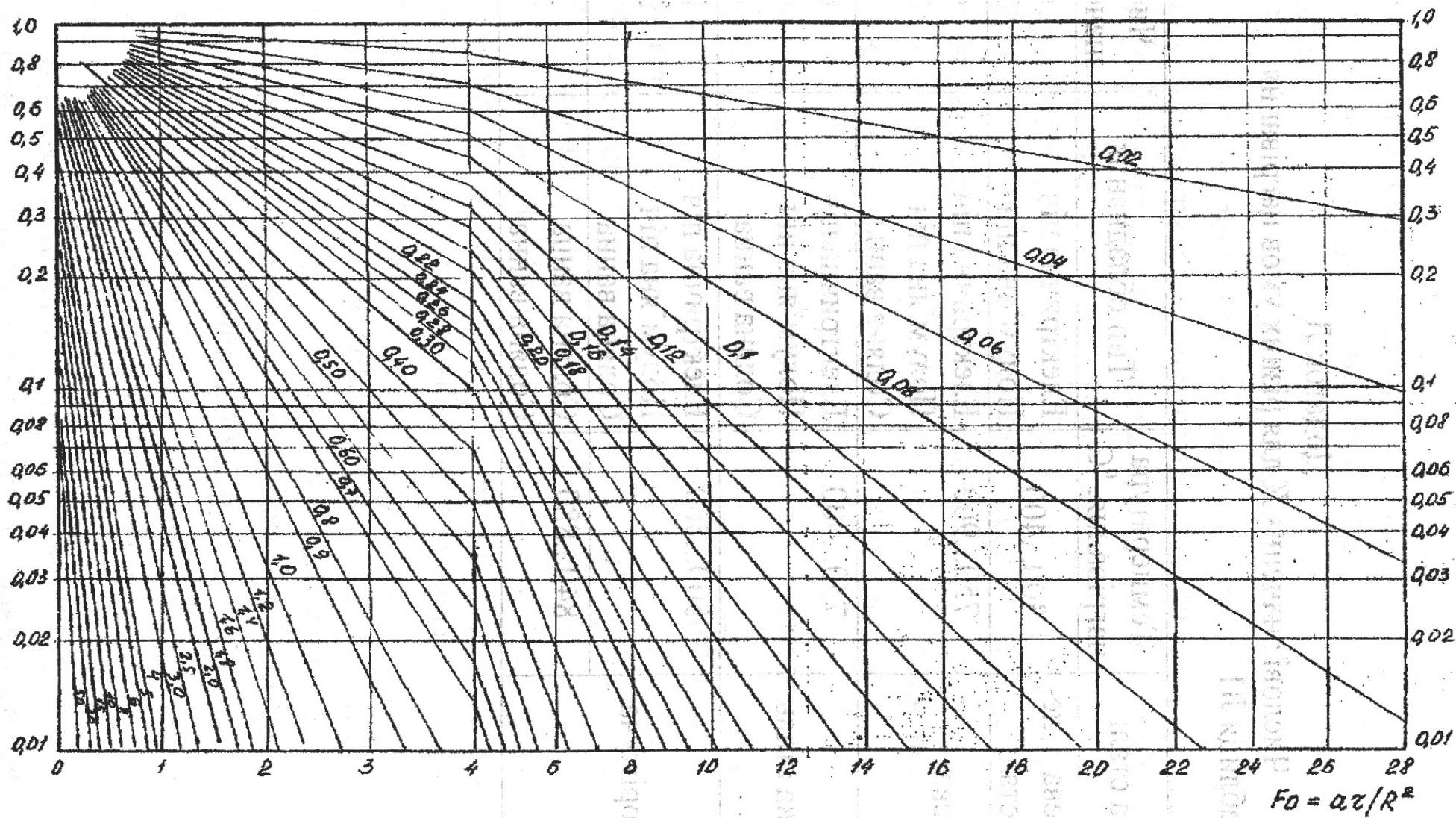


$$F_0 = \frac{\alpha \tau}{R^2}$$



## Додаток К

Допоміжний графік для розрахунку нагрівання або охолодження поверхні циліндра



Додаток Л  
Числові значення  $K$  для різних умов нагрівання  
Таблиця Л1

Група сталі	Температура нагрівання, °C	Тип обладнання	Числові значення $K$
Вуглецева і легрована сталі	300...400	Електрична піч	45
		Полум'яна піч	35
Вуглецева сталь	750...900	Електрична піч	40
		Полум'яна піч	35
		Соляна ванна	10
Легована сталь	750...900	Електрична піч	45
		Полум'яна піч	40
		Соляна ванна	13
Швидкоріжуча сталь	500...560	Електрична піч	35
		Полум'яна піч	30
		Соляна ванна	7
	840...880	Соляна ванна	10
		Соляна ванна	5

## З М І С Т

1	Загальні положення .....	3
2	Основні етапи технології термообробки та принципи їх призначення .....	3
2.1	Нагрівання при зовнішньому джерелі тепла.....	4
2.1.1	Розрахунок тривалості нагрівання тонких тіл .....	8
2.1.2	Розрахунок тривалості нагрівання масивних тіл .....	10
2.2	Визначення тривалості видержки при аустенітизації...	12
2.3	Визначення умов охолодження при виконанні термообробки .....	13
2.3.1	Розрахунок швидкості охолодження при проведенні відпалу і нормалізації .....	14
2.3.2	Розрахунок швидкості охолодження при гартуванні.....	15
2.3.3	Розрахунок часу охолодження у середовищі при гартуванні .....	18
3	Практичні прийоми розроблення технології термічної обробки виробів із конструкційних сталей .....	20
3.1	Технологія термічної обробки сталевих литва .....	20
3.1.1	Відпал сталевих литва .....	20
3.1.2	Нормалізація з відпуском сталевих литва .....	21
3.1.3	Термічне поліпшення сталевих литва (гартування з відпуском) .....	24
3.2	Технологія термічної обробки поковок.....	27
3.2.1	Загальні підходи до розроблення технології термообробки поковок .....	27
3.2.2	Технологія відпалу поковок .....	29
3.2.3	Технологія термічного поліпшення заготовок (гартування з відпуском) з конструкційних сталей.....	36
4	Хіміко-термічна обробка виробів (ХТО) .....	39
4.1	Технологія цементації .....	39
4.2	Технологія азотування .....	45
5	Термічна обробка пружин і ресор .....	45
6	Термічна обробка інструментальних сталей .....	47
6.1	Попередня термічна обробка інструментальних сталей	47
6.1.1	Попередня термічна обробка вуглецевих і легованих інструментальних сталей .....	47

6.1.2	Попередня термічна обробка ледебуритних інструментальних сталей .....	52
6.1.3	Попередня термічна обробка штампових сталей гарячого деформування .....	60
6.2	Остаточна термічна обробка інструментальних сталей...	61
6.2.1	Типова технологія остаточної термічної обробки ріжучих інструментів із вуглецевих і легованих сталей.....	62
6.2.2	Типова технологія остаточної термічної обробки ріжучих інструментів із швидко ріжучих сталей.....	64
6.2.3	Типова технологія остаточної термічної обробки штампів холодного і гарячого формування металу.....	66
6.2.4	Типова технологія остаточної термічної обробки інструментів із високохромистих ледебуритних сталей.....	66
7	Поверхнєве гартування з індукційного нагрівання .....	70
7.1	Загальні положення .....	70
7.2	Основні підходи до розробки технології поверхневого гартування з індукційного нагрівання .....	71
8	Технологія і режими термічної обробки чавуну .....	74
8.1	Загальні положення .....	74
8.2	Режими відпалу для зняття внутрішніх (ливарних) напружень .....	74
8.3	Повний відпал .....	74
8.4	Графітизуючий відпал .....	74
8.5	Нормалізація чавунних виливків .....	77
8.6	Гартування з наступним відпалом .....	77
8.7	Режими термічної обробки легованих і модифікованих сірих чавунів .....	78
8.8	Режими відпалу білого чавуну на ковкий .....	79
9	Режими термічної обробки кольорових сплавів .....	80
9.1	Відпал латуней .....	80
9.2	Термічна обробка бронз.....	80
9.3	Режими термічної обробки сплавів на алюмінієвій основі .....	81
9.4	Режими термообробки сплавів на магнієвій основі....	85
9.5	Термічна обробка нікелевих і міднонікелевих сплавів..	86
9.6	Термічна обробка сплавів на основі титану .....	87

Література .....	89
Додаток А.....	90
Додаток Б.....	91
Додаток В.....	92
Додаток Г.....	95
Додаток Д.....	96
Додаток Е.....	97
Додаток Ж.....	98
Додаток К.....	99
Додаток Л.....	100

Михайло Якович Белкін,  
Володимир Кирилович Заблоцький,  
Олександр Якович Шашко.

## РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ СТАЛЕВИХ ВИРОБІВ

Навчальний посібник для розроблення технології термічної обробки сталевих виробів при виконанні контрольованої самостійної роботи за курсом (розділом) “Термічна обробка металів” студентами спеціальностей 7.090407 “Обробка металів тиском” і 7.090405 “Ливарне виробництво чорних і кольорових металів”

Редактор Єрьоміна Наталія Володимирівна

Підп. до друку  
Ум.-друк.арк..  
Заказ №

Формат 60x84/16.   Офсетний друк.  
Обл.-вид. арк.       Тираж 50 прим.

---

ДДМА 84313, Краматорськ, вул.Шкадінова, 72