

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Київський національний університет будівництва і архітектури

**МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО  
І ТЕХНОЛОГІЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ  
(МОДУЛЬ 1)**

Методичні вказівки  
до виконання лабораторних робіт  
для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти  
спеціальностей 131 «Прикладна механіка»,  
133 «Галузеве машинобудування»

Київ 2023

УБК 620.1

МЗ4

Укладачі: В.О. Шаленко, канд. техн. наук, доцент;  
А.А. Маслюк, асистент

Рецензент К.І. Почка, д-р техн. наук, професор

Відповідальний за випуск К.І. Почка, д-р техн. наук, професор

*Затверджено на засіданні кафедри професійної освіти,  
протокол № 3 від 29 вересня 2022 року.*

В авторській редакції.

**Матеріалознавство** і технологія конструкційних матеріалів  
МЗ4 (модуль 1): методичні вказівки до виконання лабораторних робіт /  
уклад.: В.О. Шаленко, А.А. Маслюк. – Київ: КНУБА, 2023. – 72 с.

Містять загальні положення основ матеріалознавства, короткі теоретичні відомості для виконання лабораторних робіт, порядок їх виконання, а також контрольні запитання.

Призначено для студентів освітнього рівня бакалавр спеціальностей 131 «Прикладна механіка», 133 «Галузеве машинобудування».

## ЗМІСТ

ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ.....	4
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1. Вивчення методів вимірювання твердості металів .....	5
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2. Макроструктурний аналіз металів і сплавів .....	14
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3. Мікроструктурний аналіз сталей і чавунів у рівноважному стані .....	27
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4. Термічна обробка вуглецевих сталей та її вплив на структуру і властивості (на прикладі сталі 45).....	36
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5. Хіміко-термічна обробка сталей (ХТО) .....	45
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6. Дослідження структури конструкційних сталей .....	50
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 7. Дослідження структури інструментальних сталей і твердих сплавів .....	57
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 8. Дослідження структури кольорових металів .....	66
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	71

## ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Виконання передбачених у методичних вказівках лабораторних робіт має за мету поглибити знання і вміння студентів, майбутніх фахівців інженер-механіків, які навчаються за спеціальностями 131 «Прикладна механіка», 133 «Галузеве машинобудування», у галузі матеріалознавства, яке є підґрунтям для вивчення дисциплін – «Опір матеріалів», «Деталі машин», «Технологія конструкційних матеріалів».

Матеріалознавство є теоретичною і практичною основою технологічних процесів, які застосовуються в машинобудуванні.

Дисципліна «Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів» (модуль 1 «Матеріалознавство») має на меті навчити майбутніх спеціалістів правильно орієнтуватися під час вибору конструкційних матеріалів і методах їх обробки для зміни властивостей.

Завдання дисципліни полягає у освоєнні структурної будови конструкційних матеріалів, силові та термічні методи впливу на фазові і структурні зміни складу, а також взаємозв'язок фізико-механічних властивостей із фазово-структурною будовою матеріалів.

Лабораторні роботи виконують в лабораторіях матеріалознавства, які мають усе необхідне обладнання і прилади.

Методичні вказівки написано за одною схемою. У кожній з них вказано мету роботи, перелік обладнання і матеріалів, стислі теоретичні відомості, хід роботи і контрольні запитання.

# ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

## Вивчення методів вимірювання твердості металів

**Мета роботи:** ознайомитися з методами і набути практичний досвід з визначення твердості.

### 1. Основні теоретичні положення

**Твердістю** називають властивість матеріалу чинити опір пластичній деформації за контактної взаємодії іншого, більш твердого тіла, індентора з поверхневими шарами.

Вимірювання твердості є технологічною пробою і може слугувати показником якості процесів термічної, хіміко-термічної і термомеханічної обробки, пластичного деформування та ін. За показниками твердості можливо посередньо отримати уяву і про інші фізико-механічні властивості (міцність, пружність, зносостійкість). Застосовують такі методи визначення твердості: вдавлювання, дряпання, відскокування бойка, коливання маятника. Твердість, яка виявлена дряпанням характеризує опір руйнуванню за рахунок різання, відтиснення, або крихкого викрашування. Твердість, яка виявлена методом відскокування бойка, характеризує пружні властивості матеріалу. Твердість, яка виявлена вдавлюванням **індентора** (наконечника) дає уявлення про опір пластичній деформації.

Найбільш поширеним є метод вдавлювання інденторів різної форми і за різних навантажень.

Позначають твердість літерою  $H$  (нім. *die Harte* – твердість) з відповідним позначенням методу: Брінелля –  $HB$ , Роквелла –  $HR$ , Віккерса і мікротвердість –  $HV$ .

**1.1. Метод Брінелля** заснований на тому, що твердість вимірюють вдавлюванням у зразок (виріб) загартованої сталевий кульки діаметром 10, 5 або 2,5 мм за сталого навантаження (рис. 1.1, 1 а). Кількісну величину твердості отримують як частку від ділення навантаження ( $P$ , Н) на площу поверхні утвореного відбитка ( $F$ ),  $\text{мм}^2$  (рис. 1.1, 1):

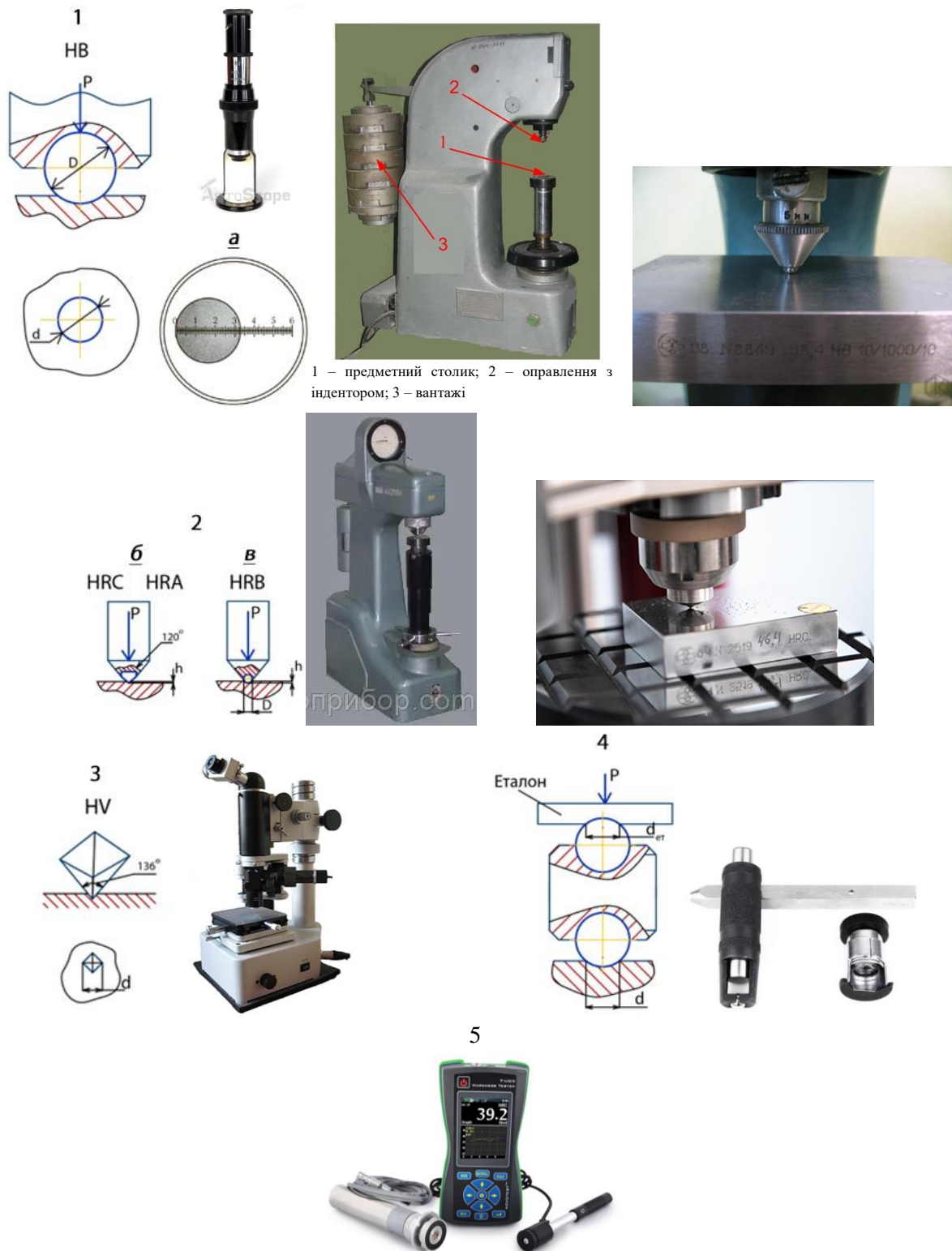


Рис. 1.1. Прилади і схеми випробувань твердості:

1 – метод Брінелля: а – вимірювання діаметра відбитка лупою з поділками (мікроскоп);  
 2 – метод Роквелла: б – алмазним конусом; в – сталеву кулькою; 3 – метод Віккерса та мікротвердомір ПМТ-3; 4 – метод Польді; 5 – твердомір універсальний Т-УДЗ (динамічний Т-ДЗ, ультразвуковий Т-УЗ, комбінований Т-УДЗ)

$$HB = P / F, \quad (1.1)$$

де  $F$  – площа поверхні утвореного шарового сегмента,  $\text{мм}^2$ , який розраховують за формулою  $F = \pi \cdot D \cdot h$ , де  $D$  – діаметр кульки;  $h$  – глибина відбитка.

Оскільки глибину відбитка  $h$  вимірювати складніше, ніж його діаметр, то звичайно  $h$  виражають через діаметр кульки  $D$  і діаметр відбитка  $d$ :

$$h = \frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{2}, \text{ мм.}$$

Тоді площа поверхні відбитка,  $\text{мм}^2$ :

$$F = \frac{\pi \cdot D}{2} \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2}),$$

і твердість за Брінеллем  $HB$ , МПа:

$$HB = \frac{2P}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}. \quad (1.2)$$

Визначаючи твердість за Брінеллем кульками різних діаметрів 10, 5 і 2,5 мм, навантаження вибирають з огляду на умови подібності:

$$\frac{P}{D^2} = \text{const}, \quad P = K \cdot D^2, \quad (1.3)$$

де  $K$  – стала для даного матеріалу;  $K = 300; 100$  і  $25$ .

Діаметр кульки, навантаження і час витримки під навантаженням вибирають залежно від твердості й товщини зразка відповідно до табл. 1.1. Метод Брінелля використовують для матеріалів, які мають обмежену твердість (до 4500 МПа), що пов'язано з можливістю деформування сталеві кульки – індентора. Числові значення твердості матеріалів

залежно від діаметра відбитка розраховані і зведені до спеціальної таблиці (рис. 1.2). Випробування за методом Брінелля проводять на зразках або деталях. Для цього спочатку підготовлюють площину поверхні, обробивши її, щоб вона була рівною. Якщо рівень твердості відомий, то визначають глибину відбитка, мм:

$$h = P / \pi \cdot D \cdot HB. \quad (1.4)$$

Орієнтовно товщина зразка для випробувань має бути більшою за  $10h$ . Відстань від центра відбитка до краю має бути не менше ніж  $2,5d$ , а між центрами двох сусідніх відбитків – не менше ніж  $4d$  (табл. 1.1).

Таблиця 1.1

### Вибір діаметра кульки і навантаження залежно від твердості і товщини зразка

Матеріал	Інтервал твердості, МПа	Мінімальна товщина зразка, мм	Співвідношення між навантаженням і діаметром кульки $P = \kappa D^2$	Діаметр кульки, мм	Навантаження Р, Н	Витримка під навантаженням, с
Чорні метали	4500...1400	6-3 4-2 2	$P = 300D^2$	10 5 2,5	30000 7500 1875	10
	< 1400	6 6-3 3	$P = 100D^2$	10 5 2,5	10000 2500 625	10
Кольорові метали	> 1300	6-3 4-2 2	$P = 300D^2$	10 5 2,5	30000 7500 1875	30
	350...1300	9-3 6-3 3	$P = 100D^2$	10 5 2,5	10000 2500 625	30
	80...350	6 6-3 3	$P = 25D^2$	10 5 2,5	2500 625 156	60

Для отримання правильних результатів необхідно, щоб  $d=(0,2...0,6)D$ . Діаметр відбитка вимірюють у двох взаємно перпендикулярних напрямках за допомогою мікроскопа, який має на лінзі об'єктива відрахункову шкалу. Підраховують середньоарифметичну величину  $HB$  і за таблицею Брінелля визначають твердість (табл. 1.2).

Таблиця 1.2

## Співвідношення чисел твердості, визначених на різних твердомірах

Роквелл		Брінелль	
HRA	HRC	HB (3000H)	Діаметр відбитка, мм
89	72	7820	2,20
86,5	70		
86	69	7440	2,25
85,5	68		
85	67	7130	2,30
84,5	66		
84	65	6830	2,35
83,5	64		
83	63	6520	2,40
82,5	62		
81,5	61	6270	2,45
81	60		
80,5	59	6000	2,50
80	58		2,55
79,5	57	5780	
79	56		2,60
78,5	55	5550	
78	54		2,65
77,5	53	5320	
77	52	5120	2,70
76,5	51	4950	2,75
76	50		
75,5	49	4770	2,80
74,5	48	4600	2,85
74	47	4480	2,89
73,5	46	4370	2,92
73	45	4260	2,96
72,5	44	4150	3,00
71,5	42	3930	3,08
70,5	40	3720	3,16
	38	3520	3,25
	36	3320	3,34
	34	3130	3,44
	32	2970	3,53
	30	2830	3,61
	28	2700	3,69
	26	2600	3,76
	24	2500	3,83
	22	2400	3,91
	20	2300	3,99

Таблиця розрахована на діаметр кульки  $D = 10$  мм. Якщо твердість визначають за допомогою кульок діаметром 5 або 2,5 мм, то, відповідно, діаметр відбитка слід помножити на 2 або 4. Наприклад, якщо в результаті випробувань за допомогою кульки діаметром 5 мм отриманий відбиток дорівнює діаметру 1,65 мм, то для визначення твердості необхідно:  $1,65 \times 2 = 3,30$  мм і за цим значенням діаметра відбитка знайти  $HB = 341$  МПа.

**1.2. Метод Роквелла** заснований на тому, що твердість вимірюють вдавленням алмазного конуса з кутом при вершині  $120^\circ$  (рис. 1.1, 2 а) або сталеві кульки діаметром 1,588 мм (рис. 1.1, 2 б). Оцінюють твердість за глибиною відбитка, а чисельні значення відраховують безпосередньо за шкалами індикатора приладу. Індикатор має три шкали: А, В і С. Для матеріалів, що мають твердість  $HB < 4500$  МПа (кольорові метали та їх сплави, сталі після відпалу, високого відпускання) використовують шкалу В, і при вимірюванні вдавлюють кульку під навантаженням 1000 Н. Позначення твердості при цьому –  $HRB$ .

Алмазний конус використовують при випробуванні більш твердих сталей. При цьому звичайно використовують шкалу С з навантаженням 1500 Н, а твердість позначають  $HRC$ . Для матеріалів твердістю  $HB \approx 4000 \dots 7800$  МПа використовують шкалу А з навантаженням 600 Н. Відповідно твердість позначають  $HRA$ . Ряд навантажень 600; 1000 і 1500 Н (рис. 1.1, 2) вміщують у собі попереднє навантаження  $P_0$ . Твердість за Роквеллом визначають в умовних одиницях. За одиницю твердості взято величину, яка дорівнює осьовому переміщенню індентора на 0,002 мм.

При вимірюванні алмазним конусом і кулькою діаметром 1,588 мм можна розрахувати твердість згідно з формулами:

$$\text{- для шкал А і С} \quad HR = 100 - E; \quad (1.5)$$

$$\text{- для шкали В} \quad HRB = 130 - E. \quad (1.6)$$

Величину  $E$  визначають як відношення:

$$E = \frac{h - h_0}{0,002}, \quad (1.7)$$

де  $h$  – глибина занурення індентора під дією загального навантаження;  
 $h_0$  – те саме, під дією попереднього навантаження 100 Н.

Випробування за методом Роквелла проводять на зразках або деталях. Поверхню зразка перед випробуванням шліфують. Зразок установлюють на предметний стіл приладу і навантажують спочатку попереднім навантаженням 100 Н, що відмічається за шкалою індикатора установленням маленької стрілки напроти червоної крапки на циферблаті. Після цього суміщають нуль чорної шкали з великою стрілкою і включають систему повного навантаження. При цьому глибина занурення індентора збільшується. Після автоматичного навантаження і зняття основного навантаження велика стрілка показує твердість на певній шкалі. Чим більша твердість матеріалу, тим менша глибина занурення індентора. Правильність показів приладу перевіряють за *еталонами* – зразками, твердість яких відома. Межі вимірювання твердості за шкалами А, В і С наведено в табл. 1.3.

Таблиця 1.3

**Таблиця для визначення типу індентора, навантаження і шкали при вимірюванні твердості за Роквеллом**

Шкала	Позначення твердості за Роквеллом	Тип індентора	Межі вимірювання в одиницях твердості за Роквеллом	Навантаження, Н	Відповідна твердість за Брінеллем
<b>A</b>	<i>HRA</i>	Алмазний конус	70...89	600	3750...7820
<b>B</b>	<i>HRB</i>	Сталева кулька	25...100	1000	1050...2400
<b>C</b>	<i>HRC</i>	Алмазний конус	122...69	1500	2410...6830

Шкалою А користуються при вимірюванні твердості матеріалів, якщо вона більша, ніж у загартованих сталей (тверді сплави, кераміка та ін.).

За шкалою В оцінюють твердість м'яких матеріалів, таких, як мідь, латунь, бронза, алюміній, незагартовані сталі.

За шкалою С вимірюють твердість переважно загартованих сталей.

**1.3. Метод Віккерса** засновано на тому, що твердість визначають вдавлюванням чотиригранної алмазної піраміди з кутом при вершині  $136^\circ$  (рис. 1.1, 3) в поверхню зразка. Перед випробуванням поверхню зразка шліфують. Твердість оцінюють відношенням навантаження до поверхні відбитка:

$$HV = P/F = \frac{2 \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = \frac{0,189P}{d^2}, \text{ МПа}, \quad (1.8)$$

де  $\alpha$  – кут при вершині,  $\alpha = 136^\circ$ ;  $d$  – середньоарифметичне значення довжин обох діагоналей відбитка (рис. 1.1, 3).

Діапазон навантажень становить 50; 100; 200; 300; 500 і 1000 Н. Можливість застосування відносно малих навантажень 50...100 Н дає змогу визначити твердість деталей малої товщини і тонких поверхневих шарів (цементованих, азотованих тощо). Товщина зразка, що випробується, повинна бути не менше ніж 1,5 діагоналі відбитка.

**1.4. Вимірювання мікротвердості** проводять на мікротвердомірах, обладнаних мікроскопами. Поверхню зразка, що підлягає випробуванню, шліфують і полірують. Твердість за цим методом визначають шляхом вдавлювання в матеріал алмазної піраміди з тими ж геометричними характеристиками, що і в приладі Віккерса (з кутом при вершині  $136^\circ$ ), але за малих навантажень від 0,05 до 5 Н. Відбиток при цьому має малі розміри, що дає змогу оцінювати твердість окремих зерен у будь-яких матеріалів.

Звичайно при вимірюванні мікротвердості застосовують прилад ПМТ-3 (рис. 1.1, 3). Розраховують мікротвердість за формулою (1.8).

**1.5. Метод Польді** – спосіб орієнтовного визначення твердості  $HV$  за допомогою переносного приладу динамічним вдавлюванням шарового або конічного індентора (рис. 1.1, 4).

Принцип дії приладу засновано на тому, що куля під дією удару, який наноситься вручну, одночасно вдавлюється в поверхню, що випробується, і в еталонний зразок, твердість якого відома.

Твердість за методом Польді (згідно з методом Брінелля) визначають як:

$$HB = HB_{em} \left( \frac{d}{d_{em}} \right)^2 \quad (1.9)$$

Цей метод використовують для контролю твердості великогабаритних виробів і деталей.

## **2. Необхідні прилади і матеріали**

2.1. Твердомір Брінелля.

2.2. Мікроскоп Брінелля.

2.3. Твердомір Роквелла.

2.4. Зразки конструкційних матеріалів різної твердості.

2.5. Мікротвердомір ПМТ - 3.

## **3. Послідовність виконання роботи**

3.1. Ознайомитися з конструкцією, принципом дії і послідовністю роботи твердомірів Брінелля, Роквелла і ПМТ - 3.

3.2. Вибрати прилад для визначення твердості кожного з матеріалів, тип індентора і навантаження.

3.3. Провести вимірювання й отримані результати занести до табл. 1.4. Побудувати гістограму (графічне представлення табличних даних) твердості представлених матеріалів.

## **4. Результати роботи**

4.1. Результати роботи занести до табл. 1.4.

## **5. Контрольні запитання**

5.1. Що таке твердість і якими методами можна її вимірювати?

5.2. Сутність методу Брінелля. Для яких матеріалів цей метод застосовують?

5.3. Сутність методу Роквелла. Як визначити необхідну для використання шкалу приладу? Для яких матеріалів цей метод застосовують?

5.4. У чому сутність методу Віккерса? В яких випадках їх застосовують?

5.5. Які особливості вимірювання мікротвердості?

Таблиця 1.4

Назва матеріалу	Метод вимірювання твердості	Навантаження, кН	Діаметр відбитка, мм	Твердість	
				НВ, МПа	НРС
Мідь М1	Брінелля, $D = 10$ мм	10			--
Латунь Л60	--/--	10			--
Силумін АЛ2	--/--	10			--
Сталь 20	--/--	30			--
Сталь 45	--/--	30			--
Сталь 65	--/--	30			--
Сталь 45 (загартована)	Роквелла, алмазний конус	1,471	--		

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

### Макроструктурний аналіз металів і сплавів

**Мета роботи:** вивчити сферу застосування і методику проведення аналізу макроструктури сплавів.

#### 1. Основні теоретичні положення

**Макроскопічна структура** – це будова сплавів, яку можна бачити неозброєним оком або при невеликому збільшенні (до 30...120 разів). **Макроаналіз** проводять за макрошліфами або зламами (**фрактографія**). Макроаналіз дає уяву про загальну будову металів і сплавів й дозволяє оцінити її особливості після різних видів обробки: лиття, зварювання, деформування тиском, термообробки та ін.

За допомогою макроаналізу можливо визначати метод виготовлення, порушення суцільного складу (усадкова пухкість, тріщини, газові бульбашки, дефекти зварювання та ін.), хімічну неоднорідність (**ліквацію** і грубі чужорідні включення), вид зламу тощо.

Залежно від величини зерен (дендритів) відрізняють дрібно- і великозернисту структури. Дрібнозерниста структура утворюється на межах інтенсивного відбору теплоти по бокових і нижніх поверхнях відливків при тепловій взаємодії між розплавленим металом і стінками виливниці або форми. Великозерниста структура утворюється в середній

частині відливків, де відсутній направлений інтенсивний відбір теплоти. Між зонами дрібних і великих рівновісних зерен утворюється зона стовпчастих дендритів, що пояснюється направленим відбором теплоти при зменшенні швидкості охолодження (рис. 2.1).

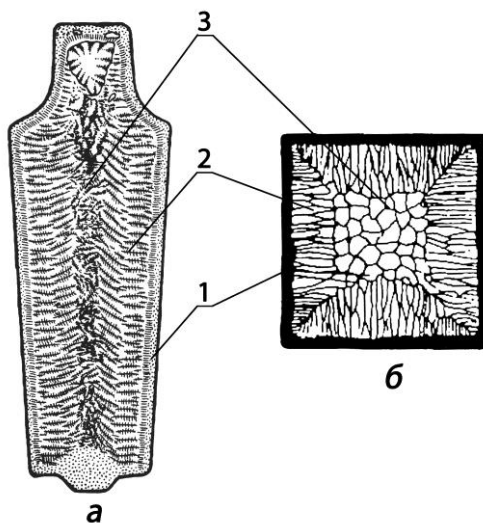


Рис. 2.1. Схема будови виливка:

1 – зона дрібних рівновісних дендритів; 2 – стовпчасті кристали;  
3 – зона великих дендритів

Унаслідок дії на литий метал тиском рівновісні дендрити деформуються і набирають вигляду витягнутих смуг. Утворюється волокниста структура (рис. 2.2). По кордонах волокон розташовуються неметалеві включення: сульфіди, шлаки, оксиди.

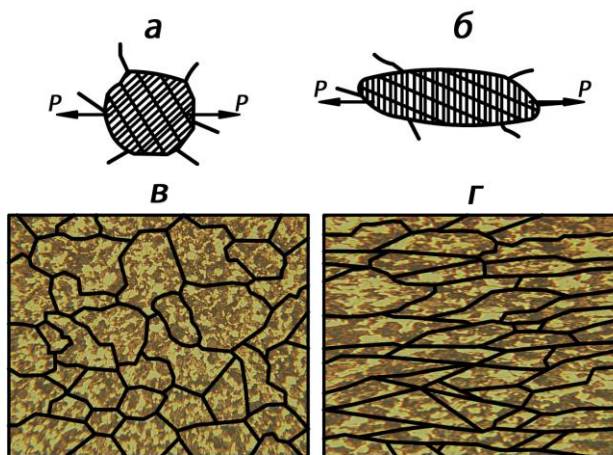


Рис. 2.2. Зміна форми зерна і макроструктури:  
а, в – до деформації; б, г – після деформації

Вивчаючи хімічну неоднорідність структури, найбільшу увагу приділяють *ліквації* сірки та фосфору.

За виглядом зламів оцінюють характер руйнування деталі (*в'язке або крихке*).

## 2. Техніка проведення макроструктурного аналізу

Зразки (*темплети*) для проведення аналізу вирізають механічними пилами або за допомогою газових різаків. Іноді після прокатки і кування проби можуть бути відрізані у гарячому стані. Поверхню зразків, яку контролюють, торцюють і шліфують. При дослідженні виливків зразки беруть з їх найбільш забруднених частин – випорів, прибутків, місць подачі металу та ін. Для вивчення макроструктури заготовок, одержаних обробкою тиском, проби вирізають уздовж волокон, напрям яких можна визначити за конфігурацією виробу. Досліджуючи зварні шви, розглядають як поздовжні, так і поперечні перерізи. З метою виявлення макроструктури темплети спеціально обробляють. Після шліфування абразивним кругом і повстиною зі шліфувальним порошком їх протравлюють. Зразок, підготовлений за допомогою механічної обробки і травлення, називають *макрошліфом*.

Найбільш простий реактив для травлення зразків із вуглецевої і малолегованої сталі – 4...10 %-вий розчин  $HNO_3$ , який використовують у холодному стані.

Для виявлення макроструктури багатьох марок сталі застосовують гарячий (60...80 °С) 50 %-вий розчин соляної кислоти  $HCl$ . Зразки протравлюють упродовж 5...45 хв до чіткого виявлення макроструктури.

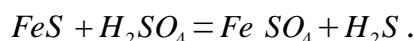
Готовий макрошліф перед травленням протирають спиртом для очищення від поверхневих забруднень. Після травлення темплети промивають у теплій воді.

Макроструктуру сталі після лиття виявляють травленням в 15 %-вому розчині персульфату амонію  $(NH_4)_2S_2O_8$ , нагрітого до температури 80...90 °С. Макрошліф вуглецевої сталі видержують у реактиві 5...10 хв і дещо більше; леговану сталь – ще більше (табл. 2.1).

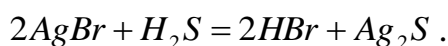
## Склад реактивів для травлення сталей і чавунів

Сплави	Реактив		Особливості травлення
	призначення	склад	
Вуглецеві та низьколеговані сталі, чавуни	Виявлення ліквації, дефектів, дендритності, неоднорідності, волокнистості	10...20 мл сірчаної кислоти $H_2SO_4$ , 90...80 мл води $H_2O$	Температура – 20 °С або 70 °С, тривалість – декілька годин
Високолеговані і корозійностійкі сталі	Виявлення загальної макроструктури, дефектів, ліквації, волокнистості, дендритності	10 мл сірчаної кислоти $H_2SO_4$ , 50 мл соляної кислоти $HCl$ , 40 мл води $H_2O$	Киплячий розчин, тривалість – 10...60 хв

Визначаючи ліквацію сірки, поверхню шліфа протирають спиртом, потім на неї накладають аркуш бромсріблястого паперу, змочуваного протягом 5 хв 5 %-вим водним розчином сірчаної кислоти, прогладжують валиком без зміщення паперу і витримують близько 30 хв. Між  $FeS$ , яка міститься у сталі, і  $H_2SO_4$  проходить хімічна реакція:



Сірчаний водень  $H_2S$ , у свою чергу, взаємодіє з бромистим сріблом фотопаперу:



Сірчане срібло має темний колір. Тому утворені на фотопапері темні ділянки показують форму і характер розподілу включень сульфідів у сплаві. Знятий з макрошліфу фотопапір миють у проточній воді, фіксують 20...30 хв у розчині гіпосульфиту, після чого знову промивають у воді протягом 10 хв і висушують.

Для **фрактографічного макроаналізу** зламів використовують свіжоотримані поверхні руйнування без механічних пошкоджень, слідів окислення, забруднень та ін. У разі потреби злами очищують і промивають

бензином, спиртом або 10 %-вим розчином  $NaOH$ , потім просушують. Очищуючи злам, треба досить обережно застосовувати реактиви, які розчиняють метал, оскільки це може призвести до зміни картини рельєфу зламу. Під час вивчення характеру і причин експлуатаційних руйнувань очищення проводять тільки після детального вивчення зламу в недоторканому вигляді. Наявність окислів, слідів масла, фарби тощо може дати додаткову інформацію про умови виникнення тріщини і розвиток процесу руйнування.

Для отримання зламів у лабораторних умовах із заготовки (деталі) вирізають зразки вздовж і (або) поперек волокон, на зразках роблять надріз, глибина якого не повинна перевищувати половину перерізу заготовки. Потім зразки руйнують за допомогою преса, копра або молота.

### **3. Вивчення та оцінка макроструктур**

Вивчення макроструктури та виявлення дефектів сплаву проводять шляхом послідовного та уважного вивчення макрошліфів або зламів. Оцінювати макроструктуру можливо і за фотографіями, виконаними в натуральну величину або з зазначенням масштабу.

**3.1. Вивчення макрошліфів.** Оцінюють макроструктуру зразків за допомогою ідентифікації (порівняння) її зі стандартними еталонами шкал макроструктур. Є 10 шкал, які ілюструють різні види дефектів. Кожна шкала складається з п'яти балів. У разі збільшення розміру і кількості дефектів бал зростає. Дефекти оцінюють цілими і половинами балів (2,0; 3,0 або 1,5; 2,5; 3,5 та ін.). У разі відсутності дефектів проставляють нуль. Коли в макроструктурі маємо дефекти кількох видів, кожний з них оцінюють окремо. На рис. 2.3 показано приклади крихкотілості в прокатних виробках: раковини, пористість, бульбашки, тріщини, ліквация.

Кожний з цих дефектів має кілька різновидів й особливі причини виникнення. Так, раковини виникають унаслідок осадки. Пори, бульбашки можуть бути розташовані по осі або біля поверхні (підкорков). Тріщини виникають від рваних, шліфувально-травильних операцій. Тонкі звивисті тріщини – флокени – виникають за  $T < 200$  °С, коли в сталі створюються великі напруження при виділенні водню. Ліквация оцінюється також за шкалами і проявляється в чотирьох вимірах: точкова, плямиста, ліквацийний квадрат або круг, підусадкова ліквация.

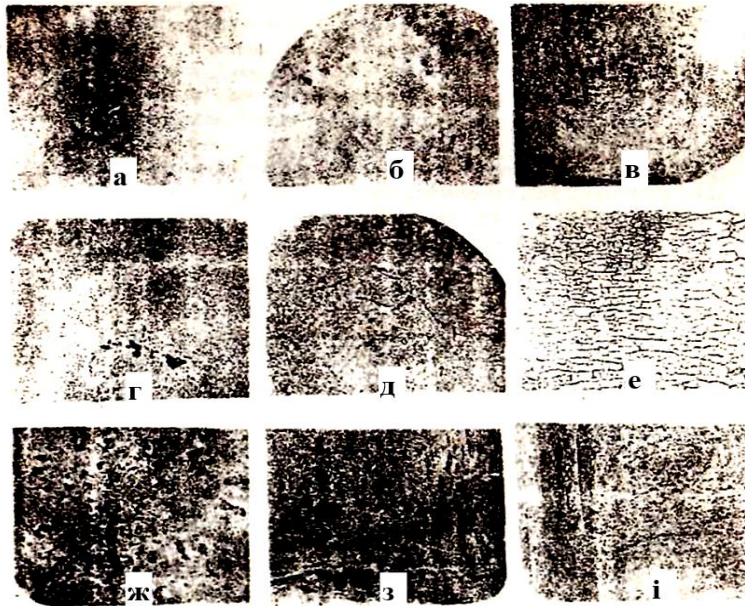


Рис. 2.3. Приклади крихкотілості в прокаті:

*а* – усадочна раковина; *б* – бульбашки; *в* – пористість за перерізом;  
*г* – порожнини; *д* – флокени; *е* – шліфувально-травильні тріщини; *ж* – загальна плямиста неоднорідність; *з* – крайова плямиста неоднорідність; *і* – ліквіаційний квадрат

**3.2. Вивчення макроструктури зламів (макроскопічна фрактографія).** Проведячи макроскопічну фрактографію, злам оцінюють за такими основними ознаками:

- орієнтація поверхні руйнування;
- макрогеометрія;
- ступінь пластичної деформації;
- шорсткість, колір, блищання.

*За орієнтацією поверхні руйнування злами розрізняють* як прямий, косий і прямий зі скосами (чашковий), конічний (рис. 2.4, *г*).

Орієнтація зламу пов'язана з характером навантаження, впливом нормальних і дотичних напружень, які спричинюють руйнування. Схема на табл. 2.2 дає змогу представити початкові напрями в'язкого і крихкого руйнування за різних видів короточасного одноразового навантаження. Прямий злам є ознакою крихкого руйнування. Чашковий утворюється при розтягуванні циліндричних зразків конструкційних легованих сталей. Косий злом утворюється зрізанням у площині максимальних дотичних напружень. Він є характерним для матеріалів з обмеженою пластичністю, наприклад у магнієвих і алюмінієвих деформованих сплавах. Конічні злами характерні для дуже пластичних матеріалів (свинець, мідь тощо).

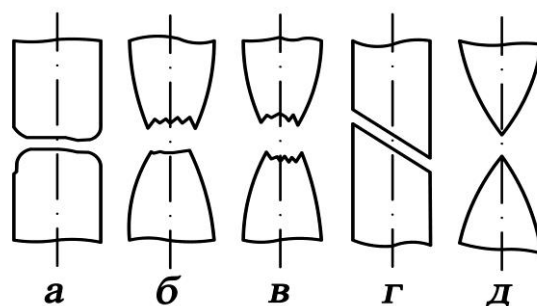


Рис. 2.4. Характерні види макрозламів при розтягуванні:  
*а* – прямий; *б* – прямий зі скосами типу «чашка-конус»; *в* – прямий зі скосами типу «подвійна чаша»; *г* – косий; *д* – конічний

Таблиця 2.2

**Початкові напрями в'язкого і крихкого руйнувань  
за різних видів короточасного навантаження  
(показані напрями максимального видовження)**

Спосіб навантаження		Напруження		Вид навантаження	
		$\delta_{\text{макс}}$	$\tau_{\text{макс}}$	Відрив	Зрізання
Розтягування					
Стискання					
Зрізання					
Кручення					

*Макрогеометрія зламу передбачає* і розмірну оцінку різних зон руйнування. За цими ознаками злами поділяють на однорідні, неоднорідні, а також злами зірочкою, шевронний («ялінка») і складної форми. Однорідний злом спостерігається лише у разі руйнування дуже крихких матеріалів (вуглецеві сталі за низьких температур).

Неоднорідність макробудови зламів видно на типових зломах руйнування від утомленості (рис. 2.5). Відрізняють осередок (центр) руйнування, зони розвитку руйнування від утомленості і доламу. У центрі руйнування знаходиться мікроскопічне місце зародження тріщини.

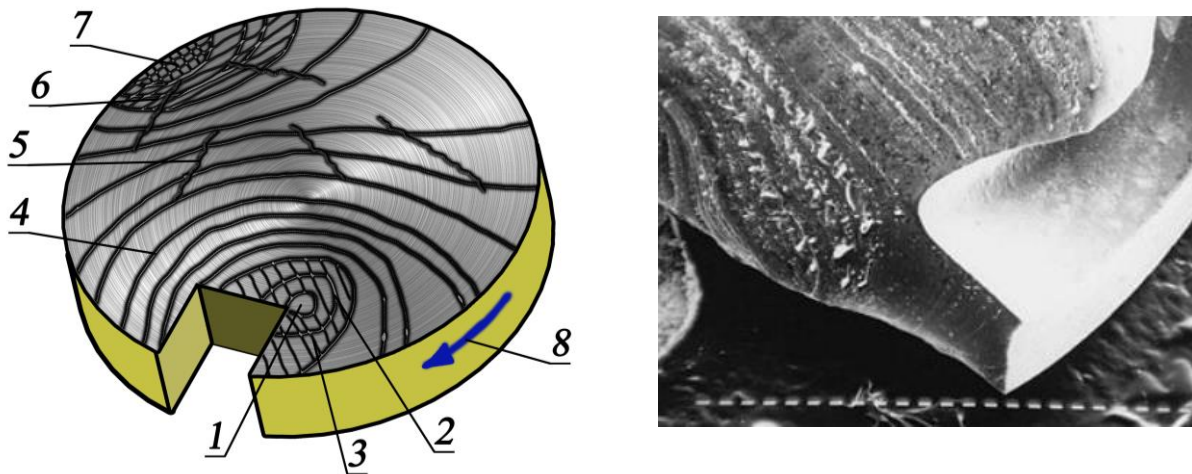


Рис. 2.5. Схема макробудови зламу від утомленості:  
 1 – центр (осередок); 2 –прицентрова зона; 3 – первинні ступені скиду; 4 – лінії втомленості; 5 – вторинні ступені скиду; 6 – перехідна зона; 7 – зона доламу; 8 – напрям обертання валу

Звичайно центри руйнування розташовані на поверхні деталі або в місцях концентрації напружень за різних дефектів. У зоні розвитку тріщини відрізняють прицентрову область і область з прискореним розвитком тріщини перед руйнуванням (доламом). Прицентрова зона дрібнозерниста з малою шорсткістю і блискучою поверхнею. Зона руйнування від утомленості відрізняється дисперсністю будови, гладкою матовою поверхнею з бархатистим відтінком. Макроскопічною ознакою злому від утомленості є лінії утомленості, утворення яких пов'язане зі зміною швидкості розповсюдження тріщини.

Зона доламу відповідає стадії швидкого руйнування, що пов'язано зі зменшенням перерізу зразка при зростанні тріщини. У крихких матеріалах злом у зоні доламу має в основному кристалічну будову, а для в'язких характерною є волокниста будова.

На макробудову зламів від утомленості суттєвий вплив справляє присутність концентраторів на поверхні зразків, вид і рівень номінальних циклічних напружень. Вплив виду і величини циклічних напружень з

урахуванням форми зразків і концентратора напружень на макробудову зламів від утомленості показано на табл. 2.3.

Таблиця 2.3

Схема будови зломів від утомленості зразків за різних видів навантаження (зони доламу заштриховані)

Високе номінальне напруження			Низьке номінальне напруження			Вид навантаження
Гладкий зразок	М'який надріз	Гострий надріз	Гладкий зразок	М'який надріз	Гострий надріз	
						Розтягування (стискання) 
						Односторонній згин 
						Двосторонній згин 
						Кручення із згином 
						Кручення

*Характеристика зламів за шорсткістю, блищанням і кольором* відповідає особливості будови і дисперсності структурних складових поверхні руйнування.

Поділ зламів на кристалічний і волокнистий дає змогу певною мірою оцінити і мікроскопічний механізм руйнування. Присутність кристалічного зламу є однією із характерних ознак *крихкого руйнування* (рис. 2.6, а), а присутність волокнистого – *в'язкого руйнування* (рис. 2.6, б).

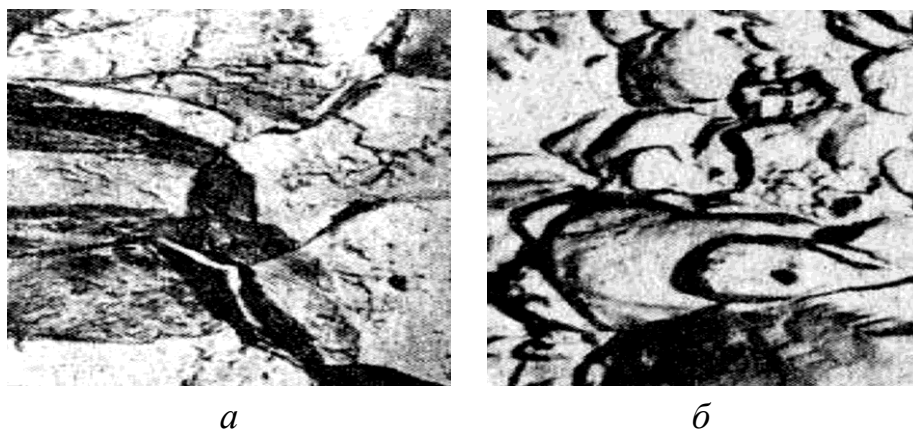


Рис. 2.6. Вид зламу за крихкого (а) і в'язкого (б) руйнування (x5000)

Кристалічний злам (рис. 2.7, а, в, г) утворюється у разі невеликої пластичної деформації. Поверхня руйнування з дуже дрібнозернистою будовою, гладка, матова, схожа на поверхню руйнування фарфору – такий злом класифікують як фарфороподібний.

Волокнистий злам (рис. 2.7, е, ж, з, і) має пошарову будову, що пов'язано з анізотропією властивостей.

Каменеподібним (рис. 2.7, к) називають повністю або частково міжзернистим зломом, який характеризується грубозернистою бугристою будовою, без металевго блиску.

Нафталінісний злам (рис. 2.7, л) відрізняється великозернистою будовою та утворенням на поверхні зламу гладких, блискучих площинних ділянок (фасеток) неметалевого вигляду. Утворюється в інструментальних, головним чином, швидкорізальних сталях як результат повторних нагрівань без відпалу чи при гарячому деформуванні. Утворенню такого зламу відповідає велика крихкість і значне зниження стійкості інструменту.

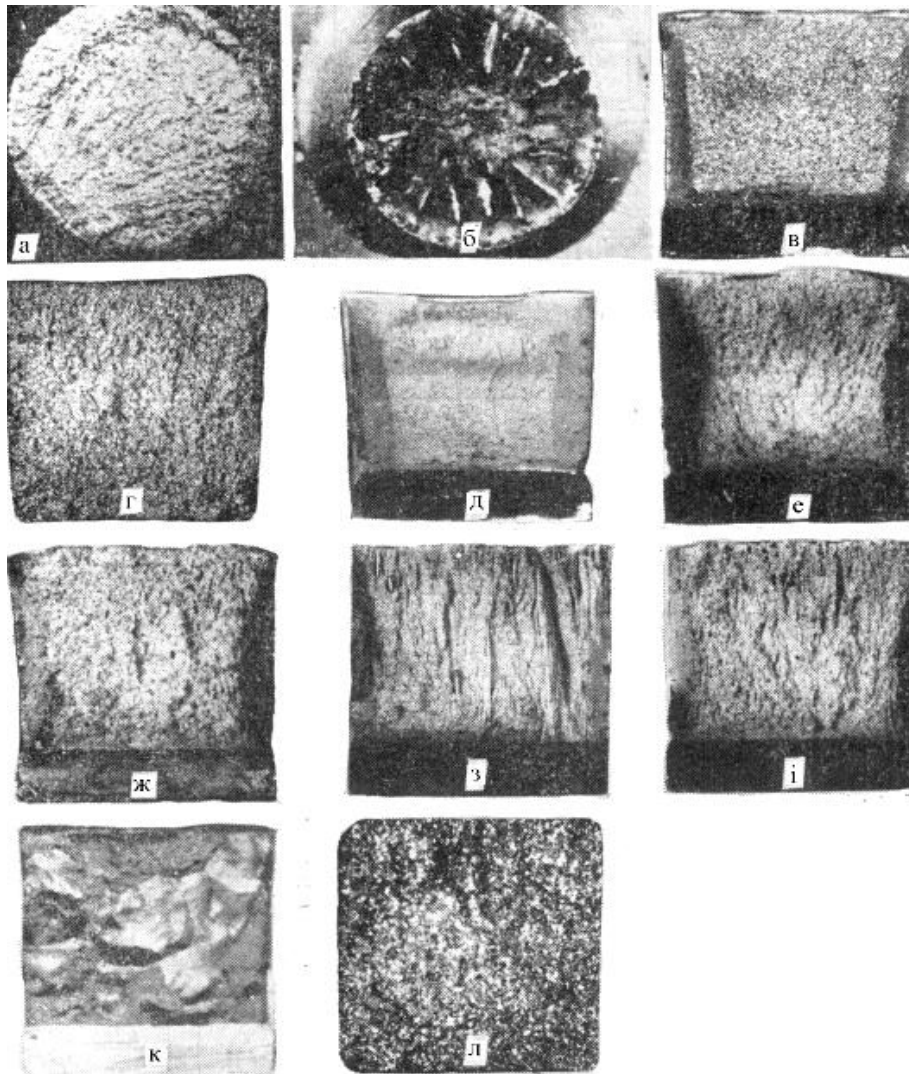


Рис. 2.7. Види макрозламів при розтягуванні (*а, б*) та ударному вгинанні (інші):  
*а, в, г* – кристалічний; *б* – зірчкою; *д* – фарфороподібний; *е, ж, з, і* – волокнистий;  
*к* – каменеподібний; *л* – нафталінісний

*Різниця зламів за кольором* пов'язана зі структурою і, головним чином, ступенем легованості сталі. Вуглецеві сталі мають сріблястий колір зламу, нікелеві – світло-жовтий, хромисті – світло-сірий. Марганець дає характерний тьмянний сірий колір. У сталях, що леговані різними хімічними елементами, колір зламу в основному визначають марганець і нікель.

#### **4. Необхідні прилади і матеріали**

**4.1.** Зразки, кювети, пінцети, наждачний папір, вода, збільшуваче скло, фотопапір, реактиви для травлення:

15 %-вий розчин  $(NH_4)_2S_2O_8$ ;

5 %-вий розчин  $H_2SO_4$ ;

10 %-вий  $HNO_3$ ; 85 г -  $CUCl_2$  , 53 г -  $NH_4Cl$ .

## 5. Послідовність виконання роботи

5.1. Ознайомитися із сутністю, методикою виконання і застосуванням макроаналізу та коротко описати.

5.2. Дослідити і описати макрошліфи зразків: литого, обробленого тиском і зварного з'єднання (рис. 2.8). Виконати схематично малюнки зразків, вказуючи марку матеріалу, характер макроструктури та її особливості (напрямок дендритів, поверхню відбору теплоти та ін.), присутність і характер дефектів.

5.3. Підготувати і дослідити макрошліф на ліквіацію сірки.

5.4. Дослідити злами двох зразків і описати їх.

5.5. Результати оформити у вигляді табл. 2.4.

5.6. За відбитком розподілу сірки в зразку описати, в яких місцях зосереджена сірка. Звернути увагу на характер її розподілу.

5.7. Результати вивчення зламів оформити у вигляді табл. 2.5.

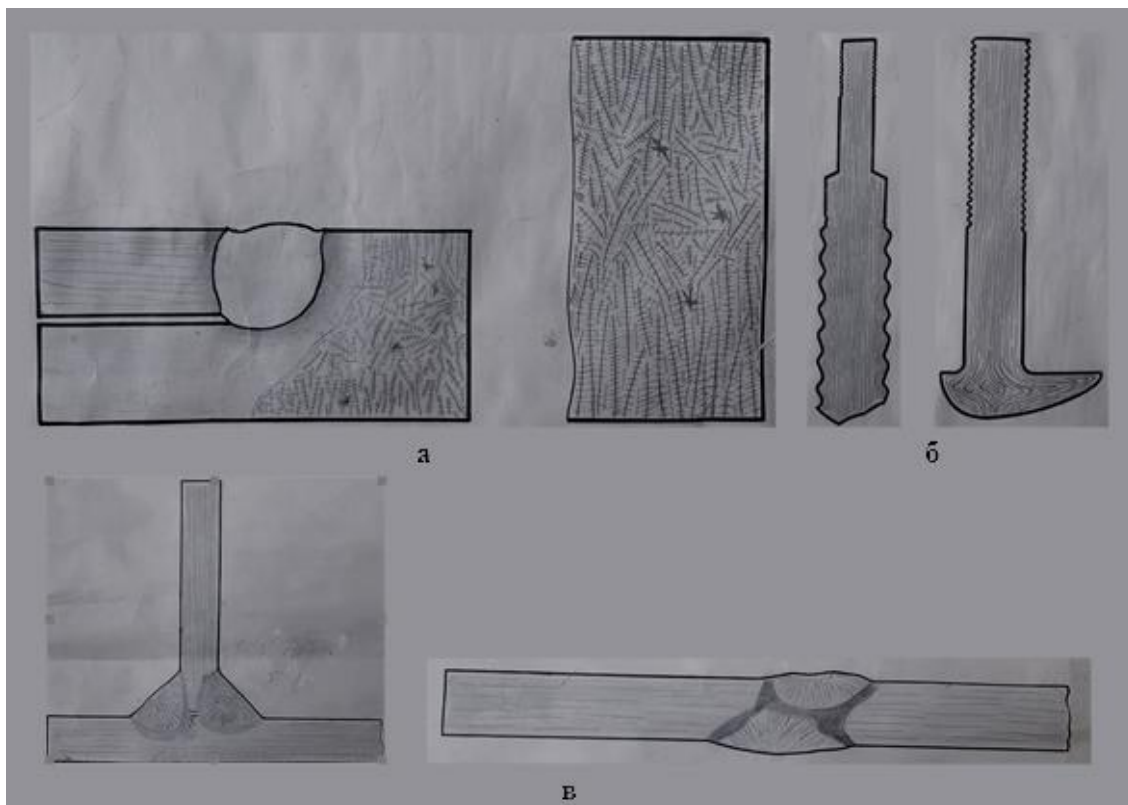


Рис. 2.8. Приклади ескізів макрошліфів зразків: литого (а), оброблених тиском і різанням (б) і зварних з'єднань (в)

## 6. Результати роботи

6.1. Результати роботи занести до табл. 2.4, 2.5.

Таблиця 2.4

### Результати аналізу макрошліфів

Характеристика	Макрошліфи		
	Литий	Оброблений тиском	Зварне з'єднання
Зображення макрошліфа			
Марка сталі			
Реактив для травлення			
Макроструктура та її особливості			
Дефекти			

Таблиця 2.5

### Результати макроаналізу зламів

Характеристика	Зразки зламів	
	№ 1	№ 2
Зображення зламу		
Марка матеріалу		
Структура злому		
Характер злому /в'язке чи крихке руйнування		

## 7. Контрольні запитання

7.1. Яка мета проведення макроаналізу?

7.2. За якими ознаками структури макрошліфа можливо визначити характер попередньої обробки матеріалу?

7.3. Які види зламів і відповідні до них структури вам відомі?

7.4. Назвіть основні можливі дефекти, які виявляє макроаналіз.

7.5. Якими методами виявляють ліквіацію сірки, фосфору?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

### Мікроструктурний аналіз сталей і чавунів у рівноважному стані

**Мета роботи:** вивчити сферу застосування і методику проведення мікроаналізу, а також структурний та фазовий склад сталей і чавунів у рівноважному стані.

#### 1. Основні теоретичні положення

**Мікроаналіз металів і сплавів** проводиться на підготовлених зразках – **мікрошліфах** – при значних збільшеннях (від 50 до 3000 разів і більше) за допомогою мікроскопа (рис. 3.1). Аналіз мікроструктури надає можливість визначити величину і розташування зерен, розміри і кількість дрібних неметалевих включень і різних фаз у металі, контролювати стан структури поверхневого шару деталі, виявити мікроефекти будови металів і сплавів.



Рис. 3.1. Мікроскоп металографічний вертикальний МІМ-7 та зразки мікрошліфів сталей і чавунів

**Мікрошліф** – це вирізаний із деталі або заготовки зразок, поступово оброблений шліфуванням, поліруванням і хімічним травленням. У процесі хімічного травлення поверхню шліфа обробляють реактивами, склад

і концентрація яких залежать від досліджуваного сплаву. Найчастіше застосовують реактиви, наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

### Рекомендовані реактиви

Для вуглецевих і низько-вуглецевих сталей і чавунів	4...5 %-ий розчин $HNO_3$ в етиловому спирті $C_2H_5OH$
	4 %-ий розчин пікринової кислоти $C_6H_2(NO_2)OH$ в етиловому спирті
Для жароміцних сплавів	20 см <sup>3</sup> – $HCl$ ; 5 г – $CuSO_4$ ; 20 см <sup>3</sup> – $H_2O$
Для нержавіючих сталей	Три частини $HCl$ і одна частина $HNO_3$ (через 24 год після приготування)

Потрапляючи на травлену поверхню шліфа, світло по-різному відбивається від фаз, які мають різне забарвлення. Біля виступів фаз і в заглибленнях з'являються тіні і внаслідок великого розсіювання світла кордони однорідних зерен і фаз здаються під мікроскопом темними лініями. На рис. 3.2 показано схему, що пояснює видимість кордонів зерен фериту (а) і перліту пластинчастого (б) під мікроскопом.

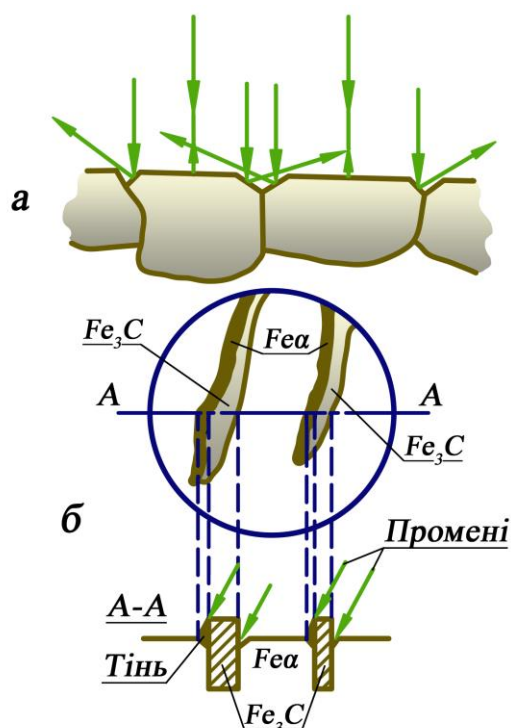


Рис. 3.2. Схема, що пояснює видимість кордонів зерен

Значне збільшення дає змогу роздивлятися елементи структури не менше ніж 0,2 мкм, що здебільшого є достатнім для визначення розмірів багатьох фаз, присутніх у сплавах.

Загальне збільшення мікроскопа знаходять за формулою:

$$N_m = N_{об} \cdot N_{ок} = \frac{250 \cdot l}{F_{об} \cdot F_{ок}}, \quad (3.1)$$

де  $N_{об}$  і  $N_{ок}$  – збільшення об'єктива та окуляра (відповідно);  $l$  – оптична довжина тубуса;  $F_{об}$  і  $F_{ок}$  – фокусні відстані об'єктива та окуляра (відповідно).

Наприклад:  $N_{ок} = 20^x$  і  $N_{об} = 32.5^x$ , тоді  $N_m = 20 \cdot 32.5 = 650^x$ ,  $x$  показує кратність збільшення.

Аналіз мікроструктур сталей і чавунів, які розглядають під мікроскопом, проводять за допомогою діаграми стану Fe-Fe<sub>3</sub>C (рис. 3.3).

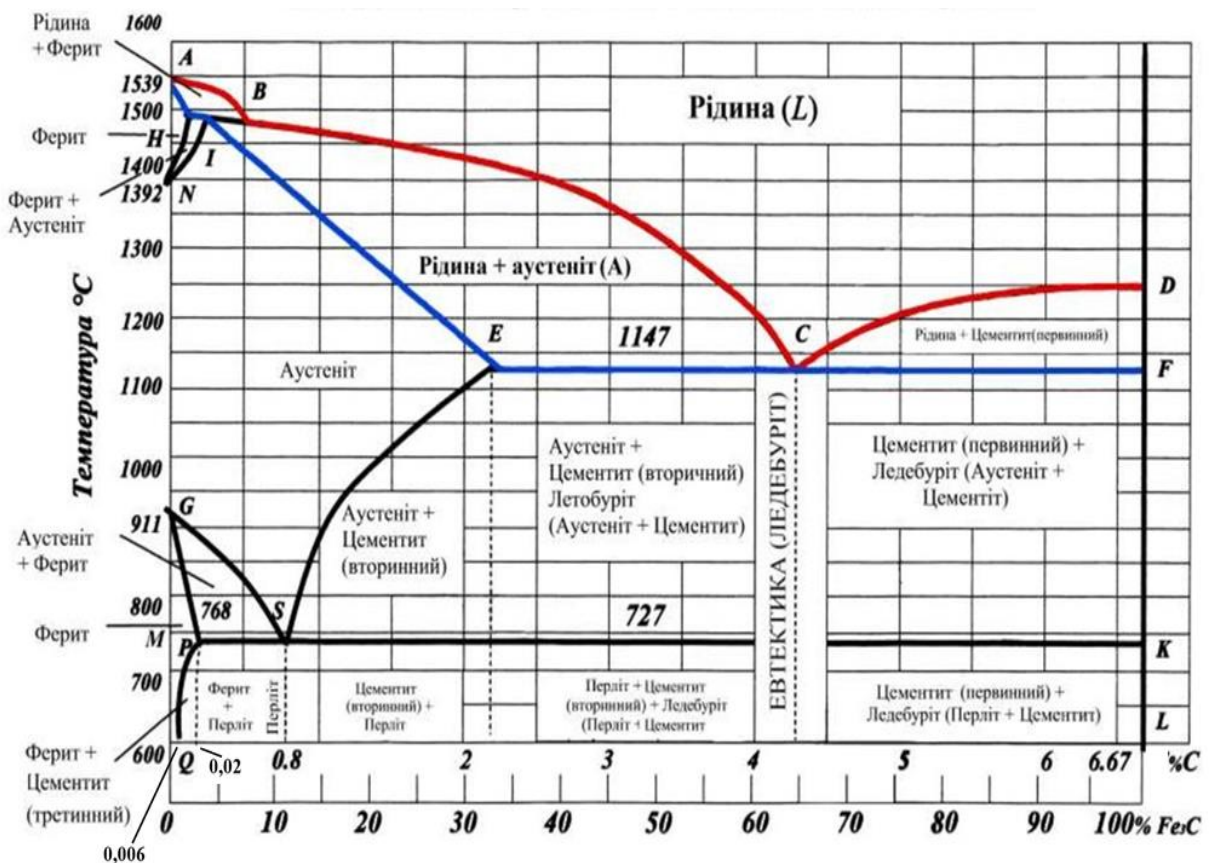


Рис. 3.3. Діаграма стану сплавів Fe-Fe<sub>3</sub>C

Сплави, які містять менше 2,14 % вуглецю, називають *сталями*, а сплави з кількістю вуглецю понад 2,14 % – *чавунами*.

## 2. Вивчення та оцінка мікроструктур

При зниженні температури розчинність вуглецю в  $\alpha$ -залізі знижується (див. лінію  $PQ$ ).

За 727 °С у залізі розчиняється 0,02 % С (точка  $P$ ), а за кімнатної температури – 0,006 % (точка  $Q$ ). З огляду на це сплави заліза із вмістом вуглецю до 0,006 % мають структуру *фериту* ( $\Phi$ ) (НВ = 500...800 МПа) – твердого розчину впровадження вуглецю в  $\alpha$ -залізі (рис. 3.4,  $a$ ).

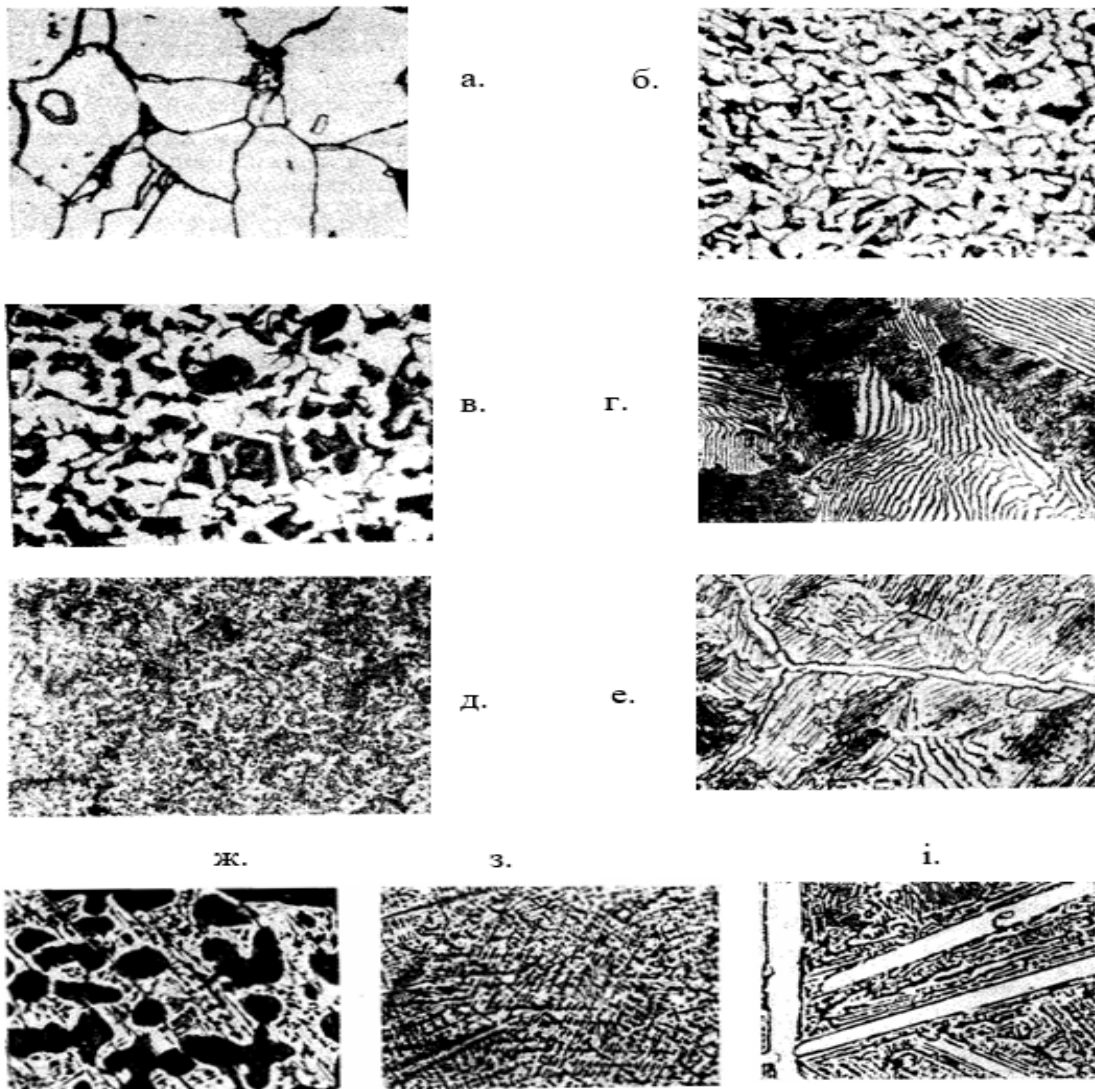


Рис. 3.4 Мікроструктури залізовуглецевих сплавів:  
 $a, б, в$  – доевтектоїдні сталі ( $a$  – феритна з  $C \approx 0,05$  %;  $б$  – ферито-перлітна  $C = 0,15$  %;  $в$  – ферито-перлітна  $C = 0,35$  %);  $г, д$  – евтектоїдні сталі  $C = 0,8$  % ( $г$  – пластинчатий перліт;  $д$  – зернистий перліт);  $е$  – заевтектоїдна перлітно-цементитна сталь  $C = 1,2$  %;  
 $ж, з, і$  – білі чавуни ( $ж$  – доевтектичний  $C = 3,2$  %; П+Л+Ц;  $з$  – евтектичний,  $C = 4,3$  %, Л;  $і$  – заевтектичний  $C = 5$  %, Л+Ц)

Мікроструктура доевтектоїдної сталі (до 0,8 % C ) складається з **фериту і перліту**. **Перліт (П)** – механічна суміш, яка складається з фериту і цементиту та містить у собі 0,8 % C (евтектоїд). **Цементит (Ц)** являє собою хімічну сполуку  $Fe_3C$  білого кольору, яка характеризується високою твердістю (НВ = 8000 МПа) і містить 6,67 % C.

При збільшенні вмісту вуглецю кількість перліту (темні ділянки шліфа) збільшується (див. рис. 3.4, б, в). За зовнішнім виглядом мікроструктури доевтектоїдної сталі можна визначити вміст у ній вуглецю. З огляду на те, що в фериті розчинена дуже невелика кількість вуглецю, припускають, що весь вуглець у доевтектоїдній сталі зосереджений в перліті. Тоді, орієнтовно визначивши площу шліфа, яку займають, відповідно, ферит і перліт, визначають кількість вуглецю за відношенням:

$$C = \frac{F_n \cdot 0,8}{100}, \%, \quad (3.2)$$

де  $F_n$  – площа, яку займає перліт, %.

Мікроструктура евтектоїдної сталі (0,8 % C) складається цілком з **перліту** (див. рис. 3.4, г). Звичайно перліт має пластинчасту будову. Товщина пластинок фериту й цементиту співвідноситься як 7,3:1, а кількість фазових складових у перліті визначається співвідношенням відрізків  $SK/PS$ . Унаслідок спеціальної термічної обробки перліт може мати зернисту будову (рис. 3.4, д).

Мікроструктура заевтектоїдної сталі (0,8...2,14 % C) має структуру **перліту і вторинного цементиту** (рис. 3.4, е), який виділяється при охолодженні по границях зерен перліту у вигляді цементитної сітки. Чим більше вуглецю в сталі, тим масивніша цементитна сітка.

Вміст вуглецю в заевтектоїдних сталях також можна розрахувати, визначивши для цього площу шліфа, яку займає цементит:

$$C = \left( \frac{0,8 \cdot F_n}{100} + \frac{6,67 \cdot F_u}{100} \right), \%, \quad (3.3)$$

де  $F_u$  – площа шліфа, яку займає цементит.

За температури вище ліній *GS* і *SE* у сталях існує однофазова структурна складова **аустеніт (А)** – твердий розчин впровадження вуглецю в  $\gamma$ -залізі. Максимальна розчинність вуглецю в аустеніті сягає 2,14 % за температури 1147 °С. У разі збільшення і зменшення температури відсоток розчиненого вуглецю зменшується (лінії *AE* і *SE*). Під мікроскопом аустеніт має вигляд світлих зерен із характерними подвійними лініями.

Чавуни теоретично містять 2,14...6,67 % С. Практично використовують чавуни, які містять не більше 5 % С. Мікроструктурний аналіз білих чавунів у рівноважному стані показує наявність у структурі характерної складової – **ледебуриту**.

**Ледебурит (Л)** – механічна суміш (евтектика) аустеніту і цементиту, яка утворюється за температури 1147 °С з рідкого сплаву, що має вміст вуглецю 4,3 %. За температури нижче 727 °С ледебурит складається з перліту і цементиту. Твердість ледебуриту досягає  $HV \cong 7000$  МПа.

Для доевтектичних чавунів структура складається з **перліту, цементиту і ледебуриту** (рис. 3.4, *ж*), для заевтектичних – **ледебуриту і цементиту** (рис. 3.4, *і*). Евтектичний чавун (4,3 % С) (рис. 3.4, *з*) являє собою цілком **ледебуритну структуру**.

Чавуни з такими структурами називають **білими**, тому що в зломі вони мають білий колір. Їх не можна обробляти тиском і різанням, оскільки вони крихкі.

Є **відбілені** чавуни, які мають на поверхні структуру білого чавуну, а в середині – структуру сірого. Це досягається спеціальними умовами лиття. Виріб має на поверхні високу твердість і високу зносостійкість, особливо в умовах абразивного зношування.

Якщо частина вуглецю завдяки штучним засобам (повільного охолодження, спеціальної термообробки) виділяється у вигляді **вільного графіту** – то такі чавуни називають **сірими**, тому що в зламі вони мають сірий колір. Процес утворення графіту в залізобуглецевих сплавах називається **графітизацією**.

**Графіт (Г)** – це хімічний елемент, вуглець, який має гексагональну нещільно упаковану кристалічну решітку. Він має низькі механічні властивості; наявність графіту порушує цілісність металічної основи.

Фізико-механічні властивості сірих чавунів залежать від властивостей металічної основи, яка за своєю будовою аналогічна сталям.

Вплив графітних включень виявляється в тому, що його пластинки, маючи дуже незначну міцність, діють як надрізи або тріщини в металічній основі, послабляючи її.

Саме з цієї причини розроблені методи отримання ковких і високоміцних чавунів, в яких завдяки зміні форми графітних включень цей негативний вплив значно зменшено.

**Сірий (ливарний) чавун** містить частину вуглецю у вигляді **пластинчастого графіту**. Ці чавуни мають хороший опір здавлюванню, не чутливі до поверхневих дефектів, але характеризуються малою ударною в'язкістю (рис. 3.5, *а*).

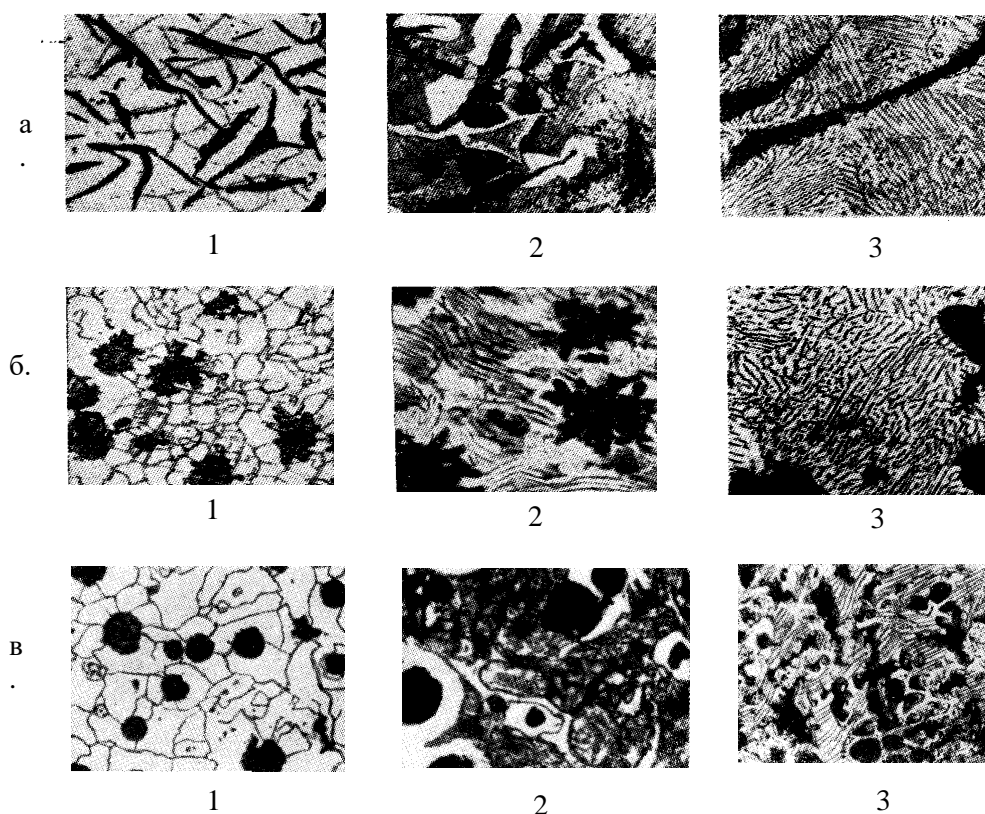


Рис. 3.5. Мікроструктури сірих чавунів:

*а* – сірі звичайні з пластинчастим графітом; *б* – ковкі з пластівчастим графітом; *в* – високоміцні з кулястим і (або) вермикулярним (лат. *vermiculus* – черв'ячок) графітом; 1 – феритна основа; 2 – ферито-перлітна; 3 – перлітна

**Ковкі чавуни** отримують у результаті спеціальної термічної обробки (томління) білих чавунів з вмістом вуглецю 2,5...3 %. Мають графітні включення у вигляді **пластівців**. Ці чавуни мають досить високі механічні властивості й стійкість проти корозії (рис. 3.5, *б*).

**Високоміцні чавуни** вміщують **кулькоподібний графіт** (рис. 3.5, в). Така структурна будова виникає під час введення в сірі чавуни ( $C \approx 3...3,6 \%$ ) модифікаторів (магнію, цезію та ін.). Механічні властивості водночас зростають.

Разом з кулястим графітом у високоміцних чавунах може утворюватися графіт у вигляді вермикулярних (лат. *vermicular* – черв'ячок) включень (рис. 3.5, в). Така форма графіту є перехідною від пластинчатого графіту до кулястого.

Залежно від умов одержання вермикулярного чавуну співвідношення між кількістю кулястого і вермикулярного графіту може бути різним.

Механічні властивості сталей та чавунів наведено в табл. 3.2.

#### **4. Необхідні прилади і матеріали**

**4.1.** Мікроскопи з набором оптики.

**4.2.** Зразки сталей і чавунів.

**4.3.** Абразивні матеріали.

**4.4.** Хімічні травлювачі.

#### **5. Послідовність виконання роботи**

**5.1.** Ознайомитися з принципом дії та налаштуванням мікроскопу.

**5.2.** Вивчити під мікроскопом структурний і фазовий склад шліфів-зразків та визначити марку сталі або чавуну і процентний вміст вуглецю, зіставляючи їх зі зразками, показаними на рис. 3.4 і 3.5, та фотографіями в лабораторії. Замалювати структуру у відповідній графі табл. 3.2.

**5.3.** За завданням викладача розрахувати кількість вуглецю для одного із зразків.

**5.4.** Визначити можливість практичного застосування конструкційних матеріалів, що вивчаються, і записати до відповідної графі табл. 3.2.

**5.5.** Для визначення властивостей сталей побудувати за схемою, що показана на рис. 3.6, графічні залежності твердості, міцності і пластичності від кількості вуглецю та сформулювати висновок про характер цих залежностей.

#### **6. Результати роботи**

**6.1.** Результати роботи занести до табл. 3.2.

Таблиця 3.2

**Структура, властивості і застосування вуглецевих сталей та чавунів у рівноважному стані**

Марка сталі	Вміст вуглецю, %	Схематичне зображення мікроструктури	Склад		Механічні властивості			Приклади деталей, які виготовляються із сталей і чавунів
			структурний	фазовий	НВ, МПа	$\sigma_{тц}$ , МПа	$\delta$ , %	
<b>Е11</b>	0,05				800	360	38	Пластини трансформаторів
<b>Сталь 20</b>					1630	500	30	Зварювальні конструкції, заготовки отримані тиском. Деталі, які цементують; Вали, вісі шестерні;
<b>Сталь 45</b>					1970	650	17	Вали, вісі, шестерні, шпindel, штоки тощо. Звичайно після нормалізації і гартування ТВЧ
<b>У8</b>					2850	850	9	Зубила, кернери, сокири; інструмент по дереву тощо
<b>У12</b>					3000	950	4	Ріжучий інструмент, по металу, коли невеликі швидкості різання (фрези, свердла, шабери, напилки тощо)
<b>Білий чавун</b>	3%				-	-	-	Валки листових прокатних станів, кулі кульових млинів, жернова млинів тощо.
<b>СЧ18</b>	3%				1350 – 2000		–	Будівельні колони фундамент-них плит, деталі станків (малонавантажени), маховики, шківні, ванни, кронштейни тощо
<b>ВЧ45-5</b>	3%				1630		5	Станни верстатів, циліндри дизельних двигунів, блоки двигунів, колінчасті вали, корпуси насосів тощо
<b>КЧ36-6</b>	3%				1400 – 2250		6	Теж саме, що і для ВЧ45-5

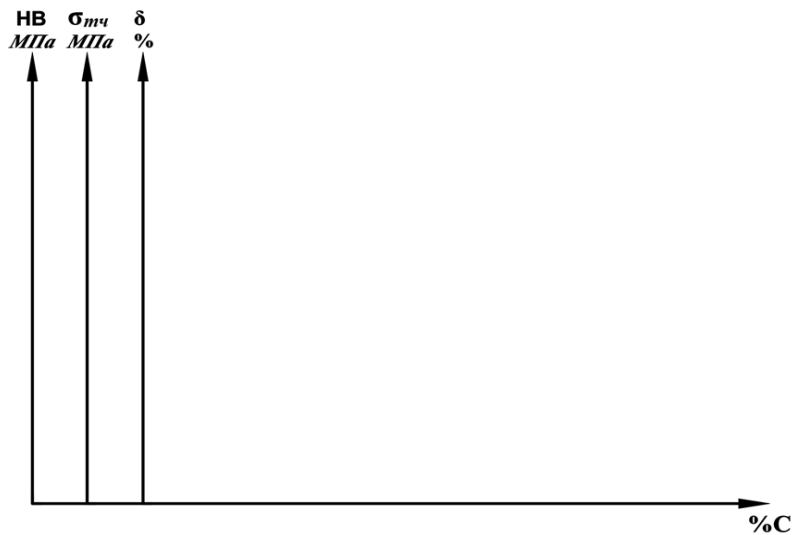


Рис 3.6. Графіки залежності НВ,  $\sigma_{тч}$  і  $\delta$  від вмісту вуглецю в сталях

## 7. Контрольні запитання

7.1. Поясніть призначення, зміст і методичку проведення мікроструктурного аналізу.

7.2. Назвіть структурні та фазові складові сталей і чавунів у рівноважному стані.

7.3. Що являють собою структурні складові сталей і чавунів у рівноважному стані?

7.4. Чим відрізняються структурні будови сірого, ковкого і високоміцного чавунів?

7.5. Як впливає вуглець на механічні властивості залізобуглецевих сплавів?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

### Термічна обробка вуглецевих сталей та її вплив на структуру і властивості (на прикладі сталі 45)

**Мета роботи:** практично освоїти технологію проведення різних видів термообробки і дослідити їх вплив на твердість сталі.

#### 1. Основні теоретичні положення

**Термічною обробкою** називають сукупність послідовних технологічних процесів нагрівання, витримки й охолодження металевих

виробів з метою зміни їх фізико-механічних властивостей шляхом керованих структурних перетворень.

**Метою термічної обробки** сплавів може бути зменшення залишкової (термічної або деформаційної) напруги у виробах, рекристалізація після холодного пластичного деформування, зменшення внутрішньокристалічної ліквідації у відливках, часткове або максимально можливе підвищення твердості і міцності.

Графічно режим термічної обробки може бути представлений в координатах «температура – час» (рис. 4.1.)

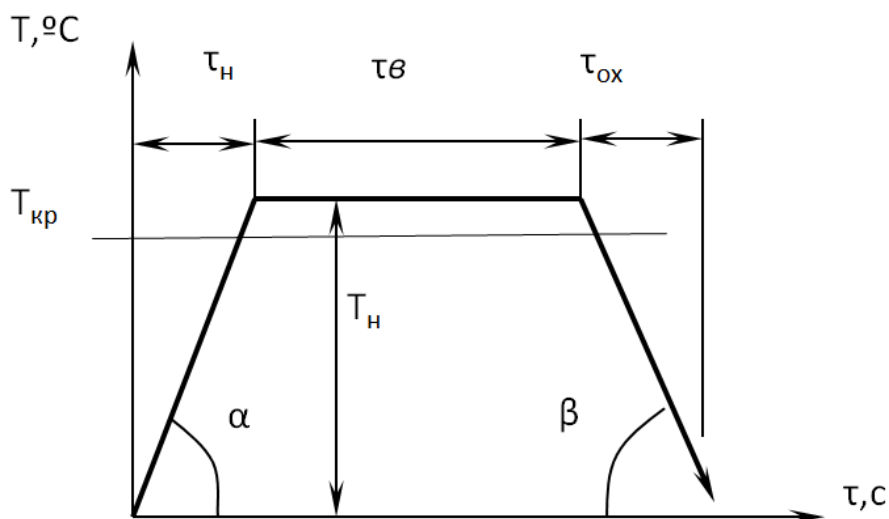


Рис. 4.1. Графік процесу термічної обробки

Режим термічної обробки характеризується такими основними параметрами:  $\tau_n$  – час нагрівання;  $\tau_v$  – час витримки;  $\tau_{ох}$  – час охолодження;  $T_{кр}$  – критична температура;  $T_n$  – температура нагрівання;  $V_n$  – швидкість нагрівання;  $V_{ох}$  – швидкість охолодження.

У роботі наводять різні види термообробки для сталі 45, а саме (рис. 4.2):

- відпал;
- нормалізація;
- гартування;
- відпуск низький;
- відпуск середній;
- відпуск високий.

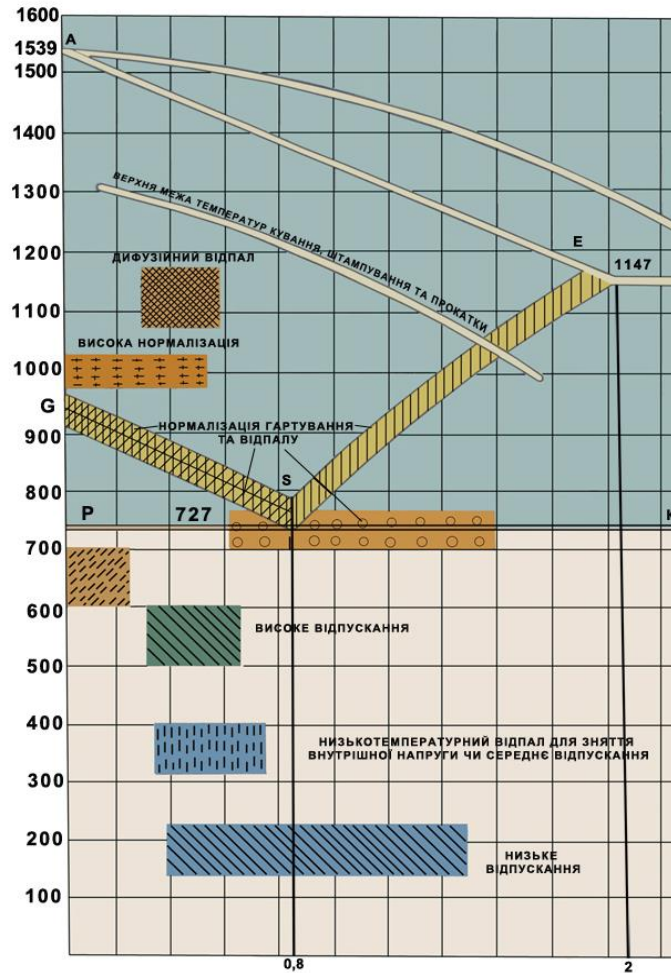


Рис. 4.2. Способи і режими різних видів термообробки

Виконання роботи надає можливість підтвердити головне положення матеріалознавства про те, що властивості матеріалу визначаються його структурною будовою.

Усі зразки, які вивчаються в роботі, виготовлені з одного матеріалу – сталі 45, але властивості їх різні. Саме ця різниця властивостей пояснюється тим, що в результаті різних видів термічної обробки отримують різні структури.

Процеси термообробки в залізвуглецевих сплавах базуються на *явищах вторинної кристалізації*, які проходять по лініях діаграми стану PSK ( $A_1$ ), SE ( $A_{cm}$ ) і GS ( $A_3$ ).

Тривалість нагрівання складається з часу прогрівання до заданої температури і часу витримки за температури нагрівання  $T_n$  для отримання гомогенної структури аустеніту. Час нагрівання для лабораторних зразків

орієнтовно становить 60...100 с на 1 мм діаметра виробу. У роботі для нагрівання зразків використовуємо термічні печі (рис. 4.3).



Рис. 4.3. Термічна піч і зразок сталі 45

Для всіх сталей перекристалізація при нагріванні завершується після утворення *аустенітної* структури.

Перетворення аустеніту при охолодженні розділяють на:

- *дифузійні – перлітні* ( $\Pi = \Phi + \Psi$ ), за яких унаслідок дифузійного розпаду аустеніту утворюються ферито-цементитні механічні суміші:  
 $Fe_{\gamma}(C) \rightarrow Fe_{\alpha} + Fe_3C$ ;

- *проміжні – бейнітні* перетворення, унаслідок яких утворюється сполучення дифузійної (перлітної) і бездифузійної (мартенситної) структур;

- *бездифузійне – мартенситне* перетворення.

Існують різні види відпалу, які характеризуються режимами нагрівання і охолодження. Ми вивчаємо одні з тих, що мають найбільш широке застосування.

*Повний відпал* – для доевтектоїдних сталей.  $T_n$  на 30...50 °С вище точки  $A_{c3}$ . Охолодження дуже повільне, щоб аустеніт розпадався за невеликого ступеня переохолодження зі швидкостями до 200 °С/год (разом з піччю).

У легованих сталях аустеніт більш стійкий до переохолодження (швидкості 100...30 °С / год).

Отримуємо рівномірну дрібнозернисту **ферито-перлітну** структуру. Основною метою повного відпалу є видалення дефектів структури, отриманих під час лиття, обробки тиском, зварюванні тощо, а також зменшення напруги і пом'якшення сталі перед обробкою різанням; ліквідувати великозернистість у відливках після гомогенізації і відманштеттовий ферит, який утворюється при зварюванні в біляшовній зоні.

Застосовують при обробці сортового прокату із сталі, поковок і фасонних відливок.

**Нормалізаційний відпал (нормалізація)** – це такий вид термічної обробки сталі, за якої нагрівання проводять до температур на 30 – 50 °С вище лінії GSE з подальшим охолодженням на спокійному повітрі.

У процесі нагрівання відбувається повна фазова перекристалізація до аустенітного стану як доєвтектоїдних, так і заєвтектоїдних сталей, що дозволяє видалити великозернисту структуру.

Прискорене охолодження на повітрі із швидкістю (приблизно 7 - 7,5 °С / с для невеликих мас) – отримується більш тонка будова **перліту** або **сорбіту**. Міцність сталей отримується більшою, ніж у разі звичайного відпалу.

Застосовують нормалізацію як проміжну або як завершувальну операцію. Як проміжну – її використовують для усунення дефектів будови і загального покращення структури перед гартуванням, а також для пом'якшення структури перед обробкою різанням. Як завершувальну – її застосовують для середньо- і високовуглецевих доєвтектоїдних сталей, якщо вимоги до властивостей помірні і необов'язково робити гартування з відпуском.

**Гартування** – вид термічної обробки, за якого нагрівання викликає фазову перекристалізацію, але внаслідок штучного швидкого охолодження зворотне фазове перетворення не встигає пройти. Отримана при цьому структура являється зафіксованим високотемпературним станом. Такий стан є нерівноважним і нестійким. **Мартенсит** – утворюється за швидкостей охолодження  $V_{ох} > V_{кр}$  внаслідок бездифузійного перетворення з аустеніту.

Температура нагрівання при гартуванні для доєвтектоїдних сталей –  $A_{c3} + (30...50) \text{ }^\circ\text{C}$ , для заєвтектоїдних –  $A_{c1} + (30...50) \text{ }^\circ\text{C}$  (рис. 4.4).

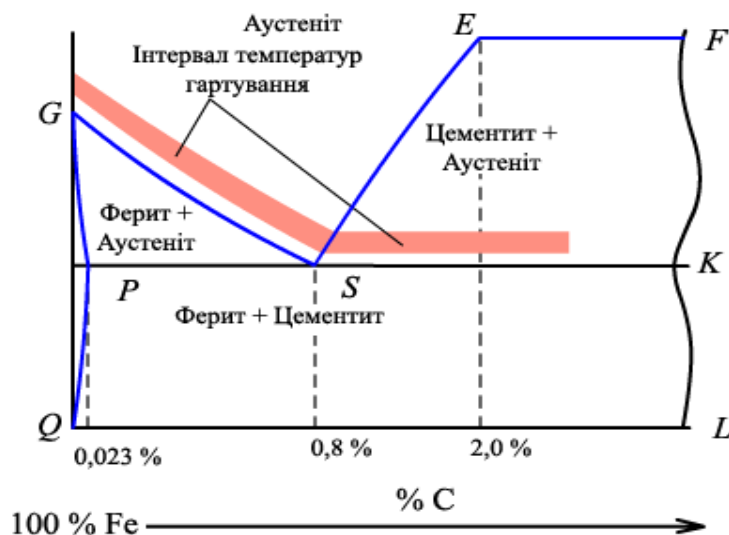


Рис. 4.4. Температурні інтервали нагрівання при гартуванні

Існує багато способів гартування, серед яких ми звернемо увагу на безперервне.

**Безперервне гартування в одному охолоджувальному середовищі** є найбільш простим способом, який має широке застосування

Для гартування дрібних (до 5 мм) виробів із вуглецевих сталей і деталей більшого діаметра із легованих сталей використовують масло. Для великих деталей, а також спрощених за формою із вуглецевих сталей – воду, або водні розчини. Для великих виробів складної форми, виготовлених із сталей з високою стійкістю аустеніту (з високою прогартуваністю) – чисті мінеральні масла.

Отримуємо значні залишкові напруги, що може призводити до жолоблення і виникання тріщин.

Найбільш поширені охолоджувальні середовища і відповідні їм швидкості охолодження наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

### Швидкість охолодження в різних середовищах

Охолоджувальне середовище	Швидкість охолодження (град/с) в інтервалі температур 650...550 °C
Вода за 18 °C	600

Розчин їдкого натру за 18 °С	1200
Мінеральне машинне масло	150
Мильна вода	30

За заданих умов гартування можливо прогнозувати гартівну структуру за допомогою діаграми ізотермічного охолодження аустеніту (рис. 4.5).

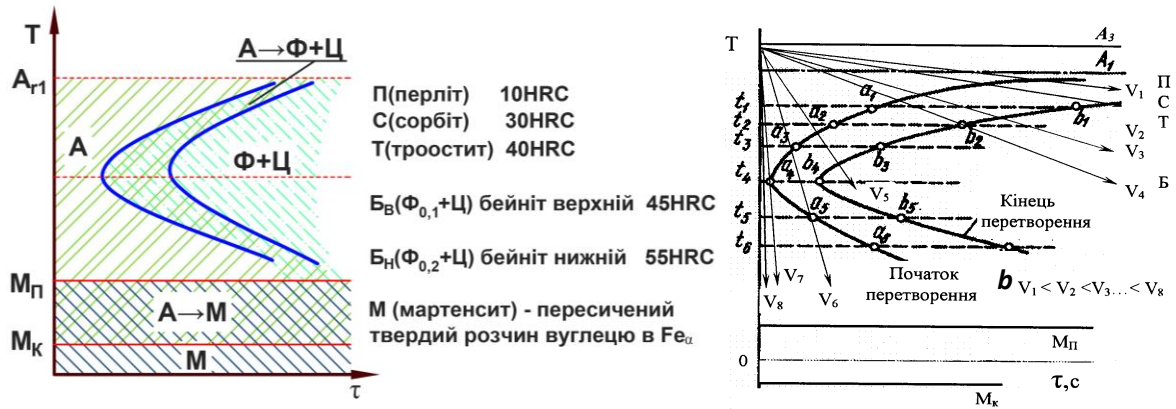


Рис. 4.5. Діаграма ізотермічного охолодження аустеніту

Після гартування для зняття напруження, а також для отримання певних властивостей обов'язково виконують відпускання. Коли ж відпускання не проводять, тоді у виробів із-за високих внутрішніх напружень з'являються тріщини та інші дефекти.

**Відпуски** – види термообробки, в результаті проведення яких в більшому чи меншому ступені знімається нерівновісність у попередньо загартованих сплавах. Головним процесом є **розпад мартенситу з виділенням карбідів**. Досягається це нагріванням нижче температури фазових перетворень.

Відпуск залежно від температури нагрівання буває низьким середнім або високим.

**За низькотемпературного (низького) відпуску** загартовану сталь розігрівають до температури 120...250 °С. Після витримки (звичайно до 1...3 год) знижуються гартівні мікронапруги за рахунок перетворення тетрагонального мартенситу в відпущений (кубічний) **мартенсит**. Водночас частково підвищуються (на 2-3 одиниці), або не змінюються показники твердості і міцності, частково поліпшується в'язкість (ріжучий та вимірвальний інструмент, деталі шарикових і роликових підшипників, після хіміко-термічної обробки легованих сталей).

**За середньотемпературного (середнього) відпуску** загартовану сталь розігрівають до температури 350...500 °С. Утворюється структура **троостит відпуску** або трооститомартенситу, яка забезпечує сполучення досить високої твердості (HRC 40...45) і міцності з високою пружністю та в'язкістю (пружини, ресори, а також штампи). Охолодження слід проводити у воді, що сприяє збільшенню межі витривалості пружних елементів.

**За високотемпературного (високого) відпуску** загартовану сталь розігрівають до температури 550...650 °С. Утворюється структура **сорбіту відпуску**, який має найкращі співвідношення між міцністю і в'язкістю (деталей машин, які в процесі експлуатації витримують високі напруження та ударне навантаження). Гартування з високим відпуском називають **поліпшенням**. Витримка – 1...6 год. У легованих сталях до високих відпускових температур зберігаються дрібнодисперсні карбіди. Це є причиною вторинної твердості, тобто збільшення твердості після високого відпуску (більш висока міцність і пластичність). Це є основною причиною використання легованих сталей для виготовлення відповідальних деталей, які працюють в умовах складного навантаження.

## **2. Необхідні прилади і матеріали**

**2.1.** Зразки сталі 45.

**2.2.** Термічні печі.

**2.3.** Охолоджувальні середовища.

**2.4.** Матеріали і інструмент для зачищення зразків від окалини.

**2.5.** Твердоміри Брінелля і Роквелла.

## **3. Послідовність виконання роботи**

**3.1.** Накреслити сталевий кут діаграми *Fe-C* (рис. 4.4) і для сталі 45 нанести вертикаль перетворень при нагріванні та охолодженні. Вибрати потрібні температури для проведення операцій: відпалу, нормалізації, гартування і відпусків (низького, середнього, високого) і занести їх до табл. 4.2.

**3.2.** Визначити необхідне охолоджувальне середовище, якщо в результаті гартування необхідно отримати структуру мартенситу. Занести до табл. 4.2.

**3.3.** Провести операції термічної обробки: відпалу, нормалізації і гартування. Зачистити зразки від окалини. Заміряти твердість відпаленого

і нормалізованого зразків на твердомірі Брінелля, загартованих – на твердомірі Роквелла.

**3.4.** Провести операції відпуску, зачистити зразки, заміряти твердість на твердомірі Роквелла. Результати занести до табл. 4.2.

**3.5.** Провести аналіз структурних перетворень для всіх розглянутих видів термічної обробки з визначенням отриманих структур. Результати аналізу стисло викласти в роботі. Назви відповідних структур занести до табл. 4.2.

**3.6.** Побудувати графічну залежність твердості загартованих зразків від температури відпуску. Пояснити характер відмічених змін.

## **4. Результати роботи**

**4.1.** Результати роботи занести до табл. 4.2

*Таблиця 4.2*

### **Структура і твердість сталі 45 після різних видів термічної обробки**

Вид термообробки	Температура нагрівання, °С	Умови охолодження, °С/с	Твердість		Назва мікроструктур
			НRC	НВ, МПа	
Відпал	820 – 850	< 0,1 (разом з піччю)	–		
Нормалізація	820 – 850	7-7,5 (на повітрі)	–		
Гартування	820 – 850	600 (у воді)			
Низький відпуск	200	7-7,5 (на повітрі)			
Середній відпуск	400	7-7,5 (на повітрі)			
Високий відпуск	600	7-7,5 (на повітрі)			

## **5. Контрольні запитання**

**5.1.** Сутність процесів дифузійного і бездифузійного перетворень аустеніту при охолодженні.

**5.2.** З якою метою проводяться різні види термообробки (гартування, нормалізація, відпуск, відпал)?

**5.3.** З огляду на що вибирають охолоджувальне середовище при гартуванні?

5.4. Поясніть, які є можливості щодо прогнозування отримання тієї або іншої структури.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5 Хіміко-термічна обробка сталей (ХТО)

**Мета роботи:** вивчити структуру і властивості сталей після хіміко-термічної обробки (на прикладі цементації).

### 1. Основні теоретичні положення

**Суть процесів хіміко-термічної обробки (ХТО)** (поверхнєве легування) полягає в насиченні поверхневих шарів деталей одним або декількома хімічними елементами (металами або неметалами) з метою отримання на поверхні підвищених фізико-механічних властивостей і створення сприятливих умов для подальшої термічної обробки.

Процеси хіміко-технічної обробки реалізують шляхом занурення деталей в середовище, збагачене насичувальними елементами. За певної температури починаються процеси утворення високої концентрації вільних атомів (іонів) насичувального елемента на межі з поверхнею деталі. Після утворення хімічних зв'язків між атомами основного металу і насичувального елемента починається **дифузійний процес** проникнення елементарних частинок у глибинні шари основного металу.

До хіміко-термічної обробки сталей відносять: цементацію, азотування, ціанування (нітроцементация), хромування, алітування, борування, силіцування та ін. Усі ці процеси характеризуються дифузійним насиченням поверхневих шарів сталевих деталей за високої температури з метою підвищення їх фізико-механічних властивостей, зносостійкості, жароміцності та ін.

У роботі розглядається зміна структури і властивостей поверхневих шарів зразків на прикладі цементації.

Процес **цементації** застосовують для вуглецевих і легованих сталей, які містять вуглець до 0,3 %. Процес полягає в дифузійному насиченні поверхневих шарів вуглецем на глибину 0,5...2,5 мм. Після цементації поверхневий шар буде складатися з високо вуглецевої (до 1,2 % C), а серцевина – з низько вуглецевої сталі (до 0,3 % C).

Ефективною глибиною насичення вважається така, де концентрація вуглецю сягає орієнтовно 0,4 %, що в подальшому забезпечує достатнє

сприйняття гартування до цієї глибини. Для низьковуглецевої сталі  $T_n = 930 \dots 960 \text{ }^\circ\text{C}$  (існування стійкого аустеніту).

Цементацію проводять у насичувальних середовищах – джерелах живлення вуглецем, які називаються **карбюрізаторами**. Використовують тверді, рідкі і газоподібні карбюрізатори. Найбільш поширеними є тверді і газові карбюрізатори (рис. 5.1).



Рис. 5.1. Термічна піч для проведення цементації у газовому карбюрізаторі

Після проведення цементації і охолодження деталі (незалежно від виду карбюрізатора) в поверхневому шарі спостерігається нерівномірний розподіл вуглецю по глибині. Тому цементовані деталі термічно обробляють.

**Метою термічної обробки після цементації** є виправлення структури і подрібнення зерна серцевини і цементованого шару, які перегріваються за тривалої витримки під час цементаційного нагріву. Крім того, термообробка дає змогу отримати високу твердість цементованого шару і в'язку серцевину, ліквідувати цементитну сітку, яка виникає внаслідок перенасичення вуглецем.

Існують декілька варіантів термічної обробки. Але принципово кінцевими операціями термічної обробки є *гартування* і *низький відпуск*, внаслідок чого поверхня деталі буде твердою, міцною і зносостійкою, а серцевина залишиться відносно м'якою і в'язкою, оскільки низьковуглецева сталь не гартується.

Після термічної обробки у вуглецевих і легованих сталей цементований шар має структуру мартенсит, твердість якого сягає HRC 60...66, що обумовлює його високу твердість. У той же час серцевина деталей, які були виготовлені з вуглецевих і легованих сталей може отримувати різні структури: вуглецеві сталі залишаються феритно-перлітними, що обумовлює їх низьку міцність, а леговані сталі здебільшого набувають структуру бейніту, і тому їх міцність їх серцевини стає більшою, ніж у вуглецевих сталей. З огляду на це для виготовлення деталей, що мають бути більш міцними, треба брати леговані сталі.

Дрібнокристалічний мартенсит і висока твердість у поверхневому шарі утворюються при вторинному гартуванні за низької температури 760...780 °С. З метою зменшення гартівних напружень після гартування деталей роблять низький відпуск за 160...200 °С з охолодженням на повітрі. Недоліком цементації є підвищення собівартості в 2,5...3 рази порівняно з поверхневим гартуванням.

Застосовують цементацію для таких деталей: шестерні, вали, осі, втулки тощо.

**Азотування** – процес насичення азотом у середовищі аміаку  $\text{NH}_3$ . Застосовують в основному для легованих сталей, коли діють невеликі контактні навантаження, а деталі мають схильність до жолоблення. Азотування надає можливість підвищити для деталей зносостійкість у 5...10 разів, межу витривалості при згинанні на 30...60 % та опір корозії. Досягається це шляхом високої твердості нітрідів легуючих елементів (Al, Mo, V, Cr), які утворюються в процесі азотування.

Процес відбувається за температури 500...600 °С. Швидкість азотування приблизно в 10 разів менша, ніж цементації. Технологія проведення азотування полягає в довготривалій витримці (до 60 год) деталей в атмосфері аміаку (рис. 5.2). Глибина азотованого шару 0,2...0,5 мм, а для великогабаритних деталей може досягати 0,7...0,8 мм.

Оскільки азотований шар має без термообробки досить високу твердість (~ HV 850...1200, що відповідає ~ HRC 66..72), а розміри деталей після азотування змінюються незначною мірою, то, на відміну від

цементациї, азотування проводять на готових деталях, що пройшли кінцеву термообробку (поліпшення) і чистову обробку. Після азотування деталі шліфують або полірують.



Рис. 5.2. Вакуумна піч для термічної обробки з системою газового азотування

Азотуванню піддають гільзи циліндрів ДВЗ, деталі турбін, інструмент, колінчасті вали та ін.

Оскільки для азотування застосовують дорогі леговані сталі, то і використовують цей вид обробки для більш відповідальних деталей з високими вимогами до якості поверхні.

## **2. Необхідні прилади і матеріали**

**2.1.** Зразки цементованих сталей.

**2.2.** Твердоміри Брінелля і Роквелла.

**2.3.** Мікроскопи.

## **3. Послідовність виконання роботи**

**3.1.** Студент отримує по два зразки вуглецевої та легованої сталей, які пройшли цементацию, але відрізняються способом термічної обробки.

**3.2.** Визначити структурні перетворення, які проходять при цементациї.

**3.3.** За допомогою мікроскопа виявляють відповідні структури. Оцінюють орієнтовно глибину шару, який пройшов хіміко-термічну обробку.

3.4. За допомогою твердомірів оцінюють твердість поверхневих шарів і пошарову твердість по глибині зразка.

3.5. Відображається схема пошарової структури зразків з оцінкою їх якості.

#### 4. Результати роботи

4.1. Результати роботи занести до табл. 5.1.

Таблиця 5.1

#### Результати дослідження структури сталей після цементації на глибину

ХТО і ТО	Марка сталі	Пошарове зображення структури			Назва структури			
		поверхня	проміжний шар	поряд з серцевиною	поверхні	середини	поряд з серцевиною	серцевини
Ц (без ТО)	20				П+Ц	П	Ф+П	Ф+П
Ц (з ТО)	20				М+Ц	М	М	Ф+П
Ц (без ТО)	20Х				П+Ц	П	Ф+П	Ф+П
Ц (з ТО)	20Х				М+Ц	М	М	Б

*Примітка:* Ц – цементація, П – перліт, Ф – ферит, М – мартенсит, Б – бейніт. ХТО – хіміко-термічна обробка, ТО – термічна обробка.

#### 5. Контрольні запитання

5.1. У чому полягає сутність ХТО та її призначення?

5.2. Які існують основні види ХТО та їх призначення?

5.3. Поясніть, чому виникає можливість і необхідність проведення термічної обробки після цементації. Як її проводять? Які структурні перетворення при цьому відбуваються?

5.4. У чому різниця структури після цементації для вуглецевої і легованої сталі.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6

### Дослідження структури конструкційних сталей

**Мета роботи:** вивчити мікроструктуру, властивості і застосування деякої конструкційних сталей.

#### 1. Основні теоретичні положення

**Конструкційні сталі** – це один з основних металічних матеріалів, широке застосування яких обумовлено сполученням їх фізико-механічних, технологічних і експлуатаційних властивостей.

В якості конструкційних використовуються вуглецеві і леговані сталі. Конструкційні сталі розподіляють за загальним використанням на будівельні і машинобудівельні.

#### Основні групи машинобудівельних конструкційних сталей

**1.1. Цементуємі, нітроцементуємі і азотуємі сталі.** До цієї групи сталей відносять низьковуглецеві, низько- і середньолеговані сталі, які внаслідок зміцнення поверхневого шару та серцевини набувають достатньо високих механічних властивостей.

За ступенем зміцнення серцевини **цементуємі сталі** розділяють на три групи:

- із незміцнюваною серцевиною (сталі марок 10, 15, 20);
- із слабкозміцнюваною серцевиною (сталі марок 15Х; 20Х; 15ХФ; 20ХН);
- із значним зміцненням серцевини (сталі марок 18Х2Н4МА; 18Х2Н4ВА; 30ХГТ);

До **азотуємих** відносять середньовуглецеві і леговані сталі, які здатні утворювати з азотом міцні нітриди (38Х2МЮА; 40ХНМА; 30Х2В8Ф).

**1.2. Сталі для штампування.** Метали, призначені для цієї обробки мають мати підвищену технологічну пластичність і штампованість. Висока штампованість забезпечується співвідношенням між межею текучості і межею міцності в межах  $\sigma_{ТЧ} / \sigma_{Т} \approx 0,55 \dots 0,65$  і величиною відносного звуження  $\psi \sim 40 \%$ .

Мікроструктурна будова сталей для штампування має мати структуру фериту з невеликою кількістю перліту.

Для глибокого, складного і особливо складного штампування використовують маломіцні високопластичні низьковуглецеві сталі з різним ступенем розкислення, наприклад: 0,5; 05кп; 08пс; 10; 10кп; 08Ю тощо.

Для отримання виробів підвищеної міцності застосовують низьколеговані «двофазні» сталі, які вміщують у своїй структурі високопластичну феритну матрицю і зміцнювальну фазу мартенситу або бейніту. Таку структуру отримують у низьковуглецевих сталях (09Г2С; 16ГФР; 10Г2Ф; 12ХМ та ін.) після гартування у воді від температур міжкритичного інтервалу  $A_{c1}$ - $A_{c3}$ .

**1.3. Поліпшуємі сталі.** Поліпшення є комплексною термічною обробкою, яка вміщує гартування з високим відпуском. Поліпшенню піддають середньовуглецеві (0,3...0,5 % С) і середньолеговані (до 5 % легуючих елементів) сталі. Залежно від вмісту вуглецю і легуючих домішок змінюються межа міцності і межа текучості сталей.

Поліпшуємі сталі умовно розділяють на 5 груп:

*Першу групу* становить середньовуглецеві сталі 40; 40Г; 45. У сталей цієї групи механічні властивості отримуються в деталях діаметром до 10...15 мм при гартуванні в воді.

*Сталі другої групи* вміщують невеликі домішки хрому і бору, які частково підвищують прогартуваність, зберігаючи приблизно однаковий з вуглецевою сталлю рівень опору крихкому руйнуванню. Сталі цієї групи (40Х; 40ХР; 45Х; 40ХС; 40ХФА тощо) прогартуються наскрізь у деталях діаметром до 25...35 мм.

*Сталі третьої групи* мають доповнювальне легування Mn, Si; Mo (40ХГ; 40ХГР; 30ХМА; 30ХГС). Ці сталі мають понижений запас в'язкості, тобто більш високий температурний поріг холодноламкості.

*Сталі четвертої групи* прогартуються в деталях, діаметр яких дорівнює 40...75 мм. У склад цих сталей входить до 1...1,5 % Ni і до 0,15...0,25 % Mo (40ХН; 40ХНР; 40ХНМА). Ці сталі мають підвищену прогартуваність, низьке значення температури холодноламкості і підвищену конструктивну міцність.

*У сталей п'ятої групи* вміст нікелю підвищений до 2...3 % і доповнювальне легування Mo і W, сприяє зменшенню зворотної відпускну крихкості. Ці сталі (34ХН3М; 30ХН2ВФА) мають високу прогартуваність і рекомендуються для деталей діаметром 80...120 мм.

**1.4. Пружинно-ресорні сталі і сплави.** Сталь і сплави, які призначені для виготовлення пружних елементів у машинобудуванні

(ресори-пружини, торсіони, амортизатори) і приладобудуванні (мембрани, пружини підвіски, пластини реле, сільфонів та ін.) мають окрім міцності, в'язкості і витривалості мати високу межу пружності, втомлену стійкість ( $\sigma_{-1}$ ) за багатоциклових навантажень і високий опір малим пластичним деформаціям ( $\sigma_{0,005}$  і  $\sigma_{0,2}$ ).

Залежно від хімічного складу пружинно-ресорні сталі поділяють на:

- вуглецеві (65; 70; 75 і 85);
- марганцевисті (60Г; 65Г і 70Г);
- кремністі (50С2; 55С2; 55С2А; 60С2);
- хромокремністі (60С2А; 70С3А; 60С2ХА; 70С2ХА; 50ХСА);
- хромомарганцеві (50ХГ; 50ХГА; 55 ХГР; 60СГА);
- хромованадієві і хромомарганцевованадієві (50ХФА; 50ХГФА; 60С2ХФА)
- нікелькремністі і вольфрамокремністі (60С2Н2А; 65С2ВА);

**1.5. Шарикопідшипникові сталі.** Ці сталі становлять спеціальну групу, з яких виготовляють елементи підшипників кочення, а саме шарики, ролики, зовнішні і внутрішні обойми, кільця. Особливістю умов експлуатації підшипників кочення є великі локальні навантаження за багатоциклового характеру роботи. Тому основною вимогою до шарикопідшипникових сталей є максимальна зносостійкість і контактна втомлена міцність. В якості шарикопідшипникових використовують високовуглецеві сталі з вмістом хрому, кремнію і марганцю. Марки цих сталей починаються з літери **Ш**.

Для виготовлення елементів шарикових підшипників невеликого перетину (до 15...17 мм) використовують сталі ШХ4; ШХ9. Для виготовлення шариків і роликів діаметром до 25 мм і кілець приблизно такого ж перетину виготовляють сталі з підвищеним вмістом хрому ШХ15 ( $\approx 1,3...1,65\%$  Cr). Для шариків 30 мм і більших корпусних елементів використовують сталі з підвищеним вмістом марганцю і кремнію (ШХ9СГ; ШХ15СГ) із підвищеною прогартуваністю.

Більш габаритні елементи виготовляють із сталей ШХ20СГ, при дії значних ударних навантажень – цементуємі на глибину 1...5 мм низьковуглецеві леговані нікелем сталі 20ХНМ; 20Х2Н4А, 18ХГТ. Для підшипників, які працюють в агресивних середовищах застосовують високовуглецеві корозійностійкі хромисті сталі 95Х18.

Термічна обробка шарикопідшипникових сталей передбачає попередній (сфероїдизуючий) відпал на твердість приблизно НВ 2000, що

забезпечує оброблюваність заготовок різанням і штампованість у холодному стані. Гартування деталей проводять за температури 790...840 °С і низький відпуск з 150...170 °С.

**1.6. Зносостійкі сталі і сплави.** Для умов експлуатації, коли переважають тертя з високим тиском і ударним навантаженням, поширене застосування одержали високомарганцевисті аустенітні сталі 110Г13Л, 60Х5Г10Л, 30Х10Г10, в яких співвідношення кількості марганцю до вуглецю  $Mn \geq 10$ . Сталь 110Г13Л вміщує приблизно 0,9...1,3 % С і 11,5...14,5 % марганцю. Оскільки обробка різанням цієї сталі ускладнена, вона поставляється у вигляді литих і інколи кованих деталей. Структура сталі складається із аустеніту і спеціальних карбідів  $(Fe, Mn)_3C$ , які розташовуючись по кордонам зерен, знижують міцність і в'язкість сталі. Разом з тим зносостійкість сталі 110Г13Л досягає максимального значення, коли вона має однофазну аустенітну структуру. Це досягається гартуванням у воді за температури 1050...1100 °С. Механічні властивості цієї литої і загартованої на аустеніт сталі знаходяться приблизно в таких межах:  $\sigma_{ТЧ} = 800...1000$  МПа;  $\sigma_{0,2} = 250...400$  МПа;  $\delta = 40...50\%$ ; НВ 1800...2200.

Унаслідок схильності до деформаційного холодного зміцнення ця сталь набуває надзвичайно високої зносостійкості саме в умовах високого тиску, ударів і тертя та після деформаційного зміцнення твердість сягає близько НВ 6000. В умовах чистого абразивного зношування за невеликих тиску і ударів зносостійкість сталі невелика.

**1.7. Корозійностійкі (нержавіючі) сталі.** Здатність металів створювати опір корозійному впливу зовнішнього середовища називається *корозійною стійкістю*.

У машинобудуванні найбільше застосовуються корозійностійкі хромисті і хромонікелеві сталі.

*Хромисті корозійностійкі сталі.* Зберігають свої властивості за температури не вище 30 °С у вологій атмосфері повітря, у воді, в азотній і багатьох органічних кислотах. У морській воді вони піддаються корозійному розтріскуванню. Ці сталі мають після охолодження на повітрі феритну, феритно-мартенситну або мартенситну структуру.

Сталі мартенситного класу (30Х13; 40Х13) піддають гартуванню за температури 1000 °С у маслі і низького відпуску за 200...300 °С для отримання структури відпущеного мартенситу.

Сталі 08X13; 12X13; 20X13 піддають гартуванню і високому відпуску за 600...700 °С для отримання сорбітної структури.

Більшу корозійну стійкість мають феритні сталі з підвищеним вмістом хрому 12X17, 15X25Т, 15X28, 015X17М2Б та ін. Сталь 12X17 застосовують після рекристалізаційного відпалу за температури 760...780 °С з метою отримання гомогенного твердого розчину. Їх використовують у легкій та харчовій промисловості для виготовлення деталей, які не потребують зварювання.

Сталі 15X28, 15X25Т використовують для виготовлення зварних конструкцій без термообробки (аустенітний клас).

*Хромонікелеві корозійностійкі сталі.* Корозійна стійкість цих сталей підвищена порівняно з хромистими (12X18Н9; 10X14Г14Н4Т; 10X14АГ15). Термообробка цих сталей складається із гартування за температури 1100...1150 °С у воді без відпуску.

Вміст вуглецю в сталях аустенітного класу має бути обмеженим для запобігання утворення спеціальних карбідів, які знижують корозійну стійкість. Невеликі домішки молібдену (до 1,5 %) сприяють суттєвому підвищенню корозійної стійкості.

Хромонікелеві сталі мають досить високу вартість. З огляду на це в багатьох випадках застосовують більш дешеві сталі, в яких частину нікелю замінюють марганцем, наприклад, 10X14Г14Н4Т – для слабкоагресивних середовищ.

Особливу групу складають сталі аустенітно-мартенситного класу, наприклад 09X15Н8Ю, які поряд з високою корозійною стійкістю мають високі механічні властивості і добре зварюються.

Залежно від особливих хіміко-фізичних і механічних властивостей корозійностійких сталей сфера їх застосування розповсюджується багатьма напрямками: лопатки турбін і арматура крекінг-установок (12X13; 20X13); хірургічні інструменти, пружини, голки (30X13, 40X13, 95X18), апаратура для розчинів азотної і фосфорної кислот (15X28); деталі для роботи в розчинах хлористого цинку і фосфатних добрив (09X15Н8Ю; 10X17Н13М3Т) та ін.

## **2. Необхідні прилади і матеріали**

**2.1.** Мікроскопи з набором оптики.

**2.2.** Зразки конструкційних сталей.

2.3. Абразивні матеріали.

2.4. Хімічні травлювачі.

### **3. Послідовність виконання роботи**

3.1. Ознайомитися з принципом дії та настроюванням мікроскопу.

3.2. Вивчити під мікроскопом структурний та фазовий склад шліфів-зразків і визначити марку сталі та процентний вміст вуглецю і хімічних домішок. Замалювати структуру у відповідній графі табл. 6.1.

3.3. Визначити можливість практичного застосування конструкційних сталей, що вивчаються, і записати до відповідної графі табл. 6.1.

3.4. Сформулювати висновок.

### **4. Результати роботи**

4.1. Результати роботи занести до табл. 6.1

### **5. Контрольні запитання**

5.1. Поясніть призначення, зміст і методика проведення мікроструктурного аналізу.

5.2. Дайте загальну характеристику конструкційних сталей. За якими ознаками їх відрізняють?

5.3. Назвіть структурні і фазові складові конструкційних сталей після термічної та хіміко-термічної обробки.

5.4. Як впливає термічна та хіміко-термічна обробка на фізико-механічні властивості конструкційних сталей?

Таблиця 6.1

## Структура, властивості і застосування конструкційних сталей

Марка сталі	Хімічний склад	Зображення мікроструктури	Склад		Фізико-механічні властивості			ТО або ХТО	Застосування
			Структ.	Фазовий	НВ, МПа	$\sigma_{тч}$ , МПа	$\delta$ , %		
40Х	C=0,4% Cr=1,1%		Ф <sub>л</sub> +П <sub>л</sub>	Ф <sub>л</sub> +Ц <sub>л</sub>	1430-1790	470 поковки (700-900 прутки)	15	відпал	
40Х	C=0,4% Cr=1,1%		МВ...л.+Аз	МВ...л.+Аз	2150-3020	800-950	10	поліпшення	
ШХ15	C=1% Cr=1,5%		МВ...л.+Аз	МВ...л.+Аз	6265	400	40	гартування + низький відпуск	
12Х18Н9	C=0,12% Cr=18% Ni=9%		Ал	Ал	1690	520	30	гартування	
110Г13Л	C=0,9-1,3% Mn=11,5%		Ал (М після деформ.)	Ал (М після деформ.)	1800-2200 (НРС52-55)	800-1000	40-50	гартування	

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 7

### Дослідження структури інструментальних сталей і твердих сплавів

**Мета роботи:** вивчити мікроструктуру, властивості і застосування деяких інструментальних сталей і твердих сплавів.

#### 1. Основні теоретичні положення

У промисловості використовують велике різноманіття інструментів, які суттєво відрізняються конструкцією та умовами експлуатації, відповідними до їх призначення.

Для виготовлення різного за призначенням інструменту використовують інструментальні сталі, тверді сплави, окисно-карбідну й окисно-нітрідну кераміку, надтверді матеріали на основі натуральних і синтетичних алмазів, нітрідів бору та ін.

Для інструментів механічної обробки найважливішою вимогою є високі міцність і твердість, які забезпечують високу зносостійкість. Для того, щоб під дією високих температур не виникала пластична деформація робочих поверхонь інструментальний матеріал, поряд з високою твердістю в 2...3 рази більшою, ніж у заготовки, повинен мати високу теплостійкість.

Під **теплостійкістю** інструментального матеріалу розуміють властивість зберігати високу твердість за підвищених температур.

Крім експлуатаційних показників значний вплив на якість інструментів мають прогартовуваність, мінімальні об'ємні зміни при гартуванні, оброблюваність різанням і шліфувальність.

#### Інструментальні матеріали для механічної обробки заготовок різанням

**1.1. Вуглецеві і леговані сталі для ріжучого інструменту.** Групу сталей з пониженою теплостійкістю до 200 °С і великою прогартовуваністю становлять вуглецеві якісні і високоякісні сталі У7(У7А)...У13(У13А). Для отримання високої твердості HRC 62...64 ці сталі піддають неповному гартуванню у воді за 770...810 °С і низького відпуску за  $T = 150...220$  °С, що дає змогу отримати структуру мартенситу і нерозчинні включення цементиту. Така твердість дає змогу використовувати ці матеріали для обробки основних машинобудівельних матеріалів (конструкційних сталей і чавунів у відпаленому стані)

твердістю до HRC 30...32. З причин пониженої теплостійкості такі інструментальні сталі застосовують за швидкостей різання до 10...15 м/хв.

Сталі У7, У8 і У9 піддають повному гартуванню за температури 800...820 °С і відпуску на тростит за  $T = 275...325$  °С (HRC 48...58) або за  $T = 400...500$  °С (HRC 44...48). Водночас зберігається досить висока твердість і достатня в'язкість, що дає змогу використовувати ці сталі для інструментів (деревообробних, слюсарних, ковальських тощо), які працюють в умовах ударних навантажень.

Прогартовуваність вуглецевих інструментальних сталей становить усього 10...12 мм. Тому їх використовують для виготовлення ріжучих інструментів з невеликим перетином або для інструментів діаметром до 25 мм, де можливо залишати непрогартовану серцевину, а ріжучим є тільки поверхневий шар (напильники, мітчики, розвертки тощо).

Сталі 11ХФ; 13Х рекомендуються для інструментів діаметром до 15 мм при їх гартуванні у маслі, що зменшує деформаційні явища. Вміст ванадію (до 0,3 %) позитивно впливає на збереження дрібнозернистої структури під час нагрівання. Сталі Х; 9ХС; ХВГ; ХВСГ також гартуються у маслі і відносяться до сталей із глибокою прогартовуваністю (35...80 мм). За підвищеної до (250...260 °С) теплостійкості інструменти з цих сталей мають високі ріжучі властивості і використовуються для інструментів збільшених розмірів (розверток, плашок, накатних гребінок тощо).

**1.2. Швидкорізальні сталі.** Групу швидкорізальних сталей з теплостійкістю 600...650 °С становлять високо вуглецеві ( $C = 0,7...0,95$  %), високолеговані сталі, до складу яких входять карбідотворювальні елементи (W, Mo, V, Cr), які хімічно зв'язують майже весь вуглець.

Завдяки високій твердості, міцності і теплостійкості швидкість різання під час механічної обробки такими сталями підвищується в 2...4 рази порівняно з вуглецевими і низьколегованими сталями. З цієї причини такі сталі отримали назву *швидкорізальні* і для їх маркування прийнято окреме позначення – літера «Р» (ріжуча) і цифра після неї, яка показує вміст вольфраму у відсотках. Вміст хрому в цих сталях  $\approx 4$  % і ванадію від 1 до 5 %. Наприклад, сталь Р6М5 вміщує  $\approx 6$  % W,  $\approx 5$  % Mo, і  $\approx 4$  % Cr. Вміст С і Cr в марках швидкорізальних сталей не вказують.

Швидкорізальні сталі піддають термічній обробці задля отримання максимальної твердості і теплостійкості за рахунок зниження до мінімуму кількості залишкового аустеніту. Це забезпечується після гартування і багаторазового відпускання.

Особливістю гартування швидкорізальних сталей є повільне нагрівання і витримка для доповнюючого прогрівання за температур 450 °С і 850 °С у соляних середовищах для запобігання окислення і знеуглецювання. Гартівне нагрівання швидкорізальних сталей проводять до  $T = 1270 \dots 1290$  °С, що забезпечує повне розчинення вторинних карбідів і отримання після гартування високолегованого мартенситу високої твердості (HRC 63...65), міцності і теплостійкості.

За рівнем допустимих швидкостей різання швидкорізальні сталі поділяють на 2 групи:

*Перша група* – ті, що забезпечують нормальну продуктивність процесу різання – це *вольфрамова група* сталей (P18; P12; P9) із вмістом вольфраму відповідно 18; 12 та 9 % і вольфрамомолібденові сталі P6M3; P6M5; P8M5. Ці сталі застосовують для обробки конструкційних сталей, чавунів (HB 2000...2800) і сплавів кольорових металів.

*Друга група* – ті, що забезпечують підвищення продуктивності процесу різання – це *ванадієва група* сталей (P14Ф4; P12Ф3М8), кобальтові (P18Ф2К5; P6М5К5; P10К5М5; P8М4К8). Ці сталі застосовують для обробки жароміцних сталей і сплавів, виконання чорнових операцій точіння, фрезерування та ін.

До швидкорізальних сталей, які забезпечують підвищення продуктивності процесу різання відносять також високолеговані сплави В11М7К23; В4М2К23; В18М7К25; В14М7К25. Це сталі, які мають понижений вміст вуглецю (0,05...0,15 %) за твердості HRC 68...69 і теплостійкості 700...730 °С та підвищений вміст кобальту, вольфраму і молібдену.

Вартість швидкорізальних сталей орієнтовно в 4...6 разів вища вартості легованих інструментальних сталей. Тому інструменти із цих сталей доцільно використовувати для різання високоміцних і важкооброблювальних матеріалів.

**1.3. Тверді металокерамічні сплави.** Ці сплави є основним інструментальним матеріалом, який використовується для обробки широкого спектру конструкційних матеріалів з різними властивостями. Завдяки тому, що тверді сплави забезпечують підвищення швидкості різання в 2...3 рази порівняно зі швидкорізальними сталями, продуктивність процесу механічної обробки значно зростає. Поряд із високою теплостійкістю (до 800...1000 °С) і твердістю (HRA 86...90) це робить тверді металокерамічні сплави основним матеріалом для

виготовлення ріжучого інструменту, на долю якого припадає 65...70 % всього об'єму обробки різанням.

Тверді сплави виготовляють методом пресування і спікання порошків карбідів WC, TiC і TaC разом з металічними кобальтом, нікелем або молібденом.

Залежно від складу карбідної фази тверді сплави поділяють *на чотири групи*: однокарбідні; двокарбідні; трьохкарбідні і безвольфрамові.

У позначеннях марок твердих сплавів перші букви позначають групу, до якої відносяться сплав: **ВК** – вольфрамокобальтова; **ТК** – титановольфрамокобальтова; **ТТ** – титанталокобальтова. Цифри після К – вміст кобальту в %; після Т – вміст TiC; після ТТ – сумарний вміст TiC і TaC.

Недоліком твердих сплавів є їх відносно низька міцність на згин ( $\sigma_{зг} = 0,9...1,6$  ГПа) відносно швидкорізальних сталей ( $\sigma_{зг} \approx 3...3,5$  ГПа), тому вони використовуються за умов дії стискаючих навантажень.

*Однокарбідні* сплави (вольфрамокобальтова група – ВК) вміщують карбід вольфрама і зв'язуючи металічний кобальт (ВК3; ВК4; ВК6; ВК10). З ростом вмісту кобальту зменшується твердість сплавів, підвищується пластичність.

*Двокарбідні* тверді сплави (титановольфрамова група – ТК) вміщують карбіди WC; TiC і металічний кобальт.

*Трьохкарбідні* тверді сплави (титанотаналовольфрамокобальтова група – ТТК) мають збільшені показники міцності на згин ( $\sigma_{зг} \approx 1,3...1,6$  ГПа). Вони мають високу зносостійкість і експлуатаційну міцність, а також високий опір ударним навантаженням і вібраціям. Тому їх використовують для чорнової обробки з великим перетином зрізувального шару, при роботі з ударами при струганні і фрезеруванні.

*Безвольфрамові* тверді сплави мають за основу карбід або карбонітрид титану і тугоплавку зв'язуючу нікельмолібденову матрицю. Розробка цієї групи інструментальних матеріалів пов'язана з гострою дефіцитністю вольфраму. Для цих матеріалів характерними є висока окалинотійкість, низький коефіцієнт тертя, понижена схильність до адгезійної взаємодії. У той же час ці матеріали мають порівняно невелику міцність, особливо за підвищених температур. До цієї групи відносять сплави на основі TiC (ТН-20; ТН-30) в яких цифри показують сумарний вміст Ni і Mo, а також на основі Ti(NC) – КНТ-16. Область застосування

цих сплавів – чистова та напівчистова обробка конструкційних і низьколегованих сталей та чавунів, а також кольорових металів. Під час обробки важкооброблюємих матеріалів стійкість безвольфрамкових сплавів нижче, ніж сплавів на основі карбїду вольфраму.

**1.4. Інструментальні матеріали для механічної обробки заготовок тиском.** Механічна обробка тиском має за мету отримання напівфабрикатів або виробів шляхом пластичного деформування заготовок без знімання стружки. Тобто в процесі деформування відбувається зміна форми без зміни маси. Таким чином, обробкою тиском можливо отримувати вироби із матеріалів, яким притаманна пластичність, тобто здатність незворотно деформуватися під дією зовнішніх сил без руйнування.

Методи обробки тиском у самому загальному вигляді можливо класифікувати таким чином. Для отримання виробів – напівфабрикатів типу кутиків, швелерів, двутаврів, кругляків тощо використовують прокат, пресування, волочіння в умовах спеціалізованих металургійних підприємств. На машинобудівельних і ремонтних підприємствах для отримання заготовок або деталей в умовах ковальсько-пресових цехів використовують кування, об'ємне і листове штампування, штампування на горизонтально-кувальних пресах.

Найважливішими особливостями, які впливають на вибір інструментального матеріалу для обробки металів тиском є температурний і силовий режим деформування. Зважаючи на велике різноманіття процесів деформування, форми і розмірів оброблюваних заготовок і деталей та на температурні умови експлуатації штампового інструменту, для його виготовлення використовують різні сталі. При цьому основною класифікаційною ознакою для вибору інструментальної штампової сталі є температура, за якої відбувається процес деформування.

**Сталі для штамів холодного деформування.** Штампи холодного деформування працюють в умовах високої знакозмінної напруги, зношування робочої поверхні, підвищених до 400...500 °С температур, які виникають за рахунок саморозігрівання при деформуванні високоміцних матеріалів за великої інтенсивності штамповки.

Вимоги до штампованих сталей холодного деформування формулюють з огляду на умови їх експлуатації. Основними вимогами є підвищена твердість і зносостійкість, високий опір малим пластичним

деформаціям, задовільна міцність і в'язкість, а також достатня теплостійкість за жорстких умов штампування.

Для невеликих витягувальних і висадочних штампів за невеликих ударних навантажень використовують вуглецеві інструментальні (У8; У10; У12), а також низьковуглецеві (Х; 9ХС; ХВГ; ХВСГ) сталі. Ці сталі після термічної обробки мають твердий поверхневий шар і через нескрізну прогартовуваність – в'язку серцевину.

Сталі з високим вмістом хрому (Х12; Х12М; Х12Ф1) і домішками молібдену та ванадію, які мають прогартовуваність до 150...200 мм і високу зносостійкість використовують для великих інструментів: вирубних, обрізних, чеканочних штампів, накатних роликів тощо.

**Сталі для штампів гарячого деформування.** Штамповий інструмент гарячого деформування працює в більш складних і жорстких умовах порівняно зі штампами для холодного деформування.

Руйнування штампів гарячого деформування при експлуатації відбуваються перш за все в результаті пластичної деформації (зминання) або крихкого руйнування. Характер руйнування залежить від величини, знаку і характеру діючої напруги і температури деформування. Крім того, внаслідок об'ємних змін у поверхневому шарі штампів за різких змін температури утворюються сітки розгарних тріщин на робочій поверхні штампів.

**Класифікацію штампових сталей для гарячого деформування** найбільш доцільно проводити за способом їх зміцнення, а також за умовами експлуатації.

Способи зміцнення визначають основні і технологічні їх властивості, а також режими їх термічної обробки. За цією ознакою штампові сталі для гарячого деформування поділяють на:

1) Сталі, що зміцнюються внаслідок мартенситного перетворення; до них відносять низьколеговані сталі типу 5ХНМ; 5ХНВ; 5ХНВС та ін. Ці сталі характеризуються невисокою (до 350...450 °С) теплостійкістю і підвищеною (понад 40 Дж/см<sup>2</sup>) ударною в'язкістю на зразках з надрізом.

2) Сталі, що зміцнюються шляхом мартенситного перетворення і дисперсного тверднення. Це найбільш чисельна група штампових сталей, до якої відносять сталі із вмістом вуглецю до 0,5 % хрому 2...6 %; вольфраму і молібдену до 8...10 %; ванадію до 1,5 % і кобальту до 8 % (у сталях підвищеної теплостійкості). Сталі цієї групи відрізняються

сполученням підвищеної теплостійкості (до 650...740 °С) і задовільною ударною в'язкістю (до 30...40 Дж/см<sup>2</sup>) на зразках з надрізом.

**1.5. Сталі для вимірювального інструменту.** До вимірювального інструменту насамперед ставлять вимоги стабільності розмірів і форми протягом усього терміну експлуатації. Тому для виготовлення вимірювальних інструментів використовують сталі, які мають високу твердість і зносостійкість після необхідної термічної обробки. У цих сталях не повинні протягом часу експлуатації відбуватися структурні перетворення, які б викликали зміну розмірів інструменту, тобто вони мають мати мінімальний коефіцієнт лінійного розширення.

Не менш важливою вимогою до цих сталей є досягнення високої чистоти поверхні після механічної обробки і мінімальної деформації після термообробки. З огляду на такі вимоги найбільш широко для виготовлення вимірювального інструменту використовують цементовані сталі 15; 20; 20Х; 12ХН3А, інструментальні вуглецеві сталі У8 – У12, високовуглецеві низьколеговані хромисті сталі Х; ХВГ; 9ХС; Х12Ф1 і азотовані 38ХМЮА, 38Х2МЮА.

Термообробку таких сталей проводять у такий спосіб, щоб ускладнити процес старіння. Для зменшення кількості залишкового аустеніту гартування проводять за можливо низьких температур. Після гартування застосовують стабілізуючий низькотемпературний відпуск – штучне старіння (нагрівання до 120...170 °С із витримкою 10...30 год). Крім того, інструменти високої точності піддають обробці холодом за температури -50...-80 °С. Інструменти підвищеної точності піддають багаторазовому чергуванню обробки холодом і відпуску. Цементовані сталі 15; 20; 12Х3НА і інші використовують для виготовлення плоских вимірювальних інструментів типу лінійок, шаблонів, контрольних скоб та ін.

## **2. Необхідні прилади і матеріали**

- 2.1. Мікроскопи з набором оптики.
- 2.2. Зразки інструментальних сталей.
- 2.3. Абразивні матеріали.
- 2.4. Хімічні травлювачі.

## **3. Послідовність виконання роботи**

- 3.1. Ознайомитися з принципом дії та настроюванням мікроскопу.

**3.2.** Вивчити під мікроскопом структурний і фазовий склад шліфів-зразків і визначити марку сталі та процентний вміст вуглецю і хімічних домішок. Замалювати структуру у відповідній графі табл. 7.1.

**3.3.** Визначити можливість практичного застосування інструментальних сталей, що вивчаються, і записати до відповідної графі табл. 7.1.

**3.4.** Сформулювати висновок.

#### **4. Результати роботи**

**4.1.** Результати роботи занести до табл. 7.1

#### **5. Контрольні запитання**

**5.1.** Поясніть призначення, зміст і методику проведення мікроструктурного аналізу.

**5.2.** Які переваги і недоліки використання вуглецевих сталей для виготовлення ріжучого інструменту?

**5.3.** Назвіть структурні і фазові складові інструментальних сталей після термічної та хіміко-термічної обробки.

**5.4.** Як впливає термічна та хіміко-термічна обробка на фізико-механічні властивості інструментальних сталей?

Таблиця 7.1

## Структура, властивості і застосування інструментальних сталей і твердих сплавів

Марка сталі	Хімічний склад	Зображення мікроструктури	Склад		Режими термічної обробки	Фізико-механічні властивості		Застосування
			Структ.	Фазовий		Твердість HRC	Теплостійкість T, °C	
У8	C=0,8%		M <sub>B...Л.</sub> +A <sub>3</sub>	M <sub>B...Л.</sub> +A <sub>3</sub>	t <sub>г</sub> =800-820°C t <sub>в</sub> =275-325°C	48-58	до 200	
У12	C=1,2% Cr=1%		M <sub>B...Л.</sub> +A <sub>3</sub> +Fe <sub>3</sub> C	M <sub>B...Л.</sub> +A <sub>3</sub> +Fe <sub>3</sub> C	t <sub>г</sub> =770-810°C t <sub>в</sub> =150-220°C	62-64	до 200	
ХВГ	C=1,2% Cr=1% W=1% Mn=1%		M <sub>B...Л.</sub> +Цл +A <sub>3</sub>	M <sub>B...Л.</sub> +Цл +A <sub>3</sub>	t <sub>г</sub> =830-850°C t <sub>в</sub> =140-170°C	64-654	200-260	
P12	C=0,85% Cr=3,3% W=12,5% V=1,7%		M <sub>B...Л.</sub> +WC +A <sub>3</sub>	M <sub>B...Л.</sub> +WC +A <sub>3</sub>	t <sub>г</sub> =1270-1290°C t <sub>в(3)</sub> =560°C σ <sub>зг</sub> =3-3,5Г.МПа	63-65	до 620	
ВК8	WC=92% Co=8%		--	--	σ <sub>зг</sub> =1600МПа	HRA 87	1100	
T15K6	Co=6% TiC=15% WC=79%		--	--	σ <sub>зг</sub> =950МПа	HRA 90	900	

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 8

### Дослідження структур кольорових металів

**Мета роботи:** вивчити мікроструктуру, властивості і застосування сплавів кольорових металів

#### 1. Основні теоретичні положення

У машинобудуванні досить широко використовують сплави кольорових металів. Найбільше поширення мають сплави на основі міді, алюмінію, олова та ін. Це пояснюється їх такими винятковими особливостями, як корозійна стійкість, антифрикційні та ливарні властивості, пластичність, добра оброблюваність різанням. Незважаючи на підвищену порівняно з чорними металами вартість кольорових металів, у багатьох випадках їх використання виявляється необхідним та економічно виправданим.

**Сплави на основі міді** (рис. 8.1). Широке застосування мають сплави міді з цинком – *латуні* і міді з оловом, свинцем, алюмінієм, берилієм та ін. – *бронза*.



Рис. 8.1. Структура міді

Латуні мають вміст цинку, що не перебільшує 45 %, який розчинюється у вигляді звичайних твердих розчинів. За нормальної температури латуні (залежно від вмісту Zn) утворюють або однорідні тверді розчини, або суміш зерен твердих розчинів. Максимальну пластичність мають латуні із вмістом  $Zn = 30\%$ . Такі латуні мають однофазну структуру  $\alpha$  – твердого розчину, добре штамнуються

і обробляються різанням (рис. 8.2, *a*). Присутність у структурі латуней  $\beta$  – кристалів знижує їх пластичність. Латуні, які мають суцільну структуру  $\beta$  – кристалів, крихкі, тверді й у промисловості не застосовуються. На рис. 8.2, *б* показано структуру ( $\alpha + \beta$ ) латуні.  $\alpha$  – фаза являє собою твердий розчин цинку у міді.  $\beta$ -фаза – це твердий розчин на основі CuZn, яка має звичайну кубічну об’ємноцентровану решітку. Таку структуру має, наприклад, латунь Л60.

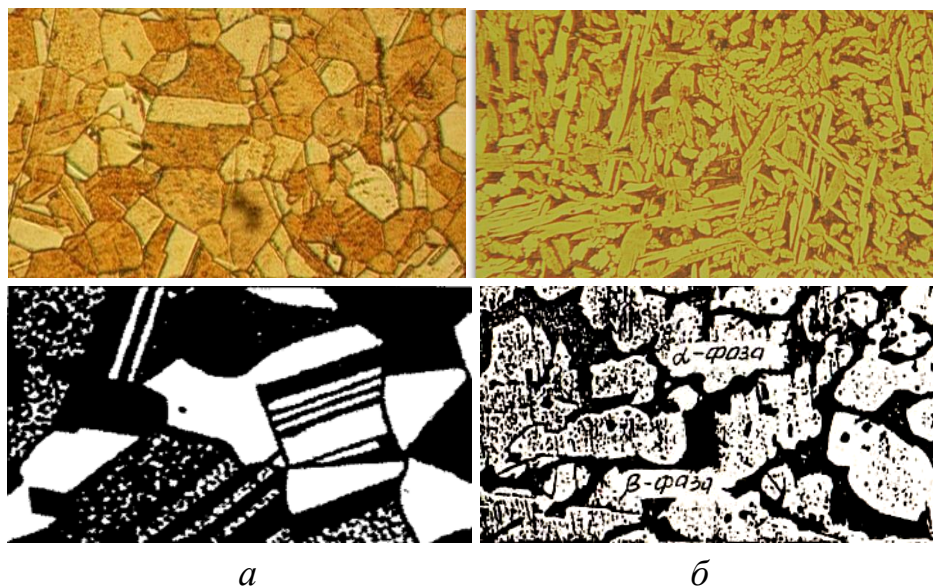


Рис. 8.2. Структура латуні x 250:  $\alpha$ - латуні (*a*);  $\alpha + \beta$  – латуні (*б*).

Бронза має структуру твердого розчину олова з міддю та евтектоїдної суміші. Евтектоїд знижує пластичність бронзи, і тому вони не обробляються тиском. Під дією тертя пластична складова зношується швидше, ніж евтектоїд. В утворених при цьому заглибленнях на поверхні добре затримуються мастильні матеріали. Кращими антифрикційними матеріалами є бронза зі вмістом олова 10...12 %. Їх застосовують як конструкційний матеріал для виготовлення вкладишів і втулок.

Бронза має незначну (близько 1 %) усадку і виявляється хорошим ливарним матеріалом, з якого виготовляють різну гідравлічну та парову арматуру. Цьому сприяє і висока корозійна стійкість бронзи, вироби з якої працюють навіть у морській воді.

На рис. 8.3 показано, як приклад, структуру олов’янистої бронзи.

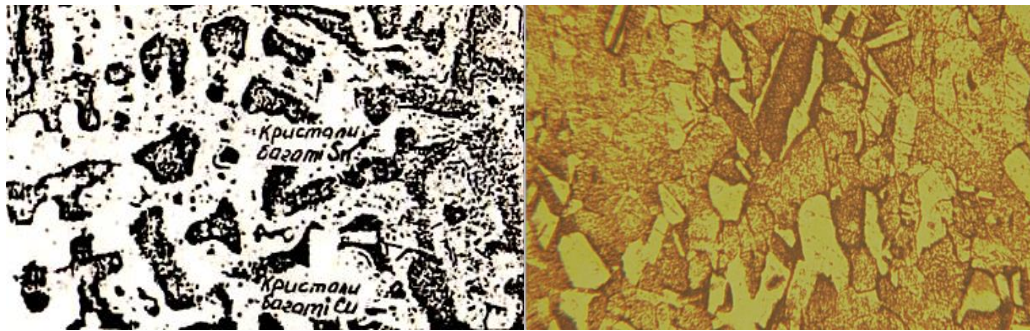


Рис. 8.3. Структура олов'янистої бронзи x 200

**Сплави на основі алюмінію.** Найбільше поширення мають сплави алюмінію з кремнієм – **силуміни** та алюмінію з міддю, магнієм і марганцем – **дюралюміній**.

Силуміни широко використовують для виготовлення деталей складної форми методом лиття таких, наприклад, як блоки двигунів внутрішнього згорання.

Структура силумінів являє собою двофазний евтектичний сплав грубоголкової форми. Алюміній є матрицею сплаву (рис. 8.4), в якій кремній розташований у вигляді темних включень.

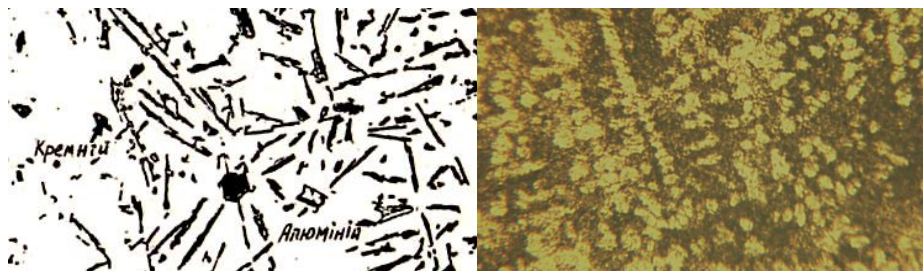


Рис. 8.4. Структура силуміну x 200

Дюралюміній у відпаленому стані являє собою структуру твердого розчину – міді в алюмінії та вторинних включень  $Cu Al$ ,  $Al Cu H_3$ .

Зміцнюють дюралюміній шляхом гартування і старіння. Гартування проводять за  $500\text{ }^\circ\text{C}$  з охолодженням у воді. Для природного старіння дюралюміній витримують на повітрі за температури  $18...20\text{ }^\circ\text{C}$  протягом 5...6 діб. При штучному старінні нагрівають до  $150...200\text{ }^\circ\text{C}$  з витримкою 20...30 хв. Міцність алюмінію в результаті гартування і старіння підвищується в 1,5...2 рази (рис. 8.5).

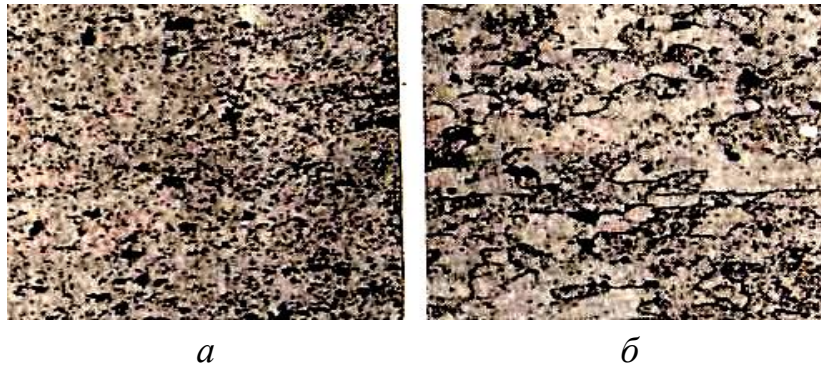


Рис. 8.5. Структура дюралюмінію Д16 х 250: *a* – після відпалу; *б* – після гартування

**Бабіти** – це сплави на основі олова та свинцю з домішками сурми. Найкращі антифрикційні якості мають такі бабіти, в яких тверді складові структури розподілені рівномірно за об’ємом і мають невеликі розміри. Наприклад, поширені бабіти Б88 і Б83 – багатоконпонентні сплави на основі Sn - Sv (рис. 8.6).

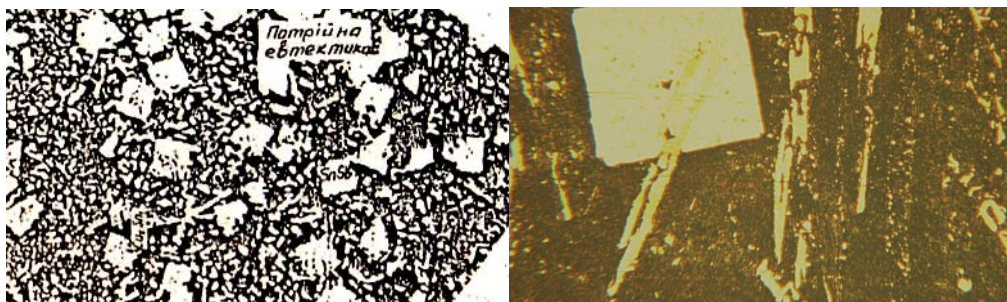


Рис. 8.6. Структура бабіту Б83 х 200

## 2. Необхідні прилади і матеріали

2.1. Зразки сплавів кольорових металів.

2.2. Мікроскопи.

2.3. Навчальна і довідкова література.

## 3. Послідовність виконання роботи

Знаючи марку сплаву, необхідно розкрити його хімічний склад і, спираючись на результати мікроскопічного аналізу, визначити, до якої групи (ливарної чи тієї, що деформується) він відноситься. За літературними джерелами охарактеризувати механічні властивості сплавів та їх застосування.

## 4. Результати роботи

### 4.1. Результати роботи занести до табл. 8.1.

Таблиця 8.1

### Склад, структура, властивості і застосування сплавів кольорових металів

Марка сплаву	Хімічний склад сплаву	Зображення мікроструктури	Структурний склад	Той, що деформується чи ливарний	Властивості			Застосування
					$\sigma_{тц}$ , МПа	НВ, МПа	$\delta$ , %	
Мідь М1	99,90%Cu		Кристали міді	Д	150-250	480	40-50	при виробництві проводів, кабелів, шин, струмопровідних частин електроустановок
Бронза БрА5	92,9-96%Cu 4-6%Al		Зерна $\alpha$ -твердого розчину алюмінію в міді	Д	440-800	1100	70	методи, деталі, що працюють в морській воді, деталі для хімічного машинобудування
Латунь Л59	57-60%Cu 39,1-43%Zn		$\alpha$ + $\beta$ -світлі зерна - $\alpha$ -фаза твердого розчину Zn в Cu, з ГЦК решіткою міді, темні зерна - $\beta$ -фаза - впорядкований твердий розчин на базі електронного з'єднання CuZn з ОЦК гратами.	Л	390-500	500	25	товстостінні патрубки, гайки, деталі машин
Бабіт Б83	80,9-84,5%Sn, 10-12%Sb, 5,5-6,5%Cu		Твердий розчин сурми і міді в олові (темне поле) - м'яка складова, світлі кубики - хімічна сполука SnSb, світлі дрібні включення - з'єднання $Cu_3Sn$	Л	110-120	300	6	підшипники, що працюють при великих швидкостях і середніх навантаженнях, підшипники турбін, опорні підшипники гребних валів
Силумін АЛ2	84,3-90%Al, 10-13%Si		Світлове поле - $\alpha$ -твердий розчин Si в Al, темні голки - включення Si	Л	160-190	250	7	використовуються для виготовлення фасонних виливків різної форми та призначення

## **5. Контрольні запитання**

- 5.1. Які властивості має дюралюміній після старіння?
- 5.2. Що забезпечує антифрикційні властивості бронзи?
- 5.3. За якими ознаками сплави поділяють на ливарні й такі, що деформуються?
- 5.4. Яка структурна будова бабітів?

## **СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ**

1. Гарнець В.М. Матеріалознавство: лабораторний практикум / В.М. Гарнець та ін. – К.: КНУБА, 2008. – 104 с.
2. Гарнець В.М. Матеріалознавство: підручник. – К.: Кондор, 2009. – 386 с.
3. Гарнець В.М. Конструкційне матеріалознавство: підручник / В.М. Гарнець, В.М. Коваленко. – К.: Либідь, 2007. – 384 с.
4. Добровольський О.Г. Матеріалознавство: навчальний посібник. – К.: КНУБА, 2004. – 100 с.
5. Кузін О.П. Металознавство та термічна обробка металів / О.П. Кузін, Р.А. Яцюк. – Львів: Афіша, 2002. – 300 с.
6. Большаков В.І. Матеріалознавство. Основи виробництва конструкційних матеріалів та металознавство: навчальний посібник / В.І. Большаков, А.Н. Лук'янскова, Л.І. Котова. – К.: ІМК ВО, 1993. – 237 с.
7. Никифоров В.М. Технологія металів і конструкційні матеріали: Переклад з російської. – К.: Вища школа, 1984. – 344 с.
8. Попович В.В. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство: навчальний посібник для вузів: Кн.1 (ч.1, 11 і 111). – Львів: Укр.ДЛТУ, 2000. – 264 с.
9. Яцюк А.І. Матеріалознавство: навчальний посібник / А.І. Яцюк, Р.А. Яцюк. – К.: ІЗМН, 1996. – 168 с.

Навчально-методичне видання

# **МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО І ТЕХНОЛОГІЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ (МОДУЛЬ 1)**

Методичні вказівки  
до виконання лабораторних робіт  
для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти  
спеціальностей 131 «Прикладна механіка»,  
133 «Галузеве машинобудування»

Укладачі **ШАЛЕНКО** Вадим Олегович,  
**МАСЛЮК** Андрій Анатолійович

Випусковий редактор *В.С. Сасько*  
Комп'ютерне верстання *Д.М. Ніколаєвич*

Підписано до друку 12.04.2023. Формат 60x84<sub>1/16</sub>  
Ум. друк. арк. 4,18. Обл.-вид. арк. 4,5.  
Електронний документ. Вид. № 35/III-23

Видавець і виготовлювач:  
Київський національний університет будівництва і архітектури  
Повітрофлотський проспект, 31, Київ, Україна, 03037

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів  
видавничої справи ДК № 808 від 13.02.2002 р.