МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ОДЕСЬКИЙ
НАЦІОНАЛЬНИЙ МОРСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра «Матеріалознавство і технологія матеріалів»

# МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

## Лабораторний практикум

Одеса – 2024

Перевидання лабораторного практикуму схвалено кафедрою «Матеріалознавство і технологія матеріалів Одеського національного морського університету 11 вересня 2024 року (протокол № 8).



# ЗМІСТ

Лабораторна робота №1. Механічні і технологічні випробування матеріалів ..... 6

1. Загальні відомості ..... 6
2. Механічні випробування ..... 7
   2.1. Випробування на розтягнення ..... 7
   2.2. Випробування на вигин ..... 10
   2.3. Випробування на ударну в'язкість ..... 11
3. Технологічні випробування ..... 13
   3.1. Випробування на вигин ..... 13
   3.2. Випробування дроту на перегин ..... 15
   3.3. Випробування листів на витяг ..... 16
4. Контрольні питання ..... 18
5. Зміст звіту ..... 18

Лабораторна робота №2. Визначення твердості металів ..... 20

1. Загальні відомості ..... 20
2. Визначення твердості по Брінелю ..... 20
3. Визначення твердості по Роквеллу ..... 24
4. Контрольні питання ..... 27
5. Зміст звіту ..... 28
6. Визначення твердості вдавлюванням алмазної піраміди ..... 29
7. Визначення твердості по Віккерсу ..... 31
8. Визначення мікротвердості ..... 35
9. Контрольні питання ..... 38
10. Зміст звіту ..... 38

Лабораторна робота №3. Макро- і мікроструктурний аналіз металів ..... 40

1. Загальні відомості ..... 40
2. Макроструктурний аналіз ..... 40
   2.1. Підготовка і вивчення макрошліфів ..... 41
   2.2. Визначення ліквації сірки ..... 41
   2.3. Визначення волокнистості сталі ..... 42

3. Мікроструктурний аналіз ..... 43
3.1. Підготовка і вивчення мікрошліфів ..... 44
3.2. Оптична система мікроскопа ..... 46
4. Контрольні питання ..... 46
5. Зміст звіту ..... 46

Лабораторна робота №4. Структури і властивості вуглецевих сталей в рівноважному стані ..... 48

1. Загальні відомості ..... 48
2. Методика визначення змісту вуглеця по структурі доевтектоідної сталі ..... 49
3. Структури вуглецевих сталей ..... 50
4. Класифікація і маркіровка вуглецевих сталей ..... 52
4.1. Класифікація по структурі ..... 52
4.2. Класифікація за якістю ..... 52
4.3. Класифікація за призначенням ..... 53
5. Область застосування вуглецевих сталей ..... 57
6. Контрольні питання ..... 60
7. Зміст звіту ..... 61
8. Вплив домішок і технології обробки на структуру і властивості вуглецевих сталей ..... 62
8.1. Вплив домішок ..... 62
8.2. Вплив обробки тиском ..... 65
8.3. Вплив термічних дій ..... 66
8.4. Вплив третинного цементиту ..... 67
9. Контрольні питання ..... 68
10. Зміст звіту ..... 69

Лабораторна робота №5. Структури і властивості чавунів ..... 70

1. Загальні відомості ..... 70
2. Умови процесу графітизації ..... 70
3. Класифікація сірих чавунів ..... 71
4. Сірий ливарний чавун ..... 72
5. Високоміцний чавун ..... 74
6. Ковкий чавун ..... 75



7. Білий чавун ..... 77
8. Область застосування чавунів ..... 78
9. Контрольні питання ..... 79
10. Зміст звіту ..... 79

Лабораторна робота №6. Термічна обробка вуглецевої сталі ..... 80

1. Загальні відомості ..... 80
2. Гартування ..... 83
3. Відпускання ..... 85
4. Контрольні питання ..... 87
5. Зміст звіту ..... 88

# Лабораторна робота №1
# Механічні і технологічні випробування матеріалів

Мета роботи: Ознайомитися з технікою проведення механічних і технологічних випробувань і визначення механічних і технологічних властивостей матеріалів.

## 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Внаслідок механічних випробувань визначають різні показники механічних властивостей матеріалів, які характеризують їх міцність і пластичність при різних видах навантаження (при розтягненні, стисненні, вигині, крутінні і інш.), а також в'язкість, твердість тощо. Частіше за інших (після випробувань на твердість) проводиться випробування на розтягнення, що дозволяє за результатами одного досліду встановити декілька важливих механічних характеристик матеріалу.

Механічні випробування проводять в наступних випадках:

– при розробці нових матеріалів;

– при виготовленні матеріалів для контролю їх якості;

– при визначенні причини аварійного пошкодження або руйнування деталі або конструкції.

У перших двох випадках для виготовлення зразків для випробувань завжди є необхідна кількість матеріалу. У третьому випадку зразки вирізають з пошкодженої деталі і тому їх форма і розміри обмежені розмірами деталі.

Механічні випробування поділяються на статичні і динамічні. Статичні випробування проводяться при повільній зміні навантаження на зразок, так що можна нехтувати силами інерції. Динамічні випробування проводяться для визначення властивостей матеріалів, наближених до умов експлуатації деталей.

Внаслідок технологічних випробувань визначають якісні показники, що характеризують здатність матеріалів зазнавати певного виду обробки в процесі виготовлення деталі. Тому їх часто називають технологічними пробами. Більшість методів технологічних випробувань застосовують для визначення деформуємості металевих матеріалів. До технологічних також відносять випробування на зварюваність, на оброблюваність різанням, на прогартовуваність і інш.

Всі параметри механічних і технологічних випробувань обумовлені відповідними стандартами і технічними умовами.



## 2. МЕХАНІЧНІ ВИПРОБУВАННЯ

### 2.1. Випробування на розтягнення

Для випробувань на розтягнення застосовують циліндричні і плоскі зразки. Вони мають робочу частину і головки для зручності кріплення в захватах машини. Допускається застосування зразків без головок. Види і розміри зразків показані на рис.1 і в таблиці І.

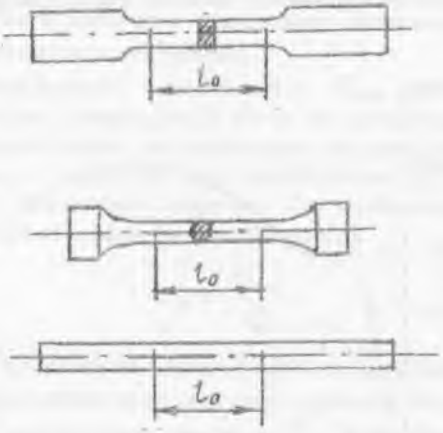



Рис.1. Види зразків для випробування на розтягнення

Таблиця І

***Види і розміри зразків для випробувань на розтягнення***

| Зразок | | Розрахункова довжина, $l_0$, мм | Діаметр циліндричного зразка, $d_0$, мм | Площа поперечного перетину, $F_0$, мм$^2$ |
|---|---|---|---|---|
| Нормальний | довгий | 200 | 20 | 314 |
| | короткий | 100 | 20 | 314 |
| Пропорційний | довгий | $13{,}3\sqrt{F_0}$ | довільній | довільна |
| | короткий | $5{,}65\sqrt{F_0}$ | довільній | довільна |

Краще використовувати нормальні, тобто циліндричні зразки діаметром 20 мм. Довгий зразок називають також десятикратним, а короткий –

п'ятикратним по величині відношення розрахункової довжини до діаметра. При неможливості виготовлення нормальних зразків виготовляються пропорційні.

Перед випробуванням на зразку відзначають олівцем або рисувалкою розрахункову довжину $l_0$, а також вимірюють розміри поперечного перетину і визначають $F_0$. Потім зразок укріплюють в захватах випробувальної машини і піддають розтягненню до розриву.

Існує декілька конструкцій машин для випробувань на розтягнення. Всі вони мають навантажуючий механізм, який забезпечує переміщення рухомого захвату, силомірний механізм і пристрій для запису діаграми розтягнення в координатах подовження-навантаження.

Типова діаграма розтягнення металевого зразка показана на рис.2

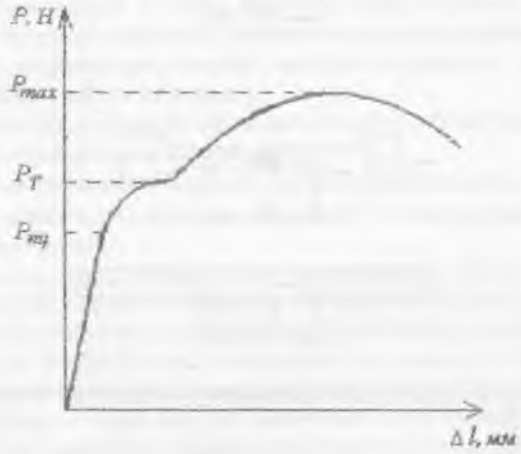



Рис.2. Діаграма розтягнення металевого зразка

Спочатку, до навантаження $P_{пц}$, діаграма являє собою пряму лінію. На цій дільниці подовження пропорційне навантаженню. При цьому в зразку виникають тільки пружні деформації, які зникають після зняття навантаження. При цьому навантаженні визначають межу пропорціональності.

$$\sigma_{пц} = \frac{P_{пц}}{F_0}.$$

При подальшому підвищенні навантаження прямолінійність порушується і пряма переходить в криву. Тут в зразку виникає пластична або залишкова деформація. У деяких сплавів крива переходить майже в горизонтальну лінію, звану майданчиком текучості, оскільки тут метал подовжується деякий час без



збільшення навантаження, тобто як би "тече". По цій дільниці кривої визначають дуже важливий параметр - межу текучості

$$\sigma_T = \frac{P_T}{F_0}.$$

Якщо при розтягненні зразка не утвориться майданчик текучості, то визначають умовну межу текучості

$$\sigma_{0,2} = \frac{P_{0,2}}{F_0},$$

де $P_{0,2}$ – навантаження, відповідне залишковому подовженню, рівному 0,2 % розрахункової довжини зразка $l_0$.

До досягнення найбільшого навантаження $P_{max}$ всі дільниці зразка деформуються однаково, рівномірно, а потім вся деформація скупчується на малій дільниці довжини зразка, де утворюється так звана "шийка". При цьому зразок деформується і руйнується при навантаженні, що знижується через зменшувану площу поперечного перетину. По найбільшому навантаженню визначають межу міцності, звану тимчасовим опором.

$$\sigma_B = \frac{P_{max}}{F_0}.$$

Склавши щільно обидві половинки зруйнованого зразка, вимірюють його довжину $l_1$ і розміри поперечного перетину в самому тонкому місці шийки, визначаючи площу поперечного перетину $F_1$. Потім визначають відносне подовження

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \cdot 100\%$$

і відносне звуження

$$\Psi = \frac{F_0 - F_1}{F_0} \cdot 100\%.$$

Подовження, визначене на довгих зразках, позначають – $\delta_{10}$, а на коротких – $\delta_5$, оскільки з всіх характеристик, що визначаються при випробуванні на розтягнення, тільки подовження залежить від довжини зразка.

Для пластмас визначають також відносне подовження, відповідне межі текучості

$$\delta_T = \frac{l_T - l_0}{l_0} \cdot 100\%.$$

## 2.2. Випробування на вигин

Випробуванню на вигин зазнають крихкі матеріали, головним чином чавуни, а також деякі пластмаси, дерев'яні і інші неметалічні матеріали. Для випробувань застосовують зразки круглого або прямокутного перетину. Випробування проводять або на спеціально для цього призначених пресах, або на машинах для випробувань на розтягнення, що мають також пристрій для випробувань на вигин і стиснення.

Випробування частіше ведуть по схемі зосередженого вигину (рис.3)

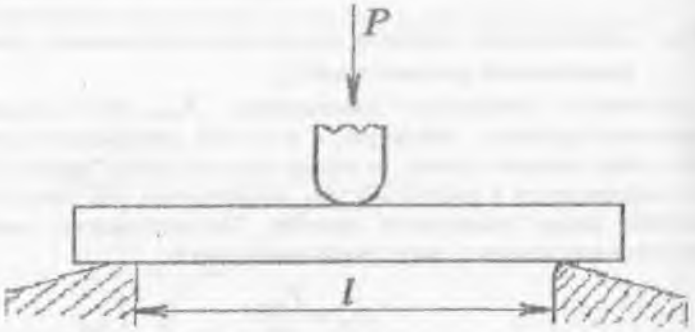



Рис.3. Випробування на вигин по схемі зосередженого вигину

У результаті випробування визначають найбільше навантаження і прогин $f$ зразка до руйнування. Потім розраховують межу міцності при вигині по залежності

$$\sigma_в = \frac{P_{max} \cdot l}{4 \cdot W}, \text{ МПа},$$

де $P_{max}$ – найбільше навантаження до руйнування зразка, Н;

$l$ – відстань між опорами, мм;

$W = \frac{bh^2}{6}$ мм$^3$ – для плоского зразка;

$W = \frac{\pi d^3}{32}$ мм$^3$ – для круглого зразка;

$b$, $h$ і $d$ - ширина, товщина і діаметр зразків, мм.

Для деяких пластмас, що не руйнуються при вигині, визначають навантаження, що забезпечує прогин зразка, рівний

$$f = 1.5\,h .$$



## 2.3. Випробування на ударну в'язкість

Випробуванням на ударну в'язкість визначається здатність опору крихкому руйнуванню в'язких металевих і полімерних матеріалів.

Випробування засноване на руйнуванні зразка одним ударом маятника, падаючого з певної висоти $H$ (рис.4).

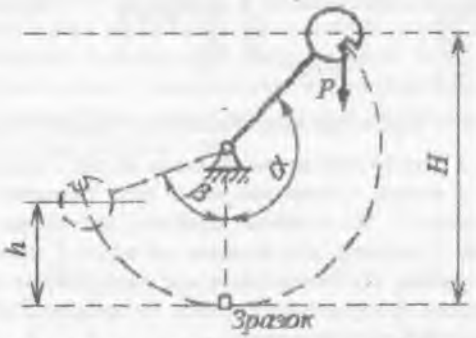



Рис.4. Схема випробування на ударну в'язкість

При падінні він руйнує зразок і підіймається на висоту $h$. Робота, затрачена на руйнування зразка, визначається по залежності

$$A = Q\,l\,(\cos\beta - \cos\alpha),$$

де $Q$ – маса маятника, кг;

$l$ – довжина маятника, тобто відстань від його осі до центра ваги;

$\alpha$ і $\beta$ – кути підйому маятника до і після зламу зразка.

Ударна в'язкість зразка визначається як питома робота руйнування зразка

$$a = \frac{A}{F_0},$$

де $F_0$ – площа поперечного перетину зразка в місці руйнування.

Зразки з неметалічних матеріалів виконуються прямокутного або квадратного перетину з надрізом посередині або без нього. Металеві зразки виконуються квадратного перетину з надрізом посередині. В основному застосовується дві форми надрізу: U-образний, як на рис.5, і V-образний. У цьому випадку ударна в'язкість визначається KCU або KCV.

Розмірність ударної в'язкості:

для металів – МДж/м$^2$ (і МДж/м$^2$ ≈ 10 кгм/см$^2$);

для пластмас – КДж/м$^2$ (1 КДж/м$^2$ ≈ 1 кгсм/см$^2$).

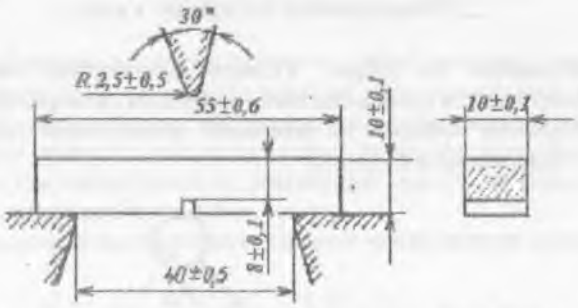



Рис.5. Зразок для випробування на ударну в'язкість

На станині *1* (рис.6) маятникового копра на осі *2* підвішений маятник *3* з плоским диском з ножем *4*. Маятник може бути піднятий на певну висоту і затриманий клямкою *5*. На станині укріплені дві опори *10* для установки зразка *11*. Стрілка *6* служить для вказівки на шкалі *7* кута підйому маятника після руйнування зразка. Ця шкала також має градуювання в одиницях роботи, затраченої маятником на руйнування зразка. Рукояткою *8* натягують ремінь *9* і зупиняють маятник, що розгойдується.

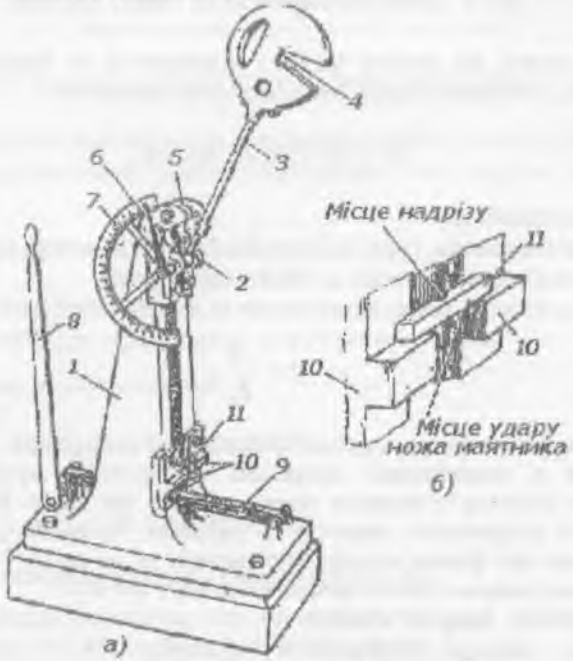



Рис.6. Маятниковий копер:
*а*) – загальний вид, *б*) – положення зразка при випробуванні



# 3. ТЕХНОЛОГІЧНІ ВИПРОБУВАННЯ

## 3.1. Випробування на вигин

Технологічна проба на вигин широко застосовується для листової котельної, суднокорпусної і резервуарної сталі. При проведенні випробувань зразки (в більшості випадків планки шириною від 30 до 50 мм і довжиною від 200 до 300 мм) повільно згинають в спеціальному пристосуванні (рис.7). В результаті випробування визначають кут загину $\alpha$, при якому з'явилася перша тріщина на зовнішній, розтягуваній стороні смуги. Такі проби застосовують також для контролю якості зварних швів при оцінці зварюваності металу, а також при кваліфікаційному повторному огляді зварників. При цьому пробні планки загинаються по зварному шву.

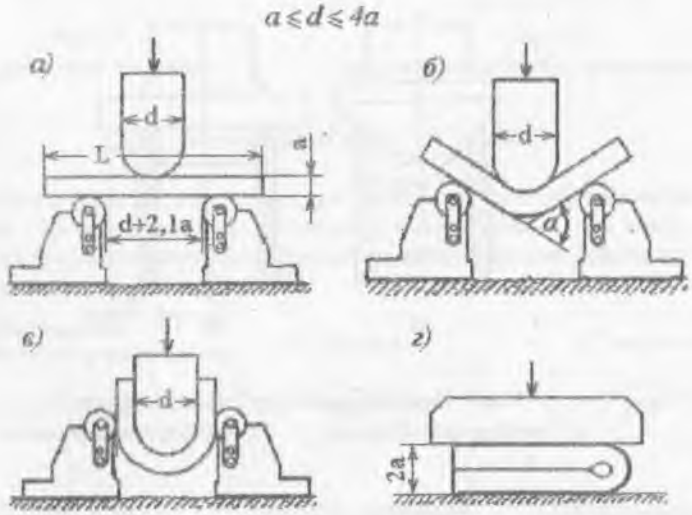



Рис.7. Проба на вигин

В ускладненому вигляді пластичний вигин також є основним елементом різноманітних технологічних проб, яким піддають при прийманні металеві труби в котло- і суднобудуванні. До них відносяться проби на відбортовку, здійснювані вручну (рис.8) або за допомогою пристосування (рис.9), на сплощення (рис.10) і вигин (рис.11). Проба на розвальцювання (рис.12) виконується шляхом послідовної запресовування в трубу конусних оправок з кутом, що збільшується при вершині від 30° до 120°, поки не з'явиться перша тріщина або не буде досягнуто необхідне збільшення діаметра труби.

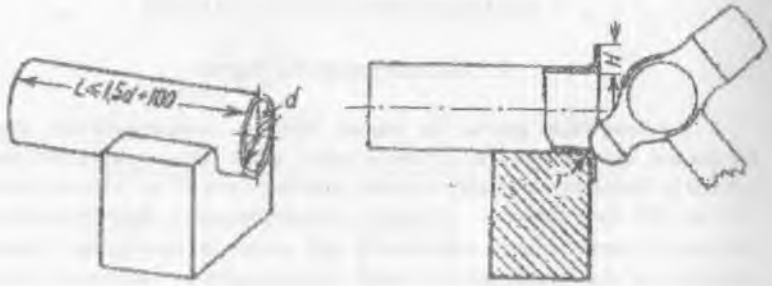



Рис.8. Проба труб на бортування

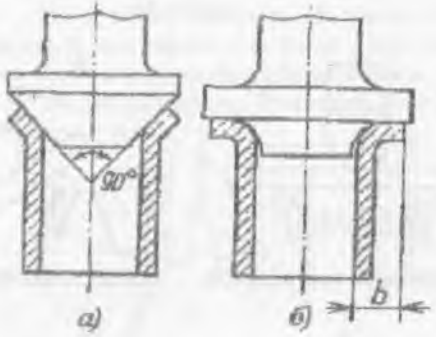



Рис.9. Випробування труб на відбортовку:
*а*) - відбортовний конус; *б*) – відбортовна оправка.

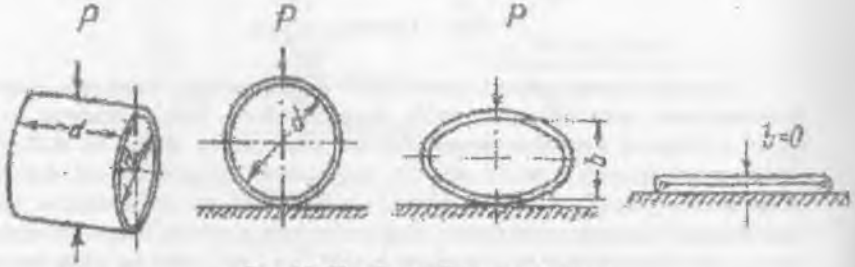



Рис.10. Проба труб на сплощення



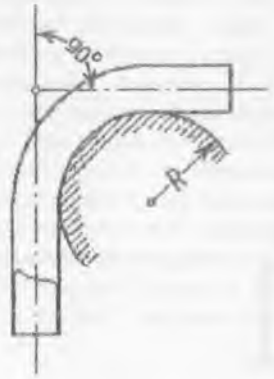



Рис.11.
Проба труб на вигин

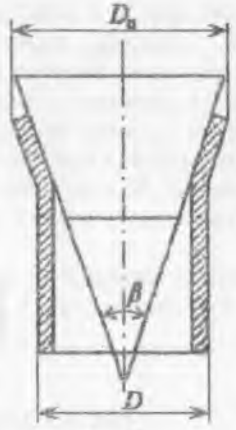



Рис.12.
Випробування труб на розвальцювання

### 3.2. Випробування дроту на перегин

Випробування полягає в тому, що затиснутий між губками лещат зразок дроту або стрічки згинається праворуч і ліворуч (рис.13) до зламу або до досягнення числа перегинів без руйнування, відповідаючим технічним умовам на матеріал.

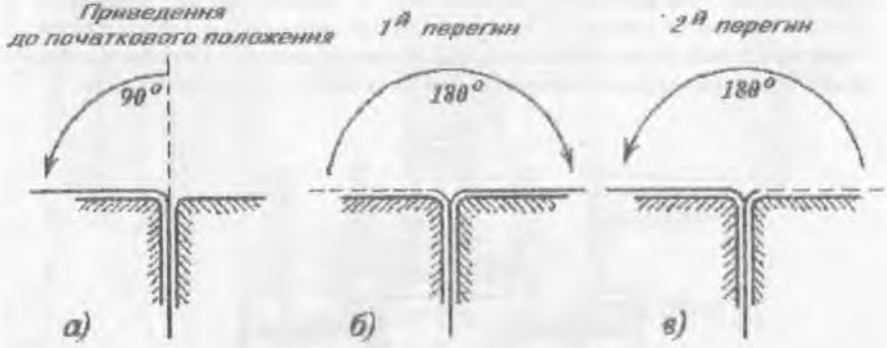



Рис.13. Проба дроту на перегин

Випробування проводиться на приладі, схема якого показана на рис.14. Зразок *3*, затиснутий в лещатах *1*, зазнає перегинів біля губок *6* за допомогою рукоятки *4*, що гойдається на осі *5*. Свободний кінець дроту проходить через отвір поводка *2*, укріпленого на рукоятці *4*. Прилад забезпечений механічним лічильником числа коливань рукоятки. На приладі можна випробовувати дріт діаметром до 7 мм і планку товщиною до 5 мм.




Рис.14. Схема приладу для перегинів дроту

Крім описаних проб дріт випробовують також на скручування, намотування на стержень і інш.

Такими ж випробуваннями визначають якість захисних покриттів на дроті і смузі (наприклад, гальванічних покриттів цинком, нікелем, хромом і інш.).

### 3.3. Випробування листів на витяг

Випробуванням на витяг визначають здатність листового металу до штампування. Випробування складається з продавлювання пуансоном *1* (рис.15) листового металу *2*, затиснутого між матрицею *3* і притискачем *4*. Характеристикой штампувальності (пластичності ) металу є глибина видавленої лунки, відповідна різкому зменшенню зусилля витягу при появі тріщини.

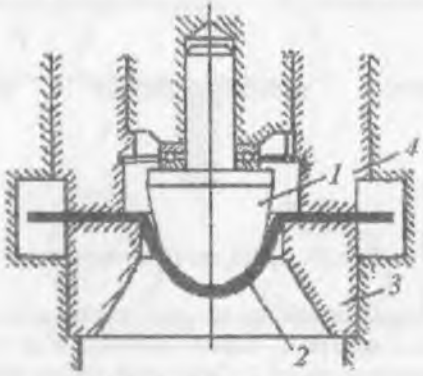



Рис.15. Схема витягу



У станину 2 приладу (рис.16) вмонтована гайка *9*, в якій обертається порожнистий затискний гвинт *11* з внутрішньою нарізкою. Всередині порожнистого затискного гвинта *11* обертається робочий гвинт *10*, в торець якого вставлений пуансон *12*. Кільце *3*, пов'язане з клямкою, служить для з'єднання або від'єднування порожнистого затискного гвинта *11* і робочого гвинта *10*. При замкненій клямці обидва гвинти сполучені і обертаються разом; якщо клямка віджата, то обертається тільки робочий гвинт *10*, від'єднаний від порожнистого затискного гвинта *11*. Обертання гвинта *10* здійснюється від маховика *5* через зубчасту передачу *4*.

Подовжне переміщення гвинтів *10* і *11* при їх обертанні вимірюють за допомогою кругової шкали з поділками (лімба) *6*, закріпленої на робочому гвинті *10*, і лінійки *7*, вміщеної в пазу движка.

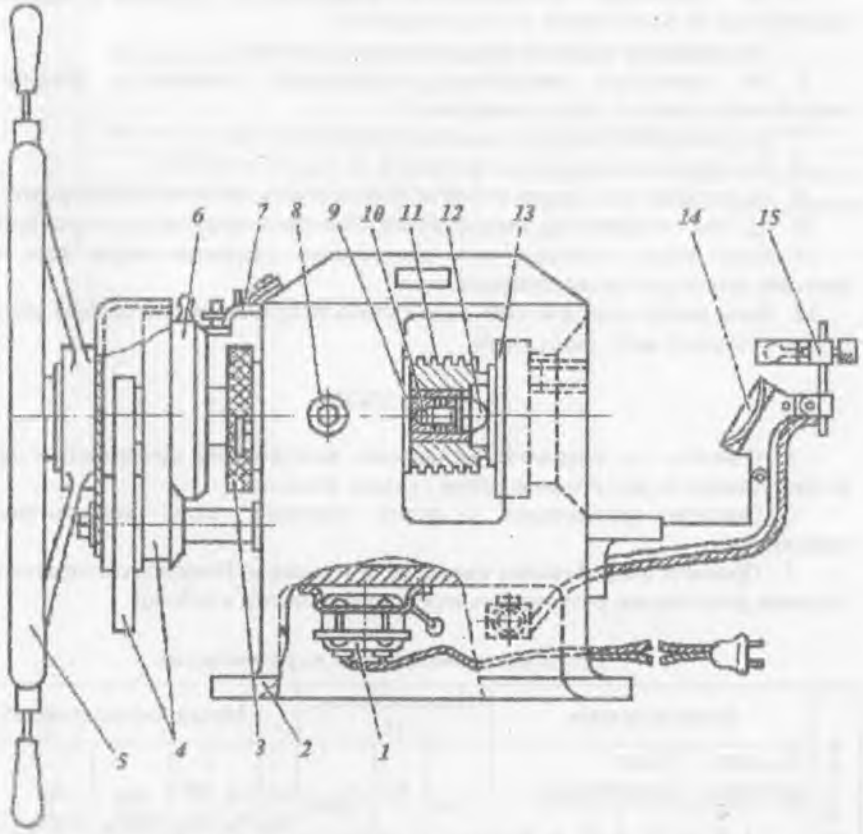



Рис.16. Прилад для технологічної проби на витяг листового металу

Матриця *13* має отвір, відповідний розміру пуансона, і є опорою для зразка під час випробування. Гвинт *8* служить для закріплення затискного гвинта *11* після того, як він підведений до зразка.

Для спостереження за процесом витягу служить дзеркало *14*. Для кращого спостереження поверхня зразка освітлюється лампочкою *15*, що живиться через понижувальний трансформатор *1*.

## 4. КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. У яких випадках проводяться механічні випробування?
2. У чому відмінність статичних і динамічних випробувань?
3. Які зразки застосовують при випробуваннях на розтягнення?
4. Які показники механічних властивостей визначають внаслідок випробувань на розтягнення, яка їх розмірність?
5. Які матеріали піддають випробуванням на вигин?
6. Які показники механічних властивостей визначають внаслідок випробувань на вигин, яка їх розмірність?
7. Як проводиться випробування на ударну в'язкість?
8. Які матеріали зазнають випробувань на ударну в'язкість?
9. Як визначається ударна в'язкість, її розмірність, що вона характеризує?
10. Що таке технологічні випробування, і що характеризують їх результати?
11. Яким видам технологічних випробувань піддають зварні шви на листовій котельній і суднокорпусній сталі?
12. Яким видам технологічних випробувань піддають стальні труби в котло- і суднобудуванні, дріт, тонкі листи.

## 5. ЗМІСТ ЗВІТУ

1. Описати, які показники механічних властивостей визначаються при випробуваннях на розтягнення, вигин і ударну в'язкість.
2. Описати призначення і схеми основних видів технологічних випробувань.
3. Провести випробування зразків на розтягнення. Намалювати отримані діаграми розтягнення, результати випробувань записати в таблиці:

*Результати випробувань на розтягнення*

| Зразок | Розміри зразків | | | | | Навантаження, Н | | | Механічні властивості | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | До випробувань | | Після випробувань | | | | | | | | | | | |
| | $l_0$ мм | $F_0$ мм$^2$ | $l_1$ мм | $l_т$ мм | $F_1$ мм$^2$ | $P_{пц}$ | $P_т$ | $P_{max}$ | $\delta$ % | $\delta_т$ % | $\Psi$ % | $\sigma_{пц}$ МПа | $\sigma_т$ МПа | $\sigma_в$ МПа |



4. Провести випробування на вигин і ударну в'язкість, результати записати в таблицю:

*Результати випробувань на вигин і ударну в'язкість*

| Зразок | Розміри зразків, мм | | | Випробування на вигин | | | Випробування на ударну в'язкість | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $l$ | $b$ | $h$ | $P_{max}$ Н | $\sigma_{виг}$ МПа | $f$ мм | $A$ Н см | a чи KCU КДж/м$^2$ |

5. Провести технологічні випробування дроту на перегин і металевого листа на витяг, результати записати в таблицю:

*Результати технологічних випробувань дроту на перегин і металевого листа на витяг*

| Зразок | Випробування дроту на перегин | | Випробування листа на витяг | |
|---|---|---|---|---|
| | Діаметр дроту, мм | Число перегинів до руйнування | Товщина листа, мм | Глибина лунки до появлення тріщини, мм |

Лабораторна робота №2

**Визначення твердості металів**

Мета роботи: Ознайомитися з методами визначення твердості металів. Придбати навики в самостійній роботі з приладами.

## 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Під твердістю матеріалу розуміється опір місцевої пластичної деформації при контактному прикладенні навантаження в поверхневому шарі. Легкість і швидкість визначення твердості забезпечили широке застосування її на практиці для характеристики різних матеріалів.

Для визначення твердості не треба виготовляти спеціальний зразок. Вона може визначатися на готовій деталі і при цьому деталь не псується.

Для визначення твердості існує велике число різних способів. Найчастіше твердість матеріалів визначається методом вдавлення в деталь тіла певної форми, званим індентором, який повинен бути набагато твердішим за деталь. У якості індевтора застосовують кульку, конус, піраміду і інш. Нижче розглядаються методи, що частіше за все застосовуються на практиці.

## 2. ВИЗНАЧЕННЯ ТВЕРДОСТІ ПО БРІНЕЛЮ

Метод полягає в тому, що стальна загартована кулька діаметром $D$ вдавлюється в деталь навантаженням $P$ і по величині діаметра набутого відбитка судять про твердість (рис.1).

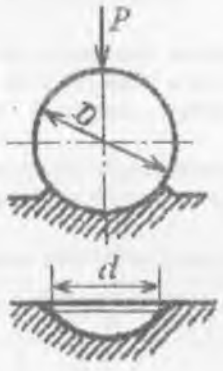



Рис.1. Схема визначення твердості за способом Брінеля



Число твердості по Брінелю визначається відношенням навантаження, діючого на кульку, до поверхні набутого відбитка

$$HB = \frac{P}{F},$$

де $HB$ - число твердості по Брінелю в МПа (кгс/мм$^2$);

$P$ - навантаження в Н (кгс);

$F$ - поверхня відбитка в мм$^2$, яка може бути виражена через діаметр кульки $D$ і діаметр відбитка $d$

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

У практиці визначення твердості по Брінелю цих обчислень не роблять, а користуються таблицею, складеною для установлених діаметрів кульок, відбитків і навантажень, по якій знаходять числа твердості.

Твердість по Брінелю визначається на пресах з механічним або гідравлічним навантаженням. Метод Брінеля застосовується для визначення твердості будь-яких металів і сплавів з твердістю не більше за 4500 МПа (450 кгс/мм$^2$).

Для правильного визначення твердості проводять вибір діаметра кульки і навантаження. Кульки різного діаметра (10; 5 і 2,5 мм) застосовують в залежності від товщини зразка або деталі, що випробовується. Навантаження і час витримки під навантаженням вибирають в залежності від матеріалу зразка і діаметра вибраної кульки у відповідності з табл. 1.

Всі ці відомості потім включаються в позначення твердості. Наприклад,

2000 НВ 10/30000/30,

де 2000 - число твердості, МПа;
10 - діаметр кульки, мм;
30000 - навантаження на кульку, Н;
30 - витримка, с.

Допускається позначення твердості без вказівки параметрів випробувань тобто 2000 НВ або НВ=2000 МПа.

Між межею міцності і числом твердості багатьох металів існує залежність виду $\sigma_B = K \cdot HB$, де коефіцієнт $K$ має наступні значення:

сталь 0,33-0,35;
сплави алюмінію 0,33-0,36;
сплави міді 0,4-0,5.

*Порядок вимірювання твердості по Брінелю*

У залежності від матеріалу і товщини зразка визначають навантаження і діаметр кульки, користуючись таблицею 1.

Таблиця 1

| Матеріал | Інтервал твердості НВ, МПа | Товщина зразка, мм | Діаметр кульки, мм | Навантаження, Н | Витримка під навантаженням, с |
|---|---|---|---|---|---|
| Чорні метали | 1400-4500 | більше за 6 | 10,0 | 30000 | 10 |
| | | від 6 до 3 | 5,0 | 7500 | 10 |
| | | менше за 3 | 2,5 | 1875 | 10 |
| | менше за 1400 | більше за 6 | 10,0 | 10000 | 10 |
| | | від 6 до 3 | 5,0 | 2500 | 10 |
| | | менше за 3 | 2,5 | 625 | 10 |
| Кольорові метали | більше за 1300 | більше за 6 | 10,0 | 30000 | 30 |
| | | від 6 до 3 | 5,0 | 7500 | 30 |
| | | менше за 3 | 2,5 | 1875 | 30 |
| | 350-1300 | більше за 6 | 10,0 | 10000 | 30 |
| | | від 6 до 3 | 5,0 | 2500 | 30 |
| | | менше за 3 | 2,5 | 625 | 30 |
| | 80-350 | більше за 6 | 10,0 | 2500 | 60 |
| | | від 6 до 3 | 5,0 | 625 | 60 |
| | | менше за 3 | 2,5 | 156 | 60 |

У шпинделі твердоміра Брінеля (рис.2) укріплюють держателя з кулькою *1*, а на важіль *2* підвішують необхідний набір гирь *3*. На кожній гирі вказане навантаження, яке вона забезпечує на кульку через важільну систему приладу.

Встановлюють зразок на столику *4* твердоміра шліфованою поверхнею вгору. Центр відбитка повинен знаходитися від центра сусіднього відбитка на відстані більш двох діаметрів відбитка кульки.

Доводять зразок до зіткнення з кулькою обертанням маховичка *5* предметного столика за годинниковою стрілкою до повного упора.

Включають електродвигун натисненням кнопки пускача мотора і стежать за ходом випробування. Навантаження на зразок, вимкнення мотора і звільнення зразка від навантаження проходить автоматично.

Опускають столик з випробуваним зразком обертанням маховичка проти годинникової стрілки.

Отримують на тому ж зразку ще два відбитки.



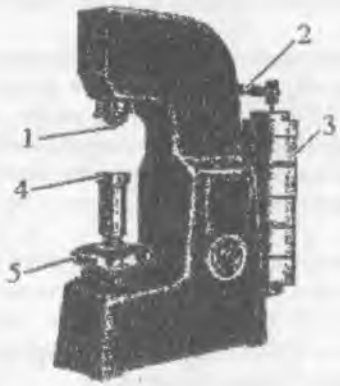



Рис.2. Твердомір Брінеля

Діаметри відбитків вимірюють за допомогою компаратора (мікроскопа) (рис.3,*а*) в двох взаємно перпендикулярних напрямах і беруть середнє арифметичне значення діаметра.

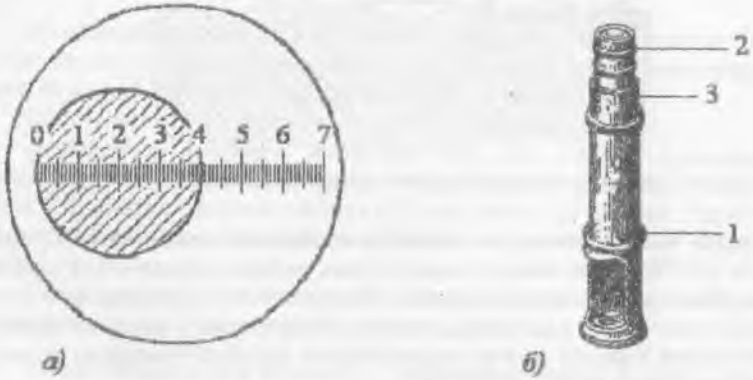



Рис.3. Схема вимірювання діаметра відбитка

Для вимірювання діаметра відбитка нижня частина компаратора встановлюється на отриманий відбиток, на який прямує денне світло. Обертанням нижнього кільця *1* проводять настройку на різкість межі відбитка, поворотом окуляра *2* настроюють шкалу на різкість і поворотом всього тубуса *3* повертають шкалу в положення, зручне для виміру відбитка (рис.3,*б*). Цифри на шкалі вказані в мм.

Знаючи діаметр відбитка, по таблиці 2 знаходять твердість.

## 3. ВИЗНАЧЕННЯ ТВЕРДОСТІ ПО РОКВЕЛЛУ

У ряді випадків визначити твердість по Брінелю не представляється можливим. Наприклад, не можна випробовувати загартовану сталь, що має твердість більше за 4500 МПа. По Брінелю не можна випробовувати зразки після хіміко-термічної обробки, тому що поверхневий захисний шар буде продавлюватися при навантаженні. Все це викликає необхідність використання інших приладів для визначення твердості. Одним з таких приладів є прилад Роквелла.

При випробуванні твердості по Роквеллу у зразок вдавлюється алмазний конус з кутом при вершині 120° (рис.4) або стальна загартована кулька діаметром 1/16 дюйма (1,59 мм) під дією двох послідовно прикладених навантажень – попередньої в 100 Н і остаточної (попередня + основна).

Сумарне навантаження Р може складати:
600 Н (шкала А), 1000 Н (шкала В) або 1500 Н (шкала С).

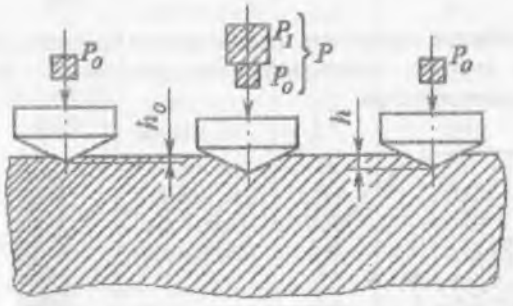



Рис.4. Схема визначення твердості вдавленням алмазного конуса

Кулька застосовується для визначення твердості менше 20 HRC, але не більше за 100 HRB. Для виміру більш твердих металів користуються алмазним конусом. Відповідно до цього твердість відпалених або нормалізованих сталей та чавунів визначається вдавленням кульки, а загартованих - алмазного конуса.

Алмазним конусом можна випробовувати матеріал товщиною не менше за 0,4 мм, а кулькою не менше за 2 мм.

Про твердість металу судять по різниці глибин вдавлення конуса або кульки під дією двох послідовно прикладених навантажень. Ця різниця характеризує твердість випробуваного металу по Роквеллу.

Для чисельної характеристики твердості прилад Роквелла забезпечений індикатором, циферблат якого показаний на рис.5. Заглиблення наконечника на 0,002 мм відповідає переміщенню стрілки на один розподіл. Якщо стрілка зробить один оборот від початкового положення, то конус або кулька заглибиться на 0,2 мм. Отже, чим більше поглиблення, тим твердість менше. Тому градуювання шкали зворотне.






Рис.5. Циферблат індикатора приладу Роквелла

На циферблаті є дві шкали: червона (шкала В) і чорна (шкала С). Якщо наконечником є кулька, відлік роблять по червоній шкалі індикатора, якщо алмазний конус - по чорній (шкала А співпадає з шкалою С).

Шкали зміщені одна відносно одної на 30 ділень.

Необхідність зміщення викликана тим, що глибина вдавлення при стандартних навантаженнях на кульку часто виходить більшою 0,2 мм, тобто більше 100 поділок і досягає глибини 0,26 мм, тобто 130 поділок. Нарівні з цим при випробуванні кулькою глибина відбитка не буває менше 0,06 мм, тобто 30 поділок.

Таким чином, зсув шкали на 30 поділок дозволяє отримати твердість по Роквеллу по шкалі "В" в межах 100 одиниць.

Число твердості по Роквеллу - відвернене число. У його позначенні вказують число твердості, потім HR і шкалу (А, В або С). Наприклад, 80 HRB означає, що твердість 80 одиниць по Роквеллу визначена вдавленням кульки (шкала В).

*Порядок вимірювання твердості по Роквеллу*

Визначають необхідне навантаження і вигляд наконечника в залежності від матеріалу по табл.2 і встановлюють необхідні гирі і наконечник.

Таблиця 2

| Матеріал зразка | шкала | наконечник | Навантаження, Н | Межі вимірювання в одиницях твердості по Роквеллу |
|---|---|---|---|---|
| Незагартовані сталь, чавун | B | Стальна кулька | 1000 | 25-100 HRB |
| Загартовані сталь, чавун | C | Алмазний конус | 1500 | 20-67 HRB |
| Металокерамічні тверді сплави | A | Алмазний конус | 600 | 70-85 HRB |

Встановлюють зразок на столику *1* приладу (рис.6).

Доводять зразок до зіткнення з наконечником *2* за допомогою маховика *3*.

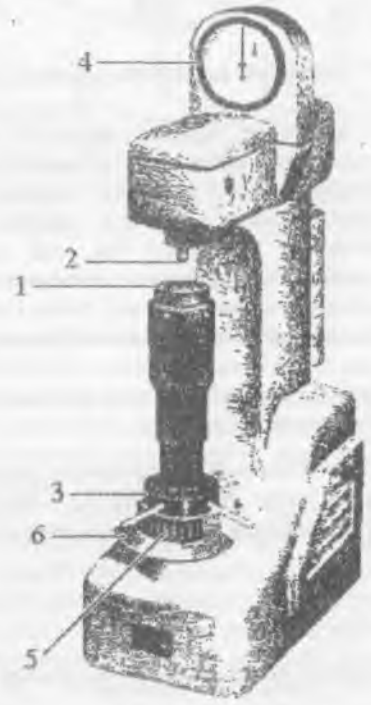



Рис.6. Прилад Роквелла



Створюють попереднє навантаження в 100 Н, для чого обертанням маховика продовжують підйом столика доти, поки мала стрілка індикатора *4* не виявиться проти червоної точки на шкалі, а велика не встане приблизно у вертикальне положення.

Обертанням кільця *5* повертають циферблат індикатора доти, поки нуль чорної шкали (або розподіл 30 червоної шкали) не співпаде з великою стрілкою.

Вмикають основне навантаження натисненням педалі *6* біля маховика підйому стола. Зняття навантаження відбуваються автоматично.

Записують число твердості по Роквеллу, тобто число, на яке вказує на шкалі циферблата велика стрілка. Якщо наконечником є кулька, відлік роблять по червоній шкалі індикатора, якщо алмазний конус - по чорній.

Розвантажують зразок повністю, для чого обертають маховик проти годинникової стрілки, при цьому столик приладу із зразком опускається.

Випробування повторюють на одному зразку 3 рази. За число твердості приймають середнє.

Отриману твердість при необхідності переводять в одиниці твердості по Брінелю або Віккерсу. Ці шкали вважаються універсальними, оскільки охоплюють всі можливі значення твердості металів (див. табл. 3, стор. 30).

## 4. КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Чи треба для визначення твердості матеріалу виготовляти спеціальні зразки для випробувань?
2. Як називається тіло, що вдавлюється у випробуваний матеріал?
3. Яке тіло вдавлюється в матеріал при визначенні твердості по Брінелю, і від чого залежать його розміри?
4. По якій формулі розраховується твердість по Брінелю, чи завжди вона використовується?
5. Розмірність і позначення твердості по Брінелю.
6. Яка залежність міцності металів від твердості по Брінелю?
7. Від чого залежить навантаження на кульку при визначенні твердості?
8. Які існують межі застосування методу Брінеля?
9. У яких випадках визначають твердість на приладі Роквелла?
10. Чи має розмірність твердість по Роквеллу?
11. Як означається твердість, визначена на приладі Роквела по шкалах А, В і С?
12. Що вдавлюється у випробуваний матеріал при визначенні твердості по Роквеллу по шкалах А, В і С?

## 5. ЗМІСТ ЗВІТУ

1. Описати, що таке твердість, як вона визначається на приладах Брінеля і Роквела і її позначення.

2. Визначити твердість зразків на приладі Брінеля і результати занести в таблицю

| Матеріал зразка | Товщина зразка | Діаметр кульки, мм | Навантаження, Н | Діаметри відбитків, мм | | | | Твердість НВ, МПа |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | $d_1$ | $d_2$ | $d_3$ | $d_{ср}$ | |

3. Визначити на приладі Роквелла твердість зразків сталей з різним змістом вуглецю і результати записати в таблицю

| Номер зразка | Вміст вуглецю | Наконечник | шкала | Навантаження, Н | HRB | | | | HB, МПа |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | Середнє | |

4. Побудувати графік залежності твердості сталі по Брінелю від вмісту вуглецю.



# 6. ВИЗНАЧЕННЯ ТВЕРДОСТІ ВДАВЛЮВАННЯМ АЛМАЗНОЇ ПІРАМІДИ

Мета роботи: ознайомитися з методами визначення твердості металів вдавлюванням алмазної піраміди. Набути навики самостійної роботи з приладами Віккерса і мікротвердоміром.

## Загальні відомості

Алмазна піраміда з квадратною основою, що застосовується для визначення твердості по Віккерсу і мікротвердості, має кут при вершині 136° (рис.7).

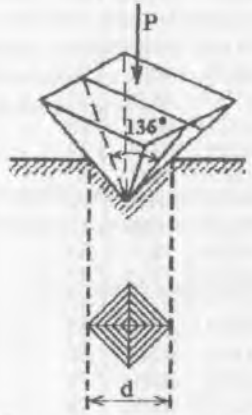



Рис.7. Схема випробування на твердість алмазною пірамідою

Твердість в обох випадках визначається по залежності

$$H = \frac{P}{F} = \frac{2P\sin\frac{\alpha}{2}}{d^2} = 1{,}854\frac{P}{d^2}\ ,\ \text{МПа},$$

де $P$ - навантаження на піраміду, Н;

$F$ - площа поверхні відбитка, м $^2$;

$\alpha = 136°$ – кут між протилежними гранями піраміди;

$d$ – середнє арифметичне довжини двох діагоналей відбитка, мм.

Числа твердості по Віккерсу HV і по Брінелю НВ до твердості 3000 практично співпадають. При більш високих значеннях твердість по Віккерсу виходить більшою твердості по Брінелю (табл.3). Разом з тим вимірювання пірамідою дають більш точні значення для матеріалів з високою твердістю, чим вимірювання кулькою по Брінелю і Роквеллу або алмазним конусом по Роквеллу. Мікротвердість $H_м$ у всіх випадках більше твердості по Брінелю.

Таблиця 3

***Числа твердості при випробуванні різними методами***

| По Роквеллу | | | По Брінелю 10/30000 | | По Віккерсу | По Роквеллу | | | По Брінелю 10/30000 | | По Віккерсу |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| HRB | HRC | HRA | Діаметр відбитка мм | НВ, МПа | HV, МПа | HRB | HRC | HRA | Діаметр відбитка мм | НВ, МПа | HV, МПа |
| - | - | - | 2,00 | 9460 | - | 98 | 22 | 62 | 4,00 | 2290 | 2260 |
| - | - | - | 2,05 | 8980 | - | 97 | 21 | 61 | 4,05 | 2230 | 2210 |
| - | - | - | 2,10 | 8570 | - | 97 | 20 | 61 | 4,10 | 2170 | 2170 |
| - | - | - | 2,15 | 8170 | - | 96 | 19 | 60 | 4,15 | 2120 | 2130 |
| - | 72 | 89 | 2,20 | 7820 | 12200 | 95 | 18 | 60 | 4,20 | 2070 | 2090 |
| - | 69 | 87 | 2,25 | 7440 | 11140 | 94 | - | 59 | 4,25 | 2010 | 2010 |
| - | 67 | 85 | 2,30 | 7130 | 10210 | 93 | - | 58 | 4,30 | 1970 | 1970 |
| - | 65 | 84 | 2,35 | 6830 | 9400 | 92 | - | 58 | 4,35 | 1920 | 1900 |
| - | 63 | 83 | 2,40 | 6520 | 8670 | 91 | - | 57 | 4,40 | 1870 | 1860 |
| - | 61 | 82 | 2,45 | 6270 | 8030 | 89 | - | 56 | 4,45 | 1830 | 1800 |
| - | 59 | 81 | 2,50 | 6000 | 7460 | 88 | - | 56 | 4,50 | 1790 | 1770 |
| - | 58 | 80 | 2,55 | 5780 | 6940 | 87 | - | 55 | 4,55 | 1740 | 1740 |
| - | 56 | 79 | 2,60 | 5550 | 6490 | 86 | - | 55 | 4,60 | 1700 | 1710 |
| - | 54 | 78 | 2,65 | 5320 | 6060 | 85 | - | 54 | 4,65 | 1670 | 1650 |
| - | 52 | 77 | 2,70 | 5120 | 5870 | 84 | - | 53 | 4,70 | 1630 | 1620 |
| - | 51 | 76 | 2,75 | 4950 | 5510 | 83 | - | 53 | 4,75 | 1590 | 1590 |
| - | 49 | 76 | 2,80 | 4770 | 5340 | 82 | - | 52 | 4,80 | 1560 | 1540 |
| - | 48 | 75 | 2,85 | 4600 | 5020 | 81 | - | 52 | 4,85 | 1520 | 1520 |
| - | 47 | 74 | 2,90 | 4440 | 4740 | 80 | - | 51 | 4,90 | 1490 | 1490 |
| - | 45 | 73 | 2,95 | 4290 | 4600 | 78 | - | 50 | 4,95 | 1460 | 1470 |
| - | 44 | 73 | 3,00 | 4150 | 4350 | 76 | - | 50 | 5,00 | 1430 | 1440 |
| - | 43 | 72 | 3,05 | 4010 | 4230 | 76 | - | - | 5,05 | 1400 | - |
| - | 41 | 71 | 3,10 | 3880 | 4010 | 75 | - | - | 5,10 | 1370 | - |
| - | 40 | 71 | 3,15 | 3750 | 3900 | 74 | - | - | 5,15 | 1340 | - |
| - | 39 | 70 | 3,20 | 3630 | 3800 | 72 | - | - | 5,20 | 1310 | - |
| - | 38 | 69 | 3,25 | 3520 | 3610 | 71 | - | - | 5,25 | 1280 | - |
| - | 37 | 69 | 3,30 | 3410 | 3440 | 69 | - | - | 5,30 | 1260 | - |
| - | 36 | 68 | 3,35 | 3310 | 3350 | 68 | - | - | 5,35 | 1230 | - |
| - | 35 | 68 | 3,40 | 3210 | 3200 | 67 | - | - | 5,40 | 1210 | - |
| - | 34 | 67 | 3,45 | 3110 | 3120 | 66 | - | - | 5,45 | 1180 | - |
| - | 33 | 67 | 3,50 | 3020 | 3050 | 65 | - | - | 5,50 | 1160 | - |
| - | 31 | 66 | 3,55 | 2930 | 2910 | 64 | - | - | 5,55 | 1140 | - |
| - | 30 | 66 | 3,60 | 2850 | 2850 | 62 | - | - | 5,60 | 1110 | - |
| - | 29 | 65 | 3,65 | 2770 | 2780 | 61 | - | - | 5,65 | 1090 | - |
| - | 28 | 65 | 3,70 | 2690 | 2720 | 59 | - | - | 5,70 | 1070 | - |
| - | 27 | 64 | 3,75 | 2620 | 2610 | 58 | - | - | 5,75 | 1050 | - |
| - | 26 | 64 | 3,80 | 2550 | 2550 | 57 | - | - | 5,80 | 1030 | - |
| - | 25 | 63 | 3,85 | 2480 | 2500 | 56 | - | - | 5,85 | 1010 | - |
| 100 | 24 | 63 | 3,90 | 2410 | 2400 | 54 | - | - | 5,90 | 990 | - |
| 99 | 23 | 62 | 3,95 | 2350 | 2350 | 53 | - | - | 5,95 | 970 | - |



## 7. ВИЗНАЧЕННЯ ТВЕРДОСТІ ПО ВІККЕРСУ

При випробуваннях застосовують одне з наступних навантажень на алмазну піраміду: 50, 100, 200, 300, 500, 1000 і 1200 Н. Це дозволяє визначати твердість як м'яких, так і твердих металів і сплавів. Крім того, застосування малих навантажень 50 і 100 Н дає можливість визначати твердість тонких деталей (товщиною до 0,1мм і тонких поверхневих шарів на деталях (цементованих, азотованих і інш.).

Підлягаюча випробуванню поверхня повинна бути гладкою і чистою (бажано шліфованою). Не можна випробовувати сплави з великою структурною неоднорідністю (наприклад, сірий чавун), оскільки можливе сколювання алмаза.

Твердість визначають в наступному порядку. У залежності від передбачуваної твердості і товщини деталі (або зміцненого шара на деталі) по таблиці 4 визначають величину необхідного для випробування навантаження. Вибране таким чином навантаження забезпечує глибину відбитка не більше за 0,1 товщини шара металу, що вимірюється.

Таблиця 4

***Навантаження (Н) на піраміду в залежності від товщини і твердості деталі***

| Товщина шара металу, мм | Передбачувана твердість, МПа | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 200-500 | 500-1000 | 1000-3000 | Більше за 3000 |
| До 0,5 | - | - | - | 50 і 100 |
| 0,5-1,0 | - | - | 50 і 100 | 100 і 200 |
| 1,0-2,0 | 50 і 100 | 50 і 100 | 100 і 200 | 100 і 200 |
| 2,0-4,0 | 100 і 200 | 200 і 500 | 200 і 500 | 200 і 500 |
| Більше за 4,0 | 200 і 500 | 300 і 500 | 500 і 1000 | 500, 1000, 1200 |

Відповідно до вибраного навантаження встановлюють набір гирь *4* (рис.8) на підвіску приладу. На гирях вказане навантаження, яке вони забезпечують на піраміду через важільну систему приладу. Потім рукоятку *7* опускають вниз до упору, здійснюючи цим взвод приводу механізму навантаження.

Повертають наліво до упору мікроскоп *3*.

Встановлюють на столик I випробувану деталь і обертанням маховика *6* підіймають стіл до упору в кожух алмазної піраміди, укріпленої на нижньому кінці штока *2*.

Натискають пускову педаль *5*. В момент додатку навантаження запалюється сигнальна лампочка, розташована над штоком *2*. После того як лампочка згасне, опускають стіл на 15 - 20 мм.

Повертають в крайнє праве положення головку з мікроскопом *3* і штоком з алмазною пірамідою *2*. Дивлячись в окуляр мікроскопа *3*, підіймають стіл до отримання різкого зображення відбитка.

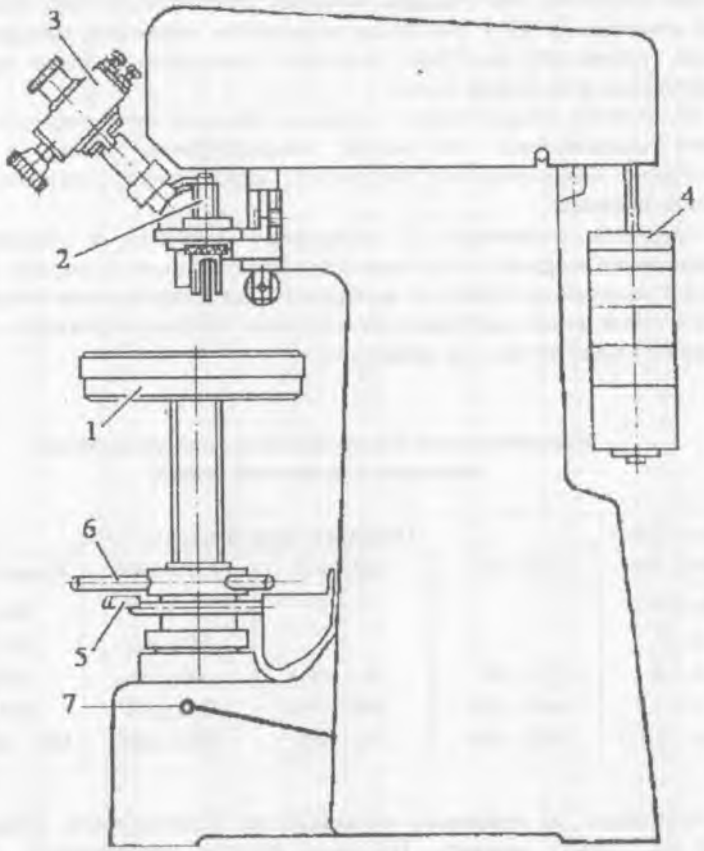



Рис.8. Прилад для вимірювання твердості по Віккерсу:
*1* - столик для установки зразка, *2* - шток з алмазною пірамідою, *3* - мікроскоп, *4* - вантаж, *5* - педаль пускового механізму, *6* - маховик підйому стола, *7* - рукоятка взводу механізму навантаження

За допомогою мікрометричного окуляра вимірюють діагональ відбитка, потім повертають окуляр мікроскопа на 90° і вимірюють іншу діагональ. За результат вимірювання приймають середнє значення.



Загальний вигляд мікрометричного окуляра приведений на рис.9. В оптичній системі окуляра є шкала А (рис.10,*а*), дві суцільних і одна штрихова лінія, яка використовується тільки в масових вимірюваннях.

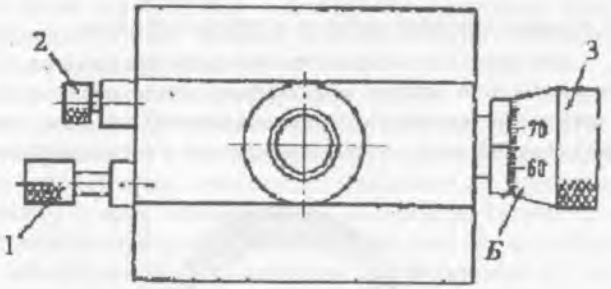



Рис.9. Мікрометричний окуляр мікроскопа

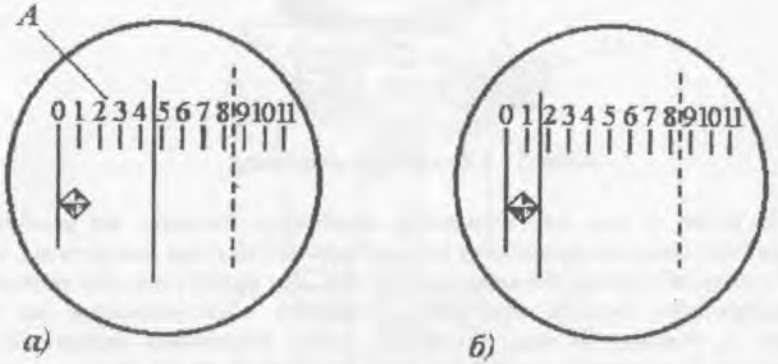



Рис.10. Схема вимірювання діагоналі відбитка

Для вимірювання діагоналі відбитка обертанням гвинта *1* (рис.9) підводять ліву суцільну лінію до лівого кута відбитка (рис.10, *а*), а обертанням мікрометричного гвинта *3* (рис.9) - праву суцільну лінію до правого кута відбитка (рис.10, *б*) і читають результат - довжину діагоналі - по шкалі окуляра А (рис.10) і лімба Б мікрометричного гвинта *3* (рис.9). При цьому довжина діагоналі виражається тризначним числом, перша цифра якого береться рівною меншій з двох цифр шкали А, між якими знаходиться права суцільна лінія, а дві останніх цифри читаються на шкалі Б лімба проти горизонтальної межі зліва від нього. Наприклад, довжина діагоналі відбитка на рис.9 і 10, *б* дорівнює 165 поділкам.

Для розрахунку твердості в приведену вище формулу необхідно підставити довжину діагоналі в міліметрах.

$$d = N\,Ц_{ок}\ , \text{мм},$$

де $N$ – довжина діагоналі відбитка в поділках окуляра;

$Ц_{ок}$ – ціна розподілу мікрометричного окуляра, мм/под.

Для визначення ціни ділення мікрометричного окуляра використовується об'єктивний мікрометр (скорочено об'єкт-мікрометр) у вигляді пластини, на якій укріплений скляний диск з шкалою довжиною 1 мм з поділками через 0,01 мм (рис.11).



Рис.11. Об'єктивний мікрометр

У зв'язку з тим, що збільшення мікроскопа залежить від комбінації окуляра і об'єктиву, ціна розподілу мікрометричного окуляра залежить від того, в парі з яким об'єктивом він використовується. Для визначення ціни розподілу мікрометричного окуляра необхідно встановити об'єкт-мікрометр на стіл приладу і, підіймаючи його, отримати різке зображення шкали об'єкт-мікрометра. Сумістити нульові розподілки шкал об'єкт-мікрометра і окуляра і підрахувати, в яке число ділень мікрометричного окуляра укладається вся шкала об'єкт-мікрометра або її частина, якщо вона повністю не укладається в полі зору мікроскопа. Визначити ціну розподілу шкали мікрометричного окуляра по формулі

$$Ц_{ОК} = Ц_{ОБ}\frac{N_{ОБ}}{N_{ОК}}\ ,$$

де $Ц_{ОБ} = 0{,}01$ *мм* - ціна розподілу шкали об'єкт-мікрометра;

$N_{ОБ}$ - число суміщених поділок об'єкт-мікрометра;

$N_{ОК}$ - число суміщених поділок окуляра.



## 8. ВИЗНАЧЕННЯ МІКРОТВЕРДОСТІ

Відмітною особливістю методу є застосування малих навантажень на піраміду - від 0,02 до 2,0 Н. Тому основною областю використання методу є визначення твердості окремих структурних складаючих мікроструктури сплавів, а також таких зразків і деталей, які не можуть бути перевірені на приладі Віккерса, а саме дрібних деталей приладів, тонких напівфабрикатів (стрічок, фольги, дроту) і інш.

Основа *1* (рис.12) приладу має стойку *7*, по якій гайкою *6* при ослабленому гвинті *10* можна переміщувати кронштейн *9* з тубусом *16* мікроскопа. Кронштейн *9* має направляючі, по яким можна переміщувати тубус *16*. Грубе переміщення тубуса *16* здійснюється обертанням гвинта *12* (макроподача), а мале переміщення - обертанням гвинта *11* (мікроподача). Тубус має похилу трубку з окуляром *14* і об'єктив *20*. До тубусу прикріплений механізм навантаження *6* з алмазним наконечником *4*, що являє собою чотиригранну алмазну піраміду з кутом при вершині 136°.

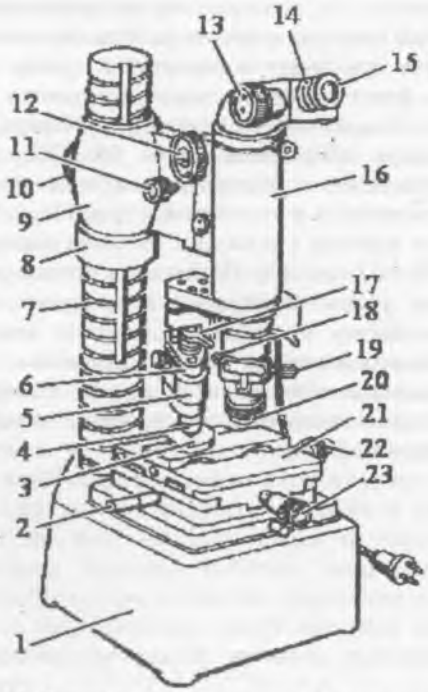



Рис.12. Прилад для визначення мікротвердості

На основі *1* розташований предметний столик *21*, верхню частину якого за допомогою гвинтів *22* і *23* можна переміщувати в двох взаємно перпендикулярних напрямах (координатне переміщення) і рукояткою *2* повертати навколо осі приблизно на 180° від одного упору до іншого (півкругове переміщення). На столик *21* встановлюють зразок *3*. Центрування приладу здійснюється гвинтами *18*, *19*.

Для навантаження застосовують спеціальні вантажі в формі шайб з вирізом масою 2, 5, 10, 20, 50, 100 і 200 г. При випробуванні один з вантажів (шайба *5*) встановлюють вирізом на шток навантажуючого механізму. Вдавлювання алмазної піраміди *4* в зразок *3* під дією вантажу, що знаходиться на штоці, здійснюється при повороті рукоятки *17* приблизно на півобороту. Діагональ набутого відбитка вимірюють мікрометричним окуляром *14*.

Підготовка зразків для випробувань полягає в наступному. Зразки стрічки, фольги і дроту випробовують без підготовки. При визначенні твердості окремих структурних складових поверхня зразка підготовлюється так само, як для металографічного дослідження, а саме, шліфується і полірується, тобто приготовляється мікрошліф.

Мікротвердість визначають в наступному порядку. Зразок укріплюють (притискними планками або пластиліном) на предметному столику *21* під об'єктивом *20* так, щоб площина мікрошліфа була паралельна площині столика. Столик повинен бути при цьому повернутий в крайнє праве положення до упору. Наводять на фокус поверхню зразка обертанням рукояток *12* і *11* до отримання різкого зображення мікроструктури. Наводять на різкість нитки окулярного мікрометра обертанням лінзи *15*. Обертанням барабана *13* переміщують перехрестя ниток окуляра в центр поля зору так, щоб подвійний штрих знаходився на цифрі 4 шкали окуляра (рис.13, *а*). Вибирають на зразку місце для нанесення відбитка і підводять його під перехрестя переміщенням столика гвинтами *22* і *23* (рис.12). Повертають столик рукояткою *2* в крайнє ліве положення до упору. Вибирають і вміщують вантаж *5* на шток навантажуючого механізму *6*. Роблять вдавлення алмазною пірамідою *4*, повільно і рівномірно повертаючи на себе рукоятку *17*, яку повертають в початкове положення після витримки *5* секунд. Повертають рукояткою *2* столик в крайнє праве положення до упору і, спостерігаючи в окуляр, визначають положення відбитка.



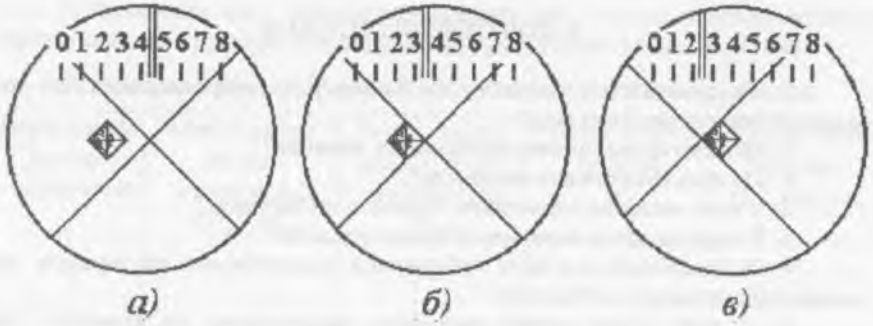



Рис.13. Схема вимірювання довжини діагоналі відбитка мікрометричним окуляром:
*а* – підведення ниток (справа наліво) до правого кута відбитка;
*б* – положення ниток у вершині правого кута відбитка для першого відліку (нитки підведені справа);
*в* – положення ниток у вершині лівого кута відбитка для другого відліку (нитки підведені також справа)

Якщо відбиток не співпадає з центром перехрестя (або не попав у вибране зерно мікроструктури), то прилад необхідно відцентрувати. Для цього гвинтами *18* і *19* відбиток підводять до центра перехрестя. Потім вибирають інше місце для відбитка, пересуваючи столик гвинтами *22* і *23*, і наносять відбиток, як було описано вище.

Якщо відбиток вийшов дуже великим або дуже маленьким, то, змінюючи навантаження на піраміду, домагаються отримання відбитка прийнятних розмірів.

Вимірювання діагоналі відбитка проводять по схемі, показаній на рис.13,*б* і 13,*в*. Відлік свідчення шкали і лімба мікрометричного окуляра і визначення ціни його розподілу проводиться так само, як на приладі Віккерса. Різниця полягає тільки в наявності перехрестя і подвійного штриха на мікрометричному окулярі мікротвердоміра. При повороті барабана *13* (рис.12) з лімбом на один оборот центр перехрестя і подвійний штрих переміщається на одну поділку. Крім того, оскільки шкала окулярного мікрометра не зміщається, то довжина діагоналі відбитка визначається різницею двох тризначних чисел, фіксуючих два положення перехрестя, як на рис.13, *б* і 13, *в*. Повертають окуляр на 90°, вимірюють другу діагональ відбитка. За довжину діагоналі відбитка приймають середнє значення, помножене на ціну поділки окулярного мікрометра.

## 9. КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Як означається твердість по Віккерсу і мікротвердість, по якій формулі вони розраховуються?
2. Як визначається розмір відбитка від піраміди?
3. Що таке об'єктивний мікрометр?
4. У яких випадках визначають твердість по Віккерсу?
5. У яких випадках визначають мікротвердість?
6. У залежності від чого вибирається навантаження на піраміду при визначенні твердості по Віккерсу?
7. У яких межах можна змінювати навантаження на піраміду при визначенні твердості по Віккерсу?
8. У яких межах можна змінювати навантаження на піраміду при визначенні мікротвердості?

## 10. ЗМІСТ ЗВІТУ

1. Описати, коли і як визначається твердість по Віккерсу і мікротвердість.
2. Визначити ціну розподілу мікрометричного окуляра і твердість зразків на приладі Віккерса і результати занести в таблиці:

*Визначення ціни поділки мікрометричного окуляра твердоміра Віккерса*

| Порядковий номер вимірювання | Ціна поділки об'єкт-мікрометра, $Ц_{об}$, мм | Число поділок шкали об'єкт-мікрометра, $N_{об}$ | Число поділок окуляра, $N_{ок}$ | Ціна поділки окуляра $Ц_{ок}$, мм/под. |
|---|---|---|---|---|
| 1 | | | | |
| 2 | | | | |
| 3 | | | | |
| Середнє значення ціни поділки окуляра $Ц_{ок}$ = мм/под. | | | | |

*Визначення твердості зразків по Віккерсу*

| Матеріал зразка | Навантаження на піраміду, Н | Номер відбитка | Довжина діагоналі, под. | | | Довжина діагоналі, d, мм | Твердість по відбитку, HV, МПа | Середня твердість зразка, $HV_{ср}$, МПа |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $N_1$ | $N_2$ | $N_{ср}$ | | | |



3. Визначити ціну поділки мікрометричного окуляра і мікротвердість структурних складових на мікротвердомірі і результати занести в таблиці:

*Визначення ціни поділки мікрометричного окуляра мікротвердоміра*

| Порядковий номер вимірювання | Ціна поділки об'єкт-мікрометра, $Ц_{об}$, мм | Число поділок шкали об'єкт-мікрометра, $N_{об}$ | Число поділок окуляра, $N_{ок}$ | Ціна поділки окуляра $Ц_{ок}$, мм/под. |
|---|---|---|---|---|
| 1 | | | | |
| 2 | | | | |
| 3 | | | | |
| Середнє значення ціни поділки окуляра $Ц_{ок}$ = мм/под. | | | | |

*Визначення мікротвердості структурних складаючих зразків на мікротвердомірі*

| Матеріал зразка | Вид структурної складової | Навантаження на піраміду, Н | Довжина діагоналі, под. | | | Довжина діагоналі, d, мм | Мікротвердість, $H_м$, МПа |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $N_1$ | $N_2$ | $N_{ср}$ | | |

4. Намалювати мікроструктуру зразків, стрілками указати вид структурних складових і їх мікротвердість.

# Лабораторна робота №3
# Макро- і мікроструктурний аналіз

Мета роботи: Вивчення методів дослідження структури сплавів.

## 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Сукупність методів дослідження структури сплавів звичайно називають металографічним аналізом. Металографічний аналіз розділяють на:

- макроаналіз, в процесі якого будова (макроструктура) металів вивчається неозброєним оком або при малих (до 30-кратних) збільшеннях;
- мікроаналіз, в процесі якого вивчається більш мілка будова (мікроструктура) металів при збільшеннях до 1500 разів, що отримуються на оптичних металографічних мікроскопах, а також при збільшеннях до 30000 і більш на електронних мікроскопах.

Структура металів вивчається в наступних випадках:

а) для контролю якості готових деталей або заготовок;

б) для визначення причин аварійного руйнування деталей;

в) як інструмент в наукових дослідженнях.

## 2. МАКРОСТРУКТУРНИЙ АНАЛІЗ

Метою макроструктурного аналізу є виявлення макроскопічної неоднорідності сплаву і встановлення її природи.

Макроструктурний аналіз дозволяє дослідити будову сплаву неозброєним оком (тобто звичайним оглядом), або при невеликих збільшеннях до 30 разів за допомогою лупи або бінокулярного мікроскопа. Це дає можливість одночасно спостерігати велику поверхню і отримати уявлення про загальну будову металу і про наявність в ньому тих або інших вад.

Макроскопічний аналіз може бути остаточним у разі наявності явних дефектів. Однак частіше за все він є попереднім дослідженням, що дозволяє правильно вибрати напрям подальших досліджень.

За допомогою макроаналіза можна визначити:

1. Порушення суцільності металу (усадочну рихлість, газові раковини, тріщини і т.д.).

2. Хімічну неоднорідність сплаву (ліквацію).

3. Неоднорідність кристалічної будови сплавів, що ллються (злитків, виливків).

4. Неоднорідність кристалічної будови, викликану різними видами обробки (обробки тиском, термічної або хіміко-термічної обробки).

Макроаналіз проводиться двома етапами:

1. Вивчення зовнішнього вигляду і зламу деталі.

2. Вивчення макрошліфів.



Вивчення зламу і зовнішнього вигляду деталі дозволяє виявити різні дефекти металу - пустоти, тріщини, неметалічні включення, газові і усадочні раковини, а також характер деформації деталі в процесі експлуатації

### 2.1. Підготовка і вивчення макрошліфів

Підготовка макрошліфа полягає у вирізуванні зразка з інтересуючої ділянки виробу з подальшим шліфуванням однієї або декількох його площин.

Шліфування проводиться на спеціальному шліфувальному металографічному папері або, у разі великих розмірів макрошліфа, на шліфувальних станках до 7-8 класу шорсткості поверхні.

Макрошліф, виконаний в поперечному перетині деталі, іноді називають "т е м п л е т".

Реактиви і способи виявлення макроструктури сплавів

Для виявлення структури сплаву макрошліф піддають травленню спеціальними реактивами, склад яких підбирається в залежності від хімічного складу сплаву і мети макроаналіза. Розрізнюють реактиви поверхневого і глибокого травлення. Реактиви поверхневого травлення взаємодіють з тонким поверхневим шаром і виявляють тому тільки поверхневу структуру і дефекти сплаву. Як такі реактиви використовують звичайно слабі розчини кислот, солей і інших з'єднань. Час травлення не більше 5 хвилин.

Як реактиви глибокого травлення застосовують концентровані розчини кислот. Час травлення великий - 1-2 години. Для прискорення реакції часто проводиться травлення в нагрітому до 50-100°С реактиві. Такі реактиви взаємодіють не тільки з поверхнею шліфа, а проникають також углиб до 3-5 мм за рахунок різних дефектів.

За допомогою реактивів обох типів виявляються не тільки великі, але і дрібні, невидимі на нетравленому шліфі дефекти, що порушують суцільність металу - раковини, тріщини і інш.

### 2.2. Визначення ліквації сірки

Сірка в сталях є шкідливою домішкою, і кількість її обмежується 0,05%.

Однак сірка володіє підвищеною схильністю до ліквації. У результаті може виявитися, що вміст її в окремих зонах деталі буде значно більшим, ніж визначений в середньому результатом хімічного аналізу. Тут на допомогу приходить макроаналіз, який дає якісну картину розподілу сірки в металі.

Визначення ліквації сірки (проба по Бауману) полягає в наступному. Лист засвіченого фотопаніра витримують 3-5 хвилин в 10% розчині сірчаної кислоти, потім злегка просушують фільтрувальним папером для видалення надлишків розчину і укладають на м'яку основу, наприклад, на газету або зошит, емульсійним шаром вгору. До емульсії притискують макрошліф і витримують 3-5 хвил.

У сталі сірка знаходиться у вигляді сульфідів заліза і марганця. Вони реагують з сірчаною кислотою по реакції:

$$FeS + H_2SO_4 \rightarrow FeSO_4 + H_2S$$
$$MnS + H_2SO_4 \rightarrow MnSO_4 + H_2S$$

Сірководень реагує з бромистим сріблом, що входить до складу емульсії фотопаніра

$$AgBr + H_2S \rightarrow HBr + Ag_2S$$

Сірчасте срібло має коричневий колір, і тому дільниці фотопаніра, що прореагували, забарвлюються в коричневий колір, вказуючи на місця скупчення сірки. Якщо ж фотопапір має рівномірне забарвлення, то, отже, сірка розподілена рівномірно. Для запобігання потемнінню всього фотопаніра проводиться фіксування відбитка. Такий відбиток є документом дослідження.

На рис.1 показаний відбиток заклепки з рівномірним, а на рис.2 з нерівномірним розподілом сірки. Такі заклепки (рис.2) є браком.

## 2.3. Визначення волокнистості сталі

Неметалічні включення (оксиди, сульфіди, шлаки і інш.), присутні в сталі, і ліквацийні дільниці, неоднорідні по складу і структурі, в процесі обробки тиском витягуються вздовж напряму деформації, утворюючи характерну подовжню волокнистість.

Виявлення волокнистої будови сталі дозволяє зробити висновок про правильність проведення кування, штампування і інших видів гарячої обробки тиском. Справа в тому, що деякі механічні властивості зразків, вирізаних вздовж волокна, вище, чим на зразках, вирізаних упоперек. Тому для збільшення міцності волокна повинні огинати його контури. На рис.3 показані дільниці двох колінчастих валів: праворуч - виготовленого різанням з шматка прокату, волокна якого перерізані, внаслідок чого міцність ослаблена; зліва - виготовленого куванням (або штампуванням), у якого волокна огинають контур виробу, внаслідок чого міцність його вище.

Для виявлення волокнистої будови сталей частіше за все використовують реактив Гейна, що складається з 85 г $CuCl_2$, 53 г $NH_4Cl$ і 1 л води. Під дією цього реактиву залізо переходить в розчин, а на поверхні шліфа осаджуються пластівці міді, що легко змиваються водою.





Рис.1.
Рівномірний розподіл сірки



Рис.2.
Нерівномірний розподіл сірки

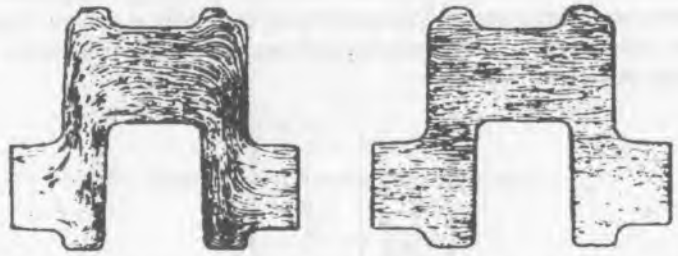


Рис.3. Дільниці двох колінчастих валів: праворуч виготовленого різанням з шматка прокату; зліва виготовленого куванням

# 3. МІКРОСТРУКТУРНИЙ АНАЛІЗ

Мікроструктурний аналіз полягає в дослідженні структури сплавів за допомогою мікроскопів.

Мікроаналіз дає можливість визначити кількість, форму і розміри окремих фаз і структурних складових сплаву, їх взаємне розташування, а також наявність неметалічних включень (шлакових і інш.) і дрібних раковин, пір, що не виявляються макроаналізом.

Внаслідок мікроаналізу можна судити про властивості і, в ряді випадків, про попередню обробку сплавів.

Мікроаналіз складається з наступних етапів:

1. Приготування мікрошліфа.
2. Труєння мікрошліфа.
3. Дослідження структури сплаву під мікроскопом.

### 3.1. Підготовка і вивчення мікрошліфів

З деталі, що досліджується або заготівлі вирізають зразок з цікавлячого дослідника місця (за результатами макроаналіза). Потім одну з поверхонь вирізаного зразка шліфують і полірують до отримання плоскої поверхні 12-14 класу шорсткості.

Нетруєний полірований шліф під мікроскопом має вигляд світлого кола. У ньому можуть бути видні тільки неметалічні включення (графіт в сірих чавунах, шлаки і інш.) і різні раковини, пори і інші дефекти.

Для виявлення мікроструктури шліф зазнає труєння, внаслідок якого на гладкій поверхні створюється певний рельєф, що залежить від будови сплаву. Склад травителя залежить від складу сплаву і вибір його проводиться по відповідних довідниках. Для залізовуглецевих сплавів частіше за все використовується 4% розчин азотної кислоти. Матеріал кордонів зерен з найбільшою швидкістю реагує з травителем, переходячи в розчин. У результаті всі зерна виявляються оточеними канавками, що характеризують форму і розміри цих зерен (рис.4).

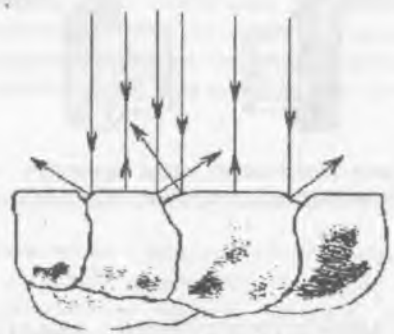


Рис.4. Схема спостереження структури після травлення – поперечний розріз шліфа

Показана на рис.5 мікроструктура сплаву складається в основному з білих (ясно-сірих) зерен і невеликої кількості дрібних темних зерен. Білі (ясно-сірі) зерна є однофазними, тобто спрощено кажучи, кожне таке зерно складається з одного кристала. Темні зерна є двофазними, тобто складаються з суміші двох видів більш дрібних кристалів.

Так, наприклад, перліт в залізовуглецевих сплавах складається з суміші дуже дрібних пластинок фериту і цементиту. При контакті з травителем навколо кожного зерна такої структурної складової утвориться канавка. Крім того, на поверхні самого зерна утвориться рельєф через різку відмінність в швидкості розчинення в травителі обох фаз, а також за рахунок канавок, що утворилися між цими фазами на поверхні кожного зерна. Будову двофазних зерен можна побачити іноді тільки при великих збільшеннях мікроскопа. При



малих збільшеннях відстані між канавками, що обмежують фази, настільки малі, що зливаються в одну темну пляму. Це ж може статися у випадку, якщо розміри фаз, з яких складається зерно, менше дозволяючої здатності мікроскопа. У цьому випадку будову двофазного зерна неможливо спостерігати при будь-якому збільшенні мікроскопа.



Рис.5. Мікроструктура маловуглецевої сталі

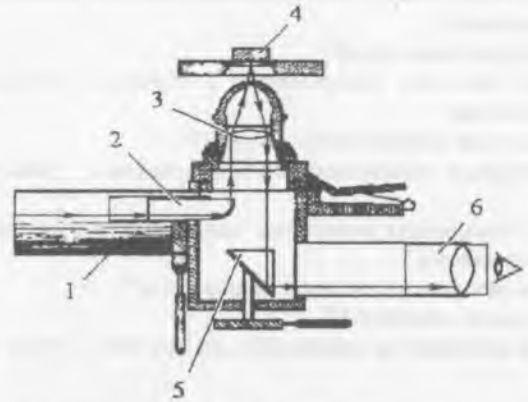



Рис.6. Схема оптичної системи світлового металографічного мікроскопа:
*1* - освітлювальний тубус; *2* - відхиляюча лінза; *3* - об'єктив; *4* - мікрошліф; *5* - призма; *6* - окуляр

### 3.2. Оптична система мікроскопа

Оптична система мікроскопа включає об'єктив, окуляр і ряд допоміжних оптичних елементів: дзеркала, призми і т.д. (рис.6).

Промені світла від джерела попадають на відхиляючу лінзу, відбиваються від неї і через об'єктив йдуть на шліф. Відображені від шліфа промені проходять через об'єктив і, змінюючи напрям в призмі, попадають в окуляр і око спостерігача.

Необхідно пам'ятати, що мікроскоп дорогий і складний прилад, що вимагає умілого звертання і дбайливого догляду.

Не допускається:

1. Робота з мікроскопом без дозволу викладача.
2. Різке переміщення гвинтів, рукояток і інших деталей (про кожне ускладнення повідомляти викладача або лаборанта).
3. Дотик пальцями рук або іншими предметами до оптики мікроскопа щоб уникнути псування останнього.

## 4. КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Чи використовується збільшення при вивченні макроструктури металів?
2. Яка мета макроструктурного аналізу?
3. Які види неоднорідності металу можна визначити макроаналізом?
4. Що таке ліквація?
5. Як приготувати макрошліф?
6. Що таке реактиви поверхневого і глибокого труєння, і що з їх допомогою визначають?
7. Як визначається ліквація сірки в сталях?
8. Як визначається волокниста будова стальних деталей, що воно характеризує?
9. При яких збільшеннях вивчається мікроструктура металів на оптичних і електронних мікроскопах?
10. Що можна визначити внаслідок мікроаналізу?
11. Як приготувати мікрошліф?
12. Що можна побачити на мікрошліфі до труєння і після труєння?

## 5. ЗМІСТ ЗВІТУ

1. Указати задачі структурного методу дослідження сплавів.
2. Описати методику визначення макроструктури і волокнистості сталей, замалювати макроструктуру протравлених зразків, указавши вплив волокнистості і дефектів будови на міцність досліджених деталей.



3. Описати методику визначення ліквації сірки в сталях і зробити аналіз отриманого сірчаного відбитка. При аналізі указати на характер розташування сірки і її вплив на механічні властивості в досліджених деталях.
4. Замалювати оптичну схему мікроскопа.
5. Замалювати і дати пояснення до мікроструктури зразка:
   а) до труєння;
   б) після труєння.

Лабораторна робота №4

**Структури і властивості вуглецевих сталей в рівноважному стані**

## 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Мета роботи: вивчити вплив вуглеця на структуру і механічні властивості вуглецевих сталей.

У рівноважному стані (тобто після повного або дифузійного відпалу) структура сплавів відповідає діаграмі станів. Згідно з діаграмою станів залізо-цементит (рис.1) по структурі і вмісту вуглеця вуглецеві сталі діляться на три класи: 1) доевтектоїдні із вмістом вуглеця від 0,02 до 0,83%, структурні складаючі ферит і перліт; 2) евтектоїдні - вміст вуглеця 0,83%, структурна складова перліт (евтектоїд); 3) заевтектоїдні із вмістом вуглеця від 0,83 до 2,14%, структурні складові перліт і вторинний цементит.

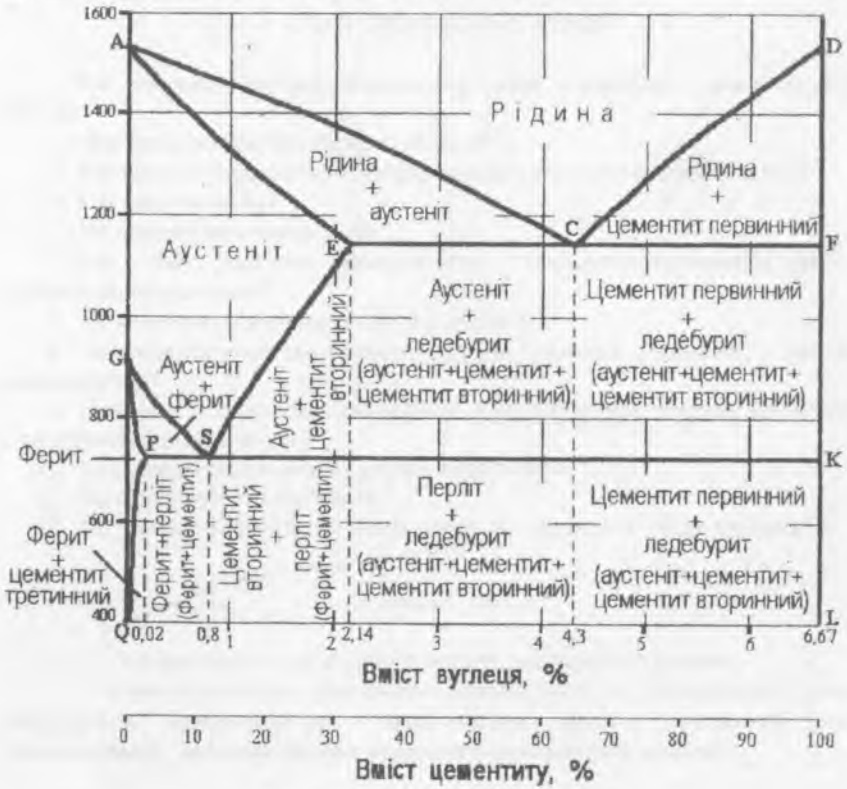



Рис.1. Діаграма стану Fe – Fe $_3$C



Природа структурних складаючих сталей: ферит – твердий розчин вуглеця (або цементиту) в α–залізі $Fe_\alpha$, вміст вуглеця в ньому змінний (лінія PQ діаграми) від 0,02% при 727°С до 0,006 % при нормальній температурі. Перліт – евтектоїдна суміш фериту і цементиту $Fe_3C$ звичайно пластинчатої будови; при особливому режимі охолоджування сталі цементит перліту може мати кулясту форму і такий перліт називається зернистим. Цементит - хімічна сполука заліза з вуглецем $Fe_3C$, в якому міститься 6,67% вуглеця.

## 2. МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ВМІСТУ ВУГЛЕЦЯ ПО СТРУКТУРІ ДОЕВТЕКТОЇДНОЇ СТАЛІ

Структура доевтектоїдної сталі в рівноважному стані відповідно до діаграми Fe - $Fe_3C$ складається з фериту і перліту. Якщо в такій сталі із вмістом вуглеця рівним "С" визначити за правилом відрізків їх вагову кількість (масу) в частках одиниці від маси сталі, то, наприклад, для перліту отримаємо залежність

$$Q_П = \frac{C - C_Ф}{C_П - C_Ф},$$

де $Q_П$ - кількість перліту в частках одиниці;

$C$ - % вуглеця в сталі;

$C_П = 0{,}83$ - % вуглеця в перліті;

$C_Ф = 0{,}006$ - % вуглеця в фериті при кімнатній температурі.

Перетворюючи це вираження, отримаємо

$$C = C_П\, Q_П + C_Ф\, (1 - Q_П)$$

Другим додатком можна нехтувати, оскільки $C_Ф = 0{,}006 \approx 0$. Тоді вміст вуглеця в доевтектоїдній сталі рівний

$$C = 0{,}83\, Q_П \approx 0{,}8\, Q_П.$$

Таким чином, для визначення вмісту вуглеця в доевтектоїдній сталі треба візуально оцінити площу (в частках одиниці), зайняту зернами перліту $Q_П$ і помножити її на 0,8 – приблизний вміст вуглеця в перліті. Похибка такого методу при достатній практиці не перевищує 0,1% С.

Для заевтектоїдних сталей вміст вуглеця можна визначити з вираження

$$C = 0{,}83\, Q_П + 6{,}67\, (1 - Q_П)\ ,$$

де 6,67 – вміст вуглеця в цементиті.

На практиці це вираження не використовується через велику похибку визначення кількості вуглеця, досягаючу 0,7%. Тому кількість вуглеця в заевтектоідній сталі звичайно призначається довільно в межах від 0,9 до 1,3 %.

## 3. СТРУКТУРИ ВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ

Співвідношення в структурі сталей структурних складових змінюється в залежності від вмісту вуглеця. При вмісті вуглеця від 0,006 до 0,02% – ферит + третинний цементит. Сплав, що містить до 0,006% С, має чисто феритну структуру. З збільшенням вмісту вуглеця більше за 0,02% в структурі з'являються зерна перліту, причому, чим більше в сталі вуглеця, тим більше в структурі перлітних зерен і менше феритних (рис.2-4); при вмісті вуглеця 0,83% (евтектоідна сталь) структура сталі складається тільки з перліту, а ферит повністю зникає (рис.5).

При подальшому збільшенні вмісту вуглеця більше за 0,83% в структурі нарівні з перлітом з'являється цементит вторинний, який міститься у вигляді білої сітки навколо зерен перліту (рис.6); з підвищенням вмісту вуглеця сітка вторинного цементиту стає більш товстою. Отже, структурною ознакою доевтектоідної сталі служить ферит, а заевтектоідної - вторинний цементит. При розгляді під мікроскопом ферит і цементит білого кольору, відрізняють їх один від одного звичайно за формою і взаємним поєднанням з перлітом. Структурно вільний ферит буває тільки в доевтектоідних сталях і являє собою як би світле поле, на якому розташовані темні зерна перліту. З збільшенням вмісту вуглеця феритне поле зменшується і при наближенні до евтектоіду (0,83% С) ферит залишається в дуже малій кількості у вигляді окремих невеликих зерен або ланцюжка зерен між зернами перліту.

Ферит від цементиту ще відрізняється тим, що в ньому можна зустріти різні включення - сульфіди, шлаки, чого не буває в цементиті.

Структурно вільний цементит буває в основному в заевтектоідних сталях (вторинний цементит) і звичайно розташовується у вигляді тонкої суцільної чіткої сітки по межах зерен перліту; іноді вторинний цементит також залягає і всередині зерен перліту у вигляді стрілчастих включень. У заевтектоідних сталях основне структурне поле являє собою перліт, прорізаний сіткою вторинного цементиту; при підвищенні вмісту вуглеця сітка не міняє свого характеру розташування і чіткості, але стає товще, жирніше.



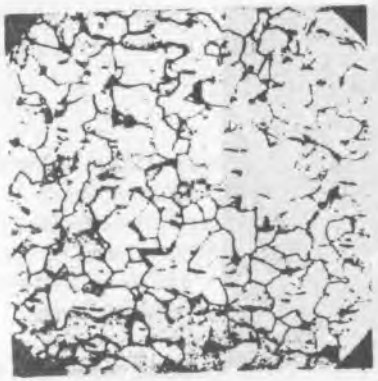


Рис.2.
Структура: ферит (світлі зерна) і перліт (темно-сірі зерна). Сумарна площа, що займається перлітом, приблизно 0,1. Вміст вуглеця 0,1 × 0,8 = 0,08%

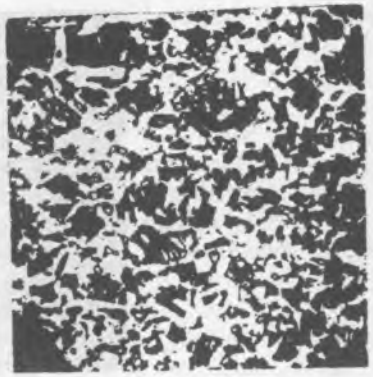


Рис.3.
Структура: ферит (світлі зерна) і перліт (темно-сірі зерна). Сумарна площа, що займається перлітом, приблизно 0,4. Вміст вуглеця 0.4 × 0,8 = 0.32%

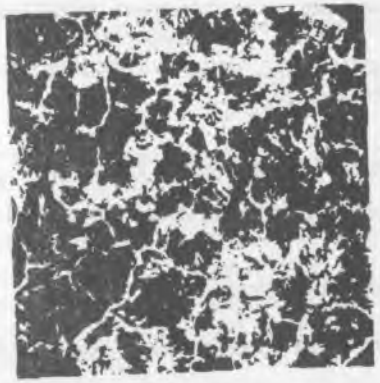


Рис.4.
Структура: ферит (світлі зерна) і перліт (темно-сірі зерна). Сумарна площа, що займається перлітом, приблизно 0,6%, вмістом вуглеця 0,6 × 0,8=0,48%

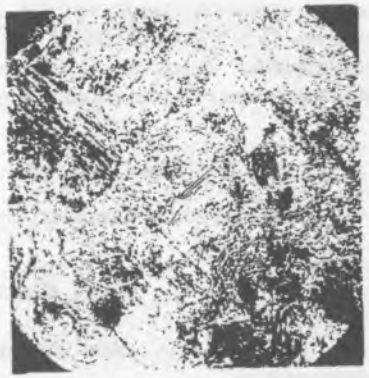


Рис.5.
Структура: перліт, ферит відсутній. Вміст вуглеця 0,8%

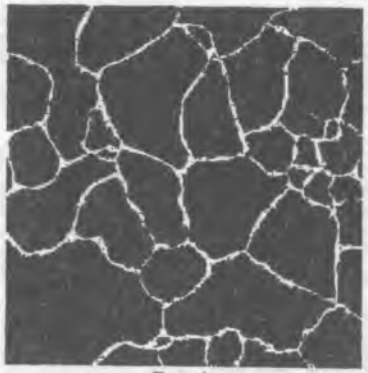


Рис.6.
Структура: перліт (темні зерна) і цементит (світла сітка). Вміст вуглеця більше за 0,8% (по структурі не визначається)

Величина і розташування зерен перліту можуть бути різними. Це залежить від умов кристалізації і подальшої технологічної обробки. Будова перліту, тобто складаючі його пластинки фериту і цементиту можна побачити тільки при великому збільшенні (рис.5) або при малому збільшенні, якщо перліт великопластинчастий. У залежності від часу травлення зерна перліту можуть бути більш світлими або більш темними. Зерна перліту можуть мати забарвлення сірих тонів, а також кольорову. Остання частіше за все спостерігається в евтектоідних і заевтектоідних сталях.

## 4. КЛАСИФІКАЦІЯ І МАРКІРОВКА ВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ

Вуглецеві сталі класифікують по структурі, якості і за призначенням.

### 4.1. Класифікація по структурі

По структурі сталі класифікуються на доевтектоідні, евтектоідні і заевтектоідні.

### 4.2. Класифікація за якістю

Сталь завжди містить домішки. Якщо марганець і кремній необхідні за умовами технології виплавки, то сірка і фосфор відносяться до шкідливих домішок, що не піддаються повному виведенню. У малій кількості в сталі також постійно присутні приховані домішки: кисень, водень, азот. Чим менше шкідливих домішок, тим вище якість сталі. У залежності від якості



розрізнюють сталі звичайної якості, якісні, високоякісні і особливо високоякісні.

### 4.3. Класифікація за призначенням

Вуглецеві сталі розділяються на конструкційні і інструментальні.

Конструкційні сталі містять вуглеця до 0,7% і використовуються як:

а) котельні, будівельні, цементуємі (вуглеця міститься до 0,25%);

б) для деталей машин, що зазнають ударні навантаження (вуглеця міститься 0,3-0,5%);

в) для пружин і ресор (вуглеця міститься 0,5 - 0,7%).

Вуглецеві сталі, що містять 0,7-1,3% вуглеця, використовують для виготовлення ударного і ріжучого інструмента.

Конструкційні сталі бувають звичайної якості і якісні. Якісна сталь має знижений вміст шкідливих домішок, більш вузькі межі вмісту вуглеця, менш забруднена неметалічними включеннями і газами.

Вуглецева сталь звичайної якості більш дешева.

Конструкційні сталі звичайної якості (ДСТУ 2651-94) поділяються на три групи:

А – що поставляються по механічним властивостям; Б – що поставляються по хімічному складу; В – що поставляються по механічним властивостям і хімічному складу.

***Механічні властивості сталей звичайної якості групи А***

| Марка сталі | Межа міцності, $\sigma_в$, МПа (кгс/мм$^2$) | Межа текучості $\sigma_т$, МПа (кгс/мм$^2$) | Відносне подовження $\delta$, % |
|---|---|---|---|
| Ст0 | 31 | – | 23-20 |
| Ст1кп | 300-390 (31-40) | – | 35-32 |
| Ст1пс, Ст1сп | 310-410 (32-42) | – | 34-31 |
| Ст2кп | 320-410 (33-42) | 215-185 (22-19) | 33-30 |
| Ст2пс, Ст2сп | 330-430 (34-44) | 225-195 (23-20) | 32-29 |
| Ст3кп | 360-460 (37-47) | 235-195 (24-20) | 27-24 |
| Ст3пс, Ст3сп | 370-480 (38-49) | 245-205 (25-21) | 26-23 |
| Ст3Гпс** | 370-490 (38-50) | 235-205 (25-21) | 26-23 |
| Ст3Гсп | 390-570 (40-58) | 245 – (24) | – |
| Ст4кп | 400-510 (41-52) | 255-225 (26-23) | 25-22 |
| Ст4пс, Ст4сп | 410-530 (42-54) | 265-235 (27-24) | 24-21 |
| Ст5пс, Ст5сп | 490-630 (50-64) | 285-255 (29-26) | 20-17 |
| Ст5Гпс | 450-590 (46-60) | 285-255 (29-26) | 20-17 |
| Ст6пс, Ст6сп | 590 (60) | 315-295 (32-30) | 15-12 |

* Буква Г вказує на підвищений вміст Mn.

Буква А в позначенні марки сталі не вказується. Букви Ст означають "сталь", цифри від 0 до 6 – умовний номер марки, що характеризує механічні властивості сталі. З збільшенням номера марки підвищуються межа міцності $\sigma_в$ і межа текучості $\sigma_т$, і меншає відносне подовження $\delta$. Для позначення міри розкислення після номера марки ставляться індекси: кп – кипляча, пс – напівспокійна, сп – спокійна.

Киплячі сталі – низьковуглецеві, високопластичні, найбільш придатні для глибокого витягу. Ці сталі дешевше спокійної, однак вони містять більше кисня і схильні до підвищеної ліквації, що обмежує область їх застосування.

Сталі групи А використовують в основному для виготовлення деталей, які не повинні зазнавати термічної обробки.

***Хімічний склад вуглецевих сталей звичайної якості групи Б, %***

| Марка сталі | C | Mn | Si |
|---|---|---|---|
| БСт0* | 0,23 | – | – |
| БСт1кп | 0,06-0,12 | 0,25-0,5 | 0,05 |
| БСт1сп | 0,06-0,12 | 0,25-0,5 | 0,12-0,3 |
| БСт2кп | 0,09-0,15 | 0,25-0,5 | 0,07 |
| БСт2сп | 0,09-0,15 | 0,25-0,5 | 0,12-0,3 |
| БСт3кп | 0,14-0,22 | 0,2-0,6 | 0,07 |
| БСт3сп | 0,14-0,22 | 0,4-0,65 | 0,12-0,3 |
| БСт4кп | 0,18-0,27 | 0,4-0,7 | 0,07 |
| БСт4сп | 0,18-0,27 | 0,4-0,7 | 0,12-0,3 |
| БСт5пс | 0,28-0,37 | 0,5-0,8 | 0,05-0,17 |
| БСт5сп | 0,28-0,37 | 0,5-0,8 | 0,15-0,35 |
| БСт5Гпс | 0,22-0,3 | 0,8-1,2 | 0,15 |
| БСт6пс | 0,38-0,49 | 0,5-0,8 | 0,05-0,17 |
| БСт6сп | 0,38-0,49 | 0,5-0,8 | 0,15-0,35 |

Вміст інших елементів в сталі БстО: не більше за 0,07% P, 0,06% S; в сталях інших марок не більше за 0,04% P, 0,05% S, 0,3% Cr, 0.3% Cu, 0.08% As.

Буква Б, що стоїть перед позначенням марки, означає групу сталі. У іншому маркіровка сталі групи Б проводиться так само, як і сталі групи А. Цифра в марці сталі не означає вміст вуглеця, із збільшенням цифри збільшується лише процентний вміст вуглеця.

У групу В входять сталі марок ВСт1, ВСт2, ВСт3, ВСт4, ВСт5. Індекси, що додаються до марки пс, сп і кп означають міру розкислення сталі. У позначенні марки напівспокійної сталі з підвищеним вмістом марганця після номера вказується буква Г, наприклад, ВСт1Гпс.



Механічні властивості сталей групи В повинні відповідати нормам, передбаченим для сталей групи А, для яких додатково проводять випробування на ударну в'язкість. По хімічному складу сталі цієї групи повинні відповідати нормам, передбаченим для сталей групи Б.

Якісні конструкційні сталі

Вуглецеві якісні конструкційні сталі є основним матеріалом для виготовлення деталей різної міри навантаження. Вони добре обробляються тиском і різанням, ллються і зварюються, підлягають термічній, термомеханічній і хіміко-термічній обробці. Різні спеціальні види обробки забезпечують в'язкість, пружність і твердість сталей, дозволяють робити з них деталі, в'язкі в серцевині і тверді зовні, що різко збільшує їх зносостійкість і надійність.

***Хімічний склад і механічні властивості вуглецевої якісної конструкційної сталі***

| Марка сталі | Вміст вуглеця, % | Механічні властивості (не менш) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Межа міцності, $\sigma_в$, МПа (кгс/мм$^2$) | Межа текучості $\sigma_т$, кгс/мм$^2$ | Відносне подовження, $\delta$, % | Відносне звуження, $\Psi$, % | Ударна в'язкість, Дж/см$^2$ (кгс м/см$^2$) |
| 08 | 0,05-0,12 | 324 (33) | 196 (20) | 33 | 60 | – |
| 10 | 0,07-0,14 | 321 (34) | 206 (21) | 31 | 55 | – |
| 15 | 0,12-0,19 | 373 (38) | 225 (23) | 27 | 55 | – |
| 20 | 0,17-0,24 | 412 (42) | 245 (25) | 25 | 55 | – |
| 25 | 0,22-0,3 | 451 (46) | 274 (28) | 23 | 50 | 88 (9) |
| 30 | 0,27-0,35 | 490 (50) | 294 (30) | 21 | 50 | 78 (8) |
| 35 | 0,32-0,4 | 529 (54) | 314 (32) | 20 | 45 | 59 (6) |
| 40 | 0,37-0,45 | 568 (58) | 321 (34) | 19 | 45 | 49 (5) |
| 45 | 0,42-0,5 | 598 (61) | 353 (36) | 16 | 40 | 38 (4) |
| 50 | 0,47-0,55 | 627 (64) | 378 (38) | 14 | 40 | – |
| 55 | 0,52-0,6 | 647 (66) | 382 (39) | 13 | 35 | – |
| 60 | 0,57-0,65 | 676 (69) | 402 (41) | 12 | 35 | – |

Примітки: 1. Вміст марганця в сталях 08, 10, 15, 20 = 0,35-0,65%, а в інших 0,5-0,8%.

Вміст інших елементів: 0,17-0,37% Si (в киплячій сталі ≤ 0,07%); ≤ 0,04% S (0,035% в сталях 08 і 10) і ≤ 0,04% P.

2. Норми механічних властивостей відносяться до виробів діаметром або товщиною до 80 мм після нормалізації.

У позначенні марки сталі цифри вказують на середній вміст вуглеця в сотих частках процента. Міра розкислення в марках спокійних сталей не зазначається, а в марках напівспокійних і киплячих сталей, як і сталей звичайної якості, означається буквами "пс" і "кп" відповідно. У якісних конструкційних сталях всіх марок допускається вміст сірки не більше за 0,04% і фосфору не більше за 0,035%.

Інструментальні вуглецеві сталі служать для виготовлення ріжучого інструмента для обробки металів, дерева і пластмас, вимірювального інструмента і штампів для холодного деформування.

## СТАЛЬ ІНСТРУМЕНТАЛЬНА ВУГЛЕЦЕВА

| Марка сталі | Вміст елементів, % | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Вуглець | Марганець | Кремній | Сірка | Фосфор |
| | | | | не більш | |
| У7 | 0,65-0,73 | 0,17-0,33 | 0,17-0,33 | 0,28 | 0,030 |
| У8 | 0,76-0,83 | 0,17-0,33 | 0,17-0,33 | 0,28 | 0,030 |
| У8Г | 0,81-0,89 | 0,33-0,58 | 0,17-0,33 | 0,28 | 0,030 |
| У9 | 0,86-0,93 | 0,17-0,33 | 0,17-0,33 | 0,28 | 0,030 |
| У10 | 0,96-1,03 | 0,17-0,33 | 0,17-0,33 | 0,28 | 0,030 |
| У11 | 1,06-1,13 | 0,17-0,33 | 0,17-0,33 | 0,28 | 0,030 |
| У12 | 1,16-1,23 | 0,17-0,33 | 0,17-0,33 | 0,28 | 0,030 |
| У13 | 1,26-1,34 | 0,17-0,33 | 0,17-0,33 | 0,28 | 0,030 |
| У7А | 0,66-0,73 | 0,17-0,33 | 0,17-0,33 | 0,018 | 0,025 |
| У8А | 0,76-0,83 | 0,17-0,33 | 0,17-0,33 | 0,018 | 0,025 |
| У8ГА | 0,81-0,89 | 0,33-0,58 | 0,17-0,33 | 0,018 | 0,025 |
| У9А | 0,86-0,93 | 0,17-0,28 | 0,17-0,33 | 0,018 | 0,025 |
| У10А | 0,96-1,03 | 0,17-0,28 | 0,17-0,33 | 0,018 | 0,025 |
| У11А | 1,06-1,13 | 0,17-0,28 | 0,17-0,33 | 0,018 | 0,025 |
| У12А | 1,15-1,23 | 0,17-0,28 | 0,17-0,33 | 0,018 | 0,025 |
| У13А | 1,26-1,34 | 0,17-0,28 | 0,17-0,33 | 0,018 | 0,025 |

Інструментальні вуглецеві сталі розділені на дві групи: якісні сталі У7,..., У13 і високоякісні У7А,..., У13А. Буква "У" означає вуглецева, а число показує вміст вуглеця в десятих частках процента. При маркіровці високоякісної інструментальної сталі до марки додається буква "А".



## 5. ОБЛАСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ

| Марка сталі звичайної якості | Приблизне призначення | |
|---|---|---|
| | Будівництво | Машинобудування |
| Ст 0<br>БСт 0 | Листовий і сортовий прокат для будівельних конструкцій невідповідального призначення | |
| Ст 1<br>БСт 3<br>БСт 1 кп | Анкерні болти, жорсткі зв'язки, арматура | |
| Ст 2<br>БСт 2кп | Листи, заклепки, труби | |
| Ст 3<br>БСт 4<br>БСт 3кп | Сортовий, фасонний і листовий прокат для будівельних конструкцій и ферм, болти, гайки, відповідальні ферми і інш. конструкції. | Різні маловідповідальні детали машин, що не зазнають термичної обробки: втулки, вкладиші, важелі, стержні, малонавантажені болти і гайки, шайби, сережки, хомути, цементуємі и ціануємі деталі, від яких не потрібна висока твердість поверхні і серцевини, валики, поршневі пальці малопотужних двигунів, штовхачі, шестерні, черв'яки |
| Ст 4<br>БСт 4 | Деталі будівельних конструкцій | Малонапружені вали, осі і т.п. деталі |
| Ст 5<br>БСт 5 | Арматура, крюки кранів | Різні деталі машин, що піддаються впливу невеликих і середніх напружень: валики, осі, зірочки, поршневі пальці, стандартні болти, упори підшипників, важелі гальмові, болти, гайки, шайби, сережки ресор, гвинти, великі поковки.<br>Застосовуються в нормалізованому і термічно обробленому стані |

| Марка сталі звичайної якості | Приблизне призначення | |
|---|---|---|
| | Будівництво | Машинобудування |
| Ст 6<br>БСт 6 | | Різні деталі, що вимагають підвищеної міцності: осі, вали, клини, валики, колінчасті вали, пальці поршнів, пальці траків, шестерні (при низькому питомому тиску), шпинделі, осі шестерень, вали і осі с/г машин, черв'яки середньої міцності, великі поковки. Застосовуються, як правило, в термообробленому стані після поліпшення, нормалізації |
| Ст 7<br>БСт 7 | | Деталі, схильні до інтенсивного зносу. Навантажені деталі, що термічно оброблюються |

| Марки сталі якісної | Приблизне призначення |
|---|---|
| 05, 08, 10 | Для деталей з високою пластичністю: трубки, прокладки, шайби, вилки, тяги і т.д.<br>Для цементуємих і ціануємих деталей, що не вимагають високої міцності серцевини: втулки, вушки, коромисла клапанів |
| 15 | Для цементуємих і ціануємих деталей, що не вимагають високої міцності серцевини: болти, гайки, гвинти, вилки, важелі, ключі, валики автомобіля, пальці, шпильки, стяжки, фланці, ободи автомобіля |
| 20 | Для автотракторобудування цементуємі і ціануємі фрикційні диски, кулачкові і прості шайби, ключі, що термічно не оброблюються, осі, втулки, важелі, стержні, зварні і штамповані деталі з невисокою міцністю |



| Марки сталі якісної | Приблизне призначення |
|---|---|
| 25 | Застосовується в нормалізованому стані і після термообробки: осі, вали, муфти, болти, гвинти, гайки.<br>У котлобудуванні: листи, кріпильні деталі, фланці |
| 30 | Застосовується для деталей, що випробовують невеликі напруження, головним чином, в нормалізованому стані, а також після термообробки: тяги, сережки, траверси, осі, зірочки, циліндри пресів, шпинделі, болти, гайки, важелі |
| 35 | Застосовується, головним чином, в нормалізованому стані, а також після термообробки: тяги, сережки, осі, зірочки, циліндри пресів, диски, ободи, шпинделі, болти, гайки, вали |
| 40 | Відрізняється підвищеною міцністю і середньою в'язкістю. Застосовується після загартування з відпусткою: шатуни, шестерні, осі, вали, штоки, бандажі. Після нормалізації: вали, малонавантажені кріпильні деталі |
| 45 | Застосовується для деталей підвищеної міцності, а також працюючих на стирання: валки, втулки, зубчаті колеса, пальці траків гусениць, диски зчеплення, валки прокатних станів, плунжери, шпинделі, бандажі, осі, фрикційні диски; болти, шпильки, гайки в авіабудівництві |
| 50<br>55 | Застосовується в нормалізованому стані і після загартування з відпусткою: шестерні, штоки, бандажі, вінці, прокатні валки |
| 60<br>65 | Володіють високими міцнісними і пружними властивостями і застосовуються після загартування і відпустки, для великих деталей після нормалізації: валки, ексцентрики, осі, шпинделі, бандажі, клапанні пружини, ресори |

| Марки сталі інструмен-тальної вуглецевої | Приблизне призначення |
|---|---|
| У7<br>У7А | Слюсарний інструмент: зубила, крейцмейселі, молотові штампи, кернери, бородки, молотки, кувалди і інш. інструменти, що зазнають поштовхів і ударів, що вимагають великої в'язкості при помірній твердості |
| У8<br>У8І | Зубила, калібри, кільця, пробки, ножі для різання металу в холодному стані |
| У8А<br>У8ГА | Матриці, пуансони, пробійники, клейма, пилки по металу, обтискачі, ножі по металу |
| У9<br>У9А | Свердла, мітчики, плашки, розгортки, пуансони, калібри, волочильні кільця, зубила |
| У10<br>У10А | Свердла, мітчики, калібри, напилки, волочильні кільця, плашки, пуансони |
| У11<br>У11А<br>У12<br>У12А | Мітчики, калібри, фрези, свердла, розвертки, шабери, плашки, напилки |
| У13<br>У13А | Шабери, напилки, накатні ролики |

## 6. КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Що таке ферит і яка форма і колір його зерен?
2. Що таке цементит, його колір і форма в мікроструктурі вуглецевих сталей?
3. Що таке перліт, колір і форма його зерен?
4. Яка структурна складова характерна для заевтектоідних сталей?
5. Яка структурна складова характерна для доевтектоідних сталей?
6. По якій металографічній ознаці визначається евтектоідна сталь?
7. Як визначається приблизний вміст вуглеця в доевтектоідних сталях?
8. Укажіть класифікацію вуглецевих сталей по мірі розкислення.



9. На які підгрупи діляться конструкційні вуглецеві сталі за призначенням і по якій ознаці це проводиться?
10. По якій ознаці встановлюється розподіл вуглецевих сталей за якістю і як це відбивається в їх маркіровці?

## 7. ЗМІСТ ЗВІТУ

1. Викласти мету і задачі роботи.
2. Намалювати структури мікрошліфів з різним вмістом вуглеця. Описати структурні складові.
3. Визначити по мікроструктурі вміст вуглеця.
4. Вибрати, користуючись таблицями, всі марки сталей, які за вмістом вуглеця відповідають вивченим мікрошліфам і указати їх призначення і якість.
5. Описати область застосування по одній з вибраних марок сталей для кожного зразка.

# 8. ВПЛИВ ДОМІШОК І ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ НА СТРУКТУРУ І ВЛАСТИВОСТІ ВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ

Мета роботи: ознайомитися з дефектами структур вуглецевих сталей, їх впливом на властивості сталей, причинами виникнення дефектів, можливістю і способами їх усунення.

## 8.1. Вплив домішок

У сталях, крім заліза і вуглеця, завжди присутні домішки марганця, кремнію, сірки, фосфору і кисня; вони називаються звичайними або постійними домішками.

*Марганець і кремній* вводяться у вуглецеву сталь для розкислення і залишаються в металі в таких кількостях, що вони повністю розчиняються в фериті (а марганець також і в цементиті) і під мікроскопом не виявляються.

*Фосфор* попадає в сталь з руди. У тій кількості, в якій він присутній в сталі, він розчиняється в фериті і під мікроскопом не виявляється. Розчинення фосфору в фериті підвищує міцність і твердість і знижує в'язкість і пластичність, різко підвищуючи температуру переходу в крихкий стан. Таке окрихчування сталі називається холодноламкістю. Внаслідок шкідливого впливу фосфору на властивості сталі, його кількість звичайно не перевищує 0,08%. Однак при таких малих кількостях фосфор в сталях розподіляється нерівномірно і утворює ліквацийні зони з підвищеним його вмістом.

У той же час фосфор погіршує розчинність вуглеця так, що в зонах з підвищеною концентрацією фосфору вуглеця буває менше. Це приводить до того, що в структурі на деяких дільницях перлітні зерна як би розступаються і з'являються світлі феритні дільниці, які називаються світловинами (рис.7). Нерівномірний розподіл структурних складових приводить до неоднорідності властивостей, тим більше, що світловини мають підвищену крихкість. Шкідливий вплив фосфору практично незмінюваний. Однак в окремих випадках фосфор корисний, оскільки він, створюючи крихкість, полегшує оброблюваність сталі різанням (автоматні сталі), а в присутності міді підвищує опір корозії (будівельні сталі).

*Сірка.* Сірка в залізі не розчиняється і звичайно зустрічається у вигляді сульфідів FeS і MnS. Найбільш небезпечним є сульфід заліза, який із залізом утворює сірчасту евтектику з температурою плавлення 985°С. Маючи таку низьку температуру плавлення, сірчаста евтектика при кристалізації затвердіває в останню чергу, розташовуючись по межах зерен початкового аустеніту.

На рис. 8, *а* (×120) і *б* (×800) представлена структура сталі із вмістом вуглеця біля 0,25%, де по межах зерен початкового аустеніту видна темна сітка сірчастої евтектики, яка при поверненні мікрогвинта мікроскопа приймає жовто-оранжевий колір.



Наявність легкоплавкої евтектики по межах зерен приводить до того, що при нагріванні до температури кування або прокатки (вище за 1000°С) сірчаста евтектика плавиться, втрачається зв'язок між зернами. Під впливом обробки тисненням метал руйнується внаслідок втрати зв'язку між зернами. Це явище називається червоноламкістю. Такі сталі не зазнають гарячої обробки тиском - (куванню, штампуванню тощо).

Оскільки в сталях завжди є Mn, що володіє великою спорідненістю до сірки, то він руйнує сульфід заліза і утворює сульфід марганця, що має температуру плавлення 1620°С, і переходить в шлак. Однак деякі частки MnS можуть залишитися в металі. Ці включення менш небезпечні, ніж FeS, оскільки сульфід марганця, що має високу температуру плавлення (1620°С), при кристалізації сталі вже твердий і є центром кристалізації. Тому він завжди присутній у вигляді включень в фериті і не порушує зв'язок між зернами.

Тому при виплавці сталі марганець вводиться не тільки для розкислення, але і для скріплення сірки в MnS, цим виключаючи червоноламкість.

У структурі (рис.9) MnS видний у вигляді сірих (мишачого кольору) зерен. При деформації вони набувають довгасту форму.

Велика кількість включень MnS і шлаків шкідлива, оскільки вони порушують загальну суцільність металу. Ці включення можуть виявитися концентраторами напруг.

*Кисень.* Кисень в сталі знаходиться у вигляді оксидів FeO, MnO, $SiO_2$, CaO і інш., які при виплавці сталі утворюють шлак. Сталь може бути недостатньо очищена від шлаків, тоді останні можуть зустрічатися в металі у вигляді дрібної завісі (в феритному полі чорні крапкові включення), а також у вигляді досить великих включень сірого кольору, довгастих вздовж напряму деформації (рис.10).

Іноді зустрічаються деталі, у яких весь метал пронизаний шлаковими включеннями (рис.11). Великі включення неоднорідні, оскільки представляють складний евтектичний сплав оксидів.

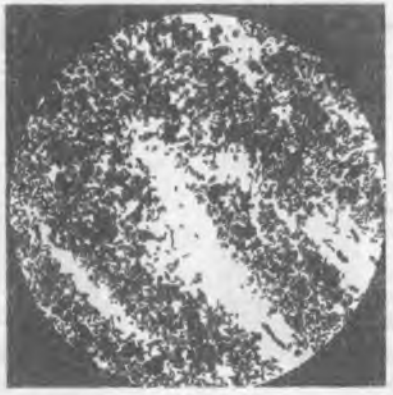


Рис.7. Світловини в структурі сталі

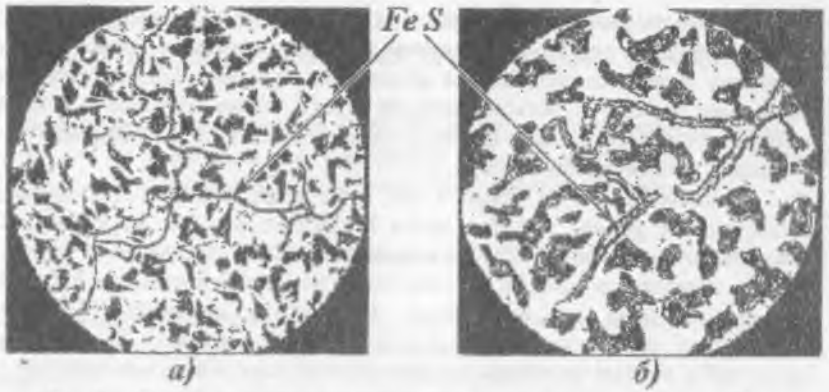



Рис.8. Сірчаста евтектика по межах зерен початкового аустеніту:
*а*) збільшення 120; *б*) збільшення 800

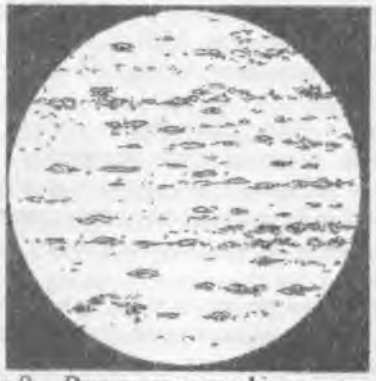


Рис.9. Включення сульфіду марганця



Рис.10. Шлакові включення (оксиди заліза, марганця, кремнію і інш.)



Рис.11. Великі шлакові включення



## 8.2. Вплив обробки тиском

При гарячій обробці тиском, особливо прокатці, зерна фериту і перліту під впливом деформації орієнтуються в напрямі прокатки, утворюючи текстуру (лінійну спрямованість зерен), внаслідок чого метал має волокнисту будову.

Крім волокнистої структури зустрічається рядкова або стрічкаста структура, коли феритні і перлітні зерна розташовуються паралельними смугами, що чергуються. Чому виникає така структура? Нерозчинні частки, присутні в сталі, при прокатці розташовуються в напрямі прокатки у вигляді ланцюжків. При охолоджуванні сталі після прокатки і досягненні температури $Ar_3$ починається утворення зерен фериту, при цьому нерозчинні частки є центрами кристалізації. Оскільки вони витягнені в ланцюжок, то і зерна фериту будуть витягнені в одну лінію. При температурі $Ar_1$ аустеніт перетвориться в перліт, і його зерна будуть залягати між феритними зернами, також розташовуючись в одну лінію (рис.12).

Рядковість структури веде до появи неоднакових властивостей вздовж і поперек прокатки. Причому, міцність, пластичність і в'язкість поперек прокатки менше на 10-15%. Виникає, так звана, векторіальність властивостей, тобто неоднаковість в різних напрямах.

При необхідності усунути рядковість можна шляхом всебічної проковки сталі, щоб розосередити ланцюжки неметалічних включень рівномірно по всьому об'єму аустеніту. У інших випадках векторіальність властивостей прокату необхідно враховувати при проектуванні конструкцій і виробів.



Рис.12. Рядкова структура сталі

## 8.3. Вплив термічних дій

*Перегрів.* Витримка сталі при високій температурі (в стані аустеніту) спричиняє зростання зерен аустеніту.

Розмір зерен залежить від температури нагріву і часу витримки при цій температурі. При охолоджуванні під час повторної кристалізації з великих зерен аустеніту утворюються великі зерна фериту і перліту (рис.13).

Грубозерниста сталь характеризується деяким зниженням міцності і пластичності і помітним зменшенням ударної в'язкості.

Перегрів може бути виправлений відпалом на дрібне зерно.

Різновидом перегріву є відманштетова структура, яка характеризується тим, що зерна фериту і перліту мають прямолінійні контури і розташовуються під кутом один до одного. На рис.14 представлена відманштетова структура сталі із вмістом 0,25% вуглеця, на рис.15 – сталі із вмістом 0,5% вуглеця.

Ця структура утворюється частіше за все внаслідок високих перегрівів, коли зерна аустеніту стають більш великими, з подальшим прискореним охолоджуванням. Відманштетова структура більше знижує міцність і пластичність, а особливо ударну в'язкість. Така структура може бути виправлена також відпалом на дрібне зерно.

*Перепал* виникає в металі у разі витримки його при температурах, близьких до точки плавлення. При такому нагріві значно зростають зерна аустеніту і, крім того, кисень атмосфери печі окисляє метал виробу не тільки зовні, але, дифундуючи між зернами, також і поверхні зерен. Перепал починається з поверхні виробу і протягом часу може уразити всю деталь наскрізь.

На рис.16 і 17 видні темні плівки оксидів, розташовані по межах зерен (рис.17 - шліф не протравлений). Крихкі плівки оксидів порушують зв'язок між зернами і надають крихкість металу.

Усунути дефект неможливо, тому перепалений метал вимагає переплавлення.

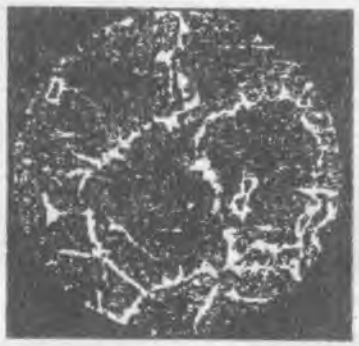


Рис.13. Грубозерниста структура доевтектоїдної сталі





Рис.14.
Відманштетова структура сталі із вмістом 0,25% вуглеця

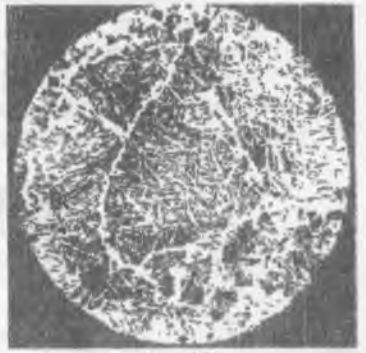


Рис.15.
Відманштетова структура сталі із вмістом 0,5% вуглеця

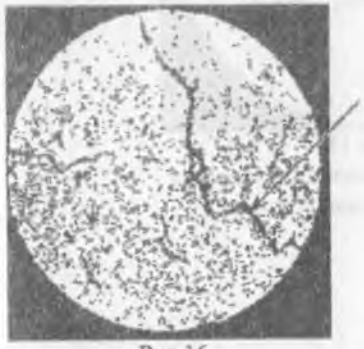



Рис.16.
Темні плівки оксидів по межах зерен



Рис.17.
Темні плівки оксидів по межах зерен, мікрошліф не протравлений

## 8.4. Вплив третинного цементиту

З діаграми залізо-цементит (рис.1) видно, що ферит при температурі 727°С може розчиняти в собі вуглеця 0,02%. З пониженням температури розчинність вуглеця в фериті знижується згідно із законом лінії PQ і при кімнатній температурі ферит містить 0,006% вуглеця.

Тому в сталях, що містять вуглеця більше за 0,006%, при повільному охолоджуванні або тривалих витримках при температурах нижче за точку $A_1$ надмірний вуглець виділяється з фериту у вигляді третинного цементита, розташованого окремими світлими включеннями по межах зерен (рис.18).

У сталях, що містять вуглеця більше за 0,1%, третинний цементит під мікроскопом не видний, оскільки він зливається з цементитом перліту. Третинний цементит надає крихкість м'яким маловуглецевим сталям.

Позбутися включень третинного цементиту можна нагріванням сталі вище за лінію PSK діаграми (частіше за все до стану аустеніту) з подальшим охолоджуванням на повітрі.

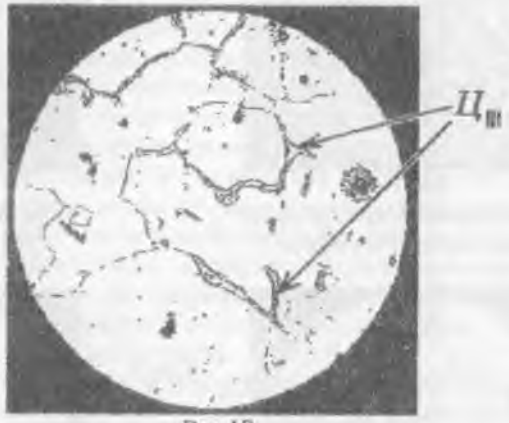



Рис.18.
Включення третинного цементиту
по межах зерен фериту

## 9. КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Домішка якого хімічного елементу викликає у вуглецевих сталях холодноламкість і в чому це проявляється?
2. Домішка якого хімічного елементу викликає у вуглецевих сталях червоноламкість і в чому це проявляється?
3. Як у вуглецевих сталях усувається червоноламкість?
4. Який вплив волокнистості сталі на механічні властивості, укажіть спосіб усунення волокнистості.
5. Які наслідки перегріву сталі і способи їх усунення?
6. Укажіть металографічні ознаки перепалу сталі і спосіб їх усунення.
7. У чому позначається вплив третинного цементиту на властивості вуглецевих сталей і спосіб його усунення.



## 10. ЗМІСТ ЗВІТУ

1. Викласти мету і задачі роботи.
2. Замалювати і описати мікроструктуру зразків з вказівкою виду сплаву, його основних структурних складових, їх природи і характерного дефекту.
3. Описати походження і природу дефекту, вплив на механічні властивості; вказати можливі шляхи усунення.

# Лабораторна робота №5
# Структури і властивості чавунів

Мета роботи: ознайомитися з природою і будовою чавунів. Вивчити вплив структури на властивості чавунів.

## 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Чавун відрізняється від сталі більш високим вмістом вуглеця і постійних домішок. В залежності від стану вуглеця розрізнюють білі і сірі чавуни.

*У білих чавунах* весь вуглець знаходиться в хімічно пов'язаному стані в карбіді заліза $Fe_3C$ – цементиті, який додає їм високу твердість. Через високу твердість білі чавуни майже не використовуються в промисловості.

Структура білих чавунів відповідає діаграмі Fe - $Fe_3C$. Вони можуть бути: евтектичними із вмістом вуглеця 4,3%, структура ледебурит (евтектика), що складається з суміші перліту і цементиту; доевтектичними із вмістом вуглеця 2,14-4,3%, структура перліт і ледебурит; заевтектичними із вмістом вуглеця 4,3-6,67%, структура цементит первинний і ледебурит. Структурною ознакою білих чавунів є ледебурит.

*У сірих чавунах* весь або майже весь вуглець знаходиться у вільному стані у вигляді включень графіту в металевій основі, структура якої може бути такою ж, як в сталях і складатися з фериту, перліту або з фериту і перліту. Інакше кажучи, можна вважати, що сірий чавун є сталлю з включеннями графіту, які ослабляють металеву основу тим більше, ніж гостріші ці включення.

Структурною ознакою сірих чавунів є наявність графіту, включення якого добре видні на нетравленому мікрошліфі.

Зустрічаються також *половинчасті чавуни*, в структурі яких є відмітні ознаки як сірих, так і білих чавунів, наприклад, графіт і ледебурит. Як правило, виливки з такою структурою є виробничим браком.

## 2. УМОВИ ПРОЦЕСУ ГРАФІТИЗАЦІЇ

Цементит метастабільний (мета - грецьке слово, що означає перехід до чого-небудь іншого). Це означає, що будучи стабільним - стійким, при певних умовах він здібний до переходу в інший стан, а саме до розпаду з утворенням графіту і твердого розчину вуглеця в залізі. Термодинамічно графіт більш стійкий, ніж цементит, графіту відповідає менше значення величини вільної енергії. Процеси утворення графіту в чавунах, що відбуваються як безпосередньо в ході кристалізації, так і через проміжну фазу цементиту, отримали назву процесу графітизації. Чавуни, що містять вуглець у вигляді графіту, отримали назву сірих (за кольором зламу).



Як відомо з фізичної хімії, перехід речовини в більш стабільний стан може бути здійснений шляхом зміни температурних умов (нагрів сприяє розпаду хімічних сполук). Цьому процесу сприяють каталізатори.

Практично сірі чавуни отримують:

1. Шляхом тривалого нагріву білих чавунів (в цьому випадку вміст елементу каталізатора може бути невеликим).

2. Введенням до складу чавуну елемента-каталізатора (в цьому випадку нагрів не потрібно, але швидкість охолоджування при кристалізації має істотне значення).

3. Введенням в рідкий чавун центрів зародження графіту – модифікаторів графітизації (в цьому випадку швидкість охолоджування і вміст елементів каталізаторів має другорядне значення).

У залежності від застосованого прийому графіт приймає різні просторові форми, з умови технологічного процесу впливають на повноту розпаду цементиту.

При тривалому нагріві білого доевтектичного чавуну (тривалий нагрів з метою одержання більш стабільного стану отримав назву відпалу) розпад цементиту приводить до утворення графіту, що має пластівчасту форму. Такий графіт називають відповідно до назви процесу вуглецем відпалу.

При введенні до складу чавуна елементів-каталізаторів, що отримали назву графітизуючих домішок, графіт набуває просторову форму пластин.

Внаслідок модифікування чавуну магнієм або церієм форма графіту куляста.

## 3. КЛАСИФІКАЦІЯ СІРИХ ЧАВУНІВ

Форма графіту впливає істотним чином на фізико-механічні властивості чавунів, що і покладено в основу їх класифікації. Просторова форма графіту є також відмітною структурною ознакою кожного вигляду сірого чавуну.

Сірі чавуни, що отримуються внаслідок відпалу білих і що мають пластівчасту форму графіту, називаються **ковкими.** У термині "ковкі" закладена та обставина, що чавуни з пластівчастою формою графіту володіють невеликою пластичністю. У них $\delta = 2\text{-}12\%$. Вони не піддаються обробці тиском, в тому числі і не куються.

Сірі чавуни, що отримуються внаслідок введення в їх склад графітизуючих домішок, головним чином кремнію, і що мають пластинчасту форму графіту, називаються **ливарними.** Термін "ливарні" відображає та обставина, що структура утворюється безпосередньо в ливарній формі, тобто при виготовленні виливка.

Сірі чавуни, що отримуються шляхом модифікування магнієм або церієм, що мають кулясту форму графіту, названі **високоміцними.** Термін "високоміцні" відображає та обставина, що ці чавуни нарівні з пластичністю

володіють високою міцністю. Остання досягається спеціальною термічною обробкою. У виливках такі чавуни мають структуру:

кулястий графіт + перліт + ледебурит.

Термообробка приводить до розпаду цементиту ледебурита і до часткового або повного розпаду цементиту перліта.

## 4. СІРИЙ ЛИВАРНИЙ ЧАВУН

Для виготовлення виливків передбачаються наступні марки чавуна: СЧ10, СЧ15, СЧ20, СЧ25, СЧ30, СЧ35. На вимогу споживача для виготовлення виливків допускаються марки чавуна СЧ18, СЧ21, СЧ24.

Умовне позначення марки включає букви СЧ (сірий чавун) і цифрове позначення величини мінімальної межі міцності при розтягненні в МПа $\cdot 10^{-1}$ (тобто в кгс/мм$^2$).

***Механічні властивості сірих чавунів***

| Марка чавуну | Межа міцності при розтягненні, $\sigma_в$, МПа (кгс/мм$^2$) | Твердість НВ, МПа (кгс/мм$^2$), не більш |
|---|---|---|
| СЧ10 | 100 (10) | 1900 (190) |
| СЧ15 | 150 (15) | 2100 (210) |
| СЧ18 | 180 (18) | 2100 (210) |
| СЧ20 | 200 (20) | 2300 (230) |
| СЧ21 | 210 (21) | 2300 (230) |
| СЧ24 | 240 (24) | 2300 (230) |
| СЧ25 | 250 (25) | 2450 (245) |
| СЧ30 | 300 (30) | 2600 (260) |
| СЧ35 | 350 (35) | 2750 (275) |

Сірі ливарні чавуни в залежності від швидкості охолоджування і кількості в них графітизуючих домішок, зокрема кремнію (що приводить до повного або часткового розпаду цементиту), діляться на 3 класи по структурі:

а) перлітний сірий чавун або сірий чавун на перлітній основі (рис.1). У полі зору видні темні, іноді з кольоровим забарвленням зерна перліту, що мають довгасті темно-сірі включення пластинчастого графіту (СЧ25, СЧ30, СЧ35);



б) феритний сірий чавун або сірий чавун на феритній основі (рис.2); весь вуглець знаходиться у вигляді графіту. У полі зору видні світлі зерна фериту з включеннями між ними пластинчастого графіту (СЧ10);

в) ферито-перлітний чавун або чавун на ферито-перлітній основі (рис.3). У полі зору видні темні зерна перліту і світлі зерна фериту з включеннями пластинчастого графіту. Звичайно ферит знаходиться в контакті з графітними включеннями (СЧ15, СЧ20).



Рис.1.
Сірий ливарний чавун
на перлітній основі




Рис.2.
Сірий ливарний чавун
на феритній основі

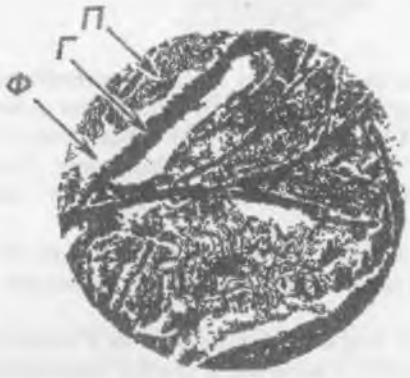



Рис.3.
Сірий ливарний чавун
на ферито-перлітній основі

## 5. ВИСОКОМІЦНИЙ ЧАВУН

Для виготовлення виливків передбачаються наступні марки чавуну: ВЧ35, ВЧ40, ВЧ45, ВЧ50, ВЧ60, ВЧ70, ВЧ80, ВЧ100.

Марка чавуну визначається по межі міцності при розтягненні і умовній межі текучості. Умовне позначення марки включає букви ВЧ - високоміцний чавун і цифрове позначення мінімального значення межі міцності при розтягненні в МПа · $10^{-1}$.

Механічні властивості чавуну після термічної обробки повинні відповідати вимогам, вказаним в таблиці:

***Механічні властивості високоміцних чавунів***

| Марка чавуну | Межа міцності при розтягненні, $\sigma_в$, МПа (кгс/мм$^2$) | Умовна межа текучості,, $\sigma_{0,2}$, МПа (кгс/мм$^2$) |
|---|---|---|
| ВЧ35 | 350 (35) | 220 (22) |
| ВЧ40 | 400 (40) | 250 (25) |
| ВЧ45 | 450 (45) | 310 (31) |
| ВЧ50 | 500 (50) | 320 (32) |
| ВЧ60 | 600 (60) | 370 (37) |
| ВЧ70 | 700 (70) | 420 (42) |
| ВЧ80 | 800 (80) | 480 (48) |
| ВЧ100 | 1000 (100) | 700 (70) |

Високоміцні чавуни отримують внаслідок модифікування чавуну магнієм або церієм. У залежності від способу отримання вони поділяються на 3 класи:

а) високоміцний чавун на перлітній основі (рис.4). У полі зору видні темні зерна перліту, іноді райдужного забарвлення, з включеннями графіту сфероїдальної форми (характерна форма графіту у високоміцних чавунів) (ВЧ70, ВЧ80, ВЧ100);

б) високоміцний чавун на феритній основі (рис.5). У полі зору видні світлі феритні зерна з включеннями графіту сфероїдальної форми (ВЧ35, ВЧ40, ВЧ45);

в) високоміцний чавун на ферито-перлітній основі (рис.6). У полі зору видні темні зерна перліту і включення графіту сфероїдальної форми, оточені феритом (світла складова). Така структура називається "бичаче око" (ВЧ50, ВЧ60).



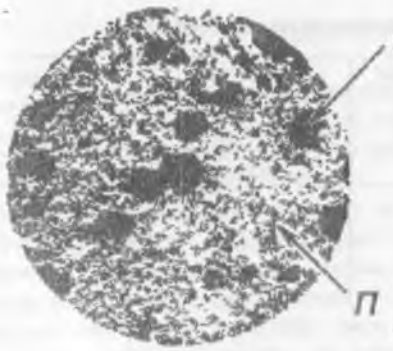



Рис.4.
Високоміцний чавун
на перлітній основі




Рис.5.
Високоміцний чавун
на феритній основі

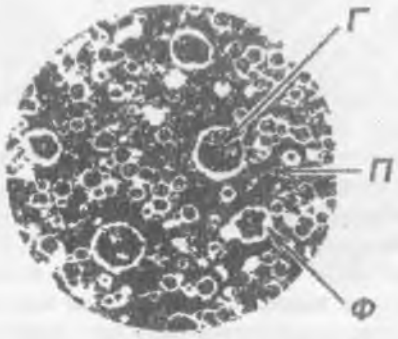



Рис.6.
Високоміцний чавун
на феритно-перлітній основі
(бичаче око)

## 6. КОВКИЙ ЧАВУН

У структурі ковкого чавуну графіт має пластівчасту форму. Такий графіт називають вуглецем відпалу. У порівнянні з сірим ливарним чавуном ковкий чавун володіє більш високою міцністю, пластичністю і в'язкістю. Свою назву він отримав тому, що має підвищену пластичність. Кування в прямому розумінні цього слова чавун не зазнає.

У позначення марки ковкого чавуну входять два числа; перше вказує межу міцності при розтягненні, друге - відносне подовження.

***Механічні властивості ковких чавунів***

| Марка чавуну | Межа міцності при розтягненні, $\sigma_в$, МПа (кгс/мм$^2$) не менш | Відносне подовження, $\delta$, % не менш | Твердість по Брінеллю, НВ МПа (кгс/мм$^2$) не більш |
|---|---|---|---|
| КЧ 30–6 | 294 (30) | 6 | 100–163 |
| КЧ 33–8 | 323 (33) | 8 | 100–163 |
| КЧ 35–10 | 333 (35) | 10 | 100–163 |
| КЧ 37–12 | 362 (37) | 12 | 110–163 |
| КЧ 45–7 | 441 (45) | 7 | 150–207 |
| КЧ 50–5 | 490 (50) | 5 | 170–230 |
| КЧ 55–4 | 539 (55) | 4 | 192–241 |
| КЧ 60–3 | 588 (60) | 3 | 200–269 |
| КЧ 65–3 | 637 (65) | 3 | 212–269 |
| КЧ 70–2 | 686 (70) | 2 | 241–285 |
| КЧ 80–1,5 | 784 (80) | 1,5 | 270–320 |

У залежності від способу отримання ковкі чавуни розділяються на 2 класи:

а) ковкий чавун на перлітній основі, за кольором зламу світло-серцевий (рис.7) (стара назва європейський). У полі зору видні темні зерна перліту іноді райдужного забарвлення з включеннями пластівчастого графіту, який в ковких чавунах називається "вуглець відпалу" (КЧ 45-7, КЧ 60-3);

б) ковкий чавун на феритній основі, за кольором зламу чорно-серцевий (рис.8) (стара назва американський). У полі зору видні світлі феритні зерна з включеннями пластівчастого або округлого графіту (вуглеця відпалу) (КЧ 30-6, КЧ 35-10).

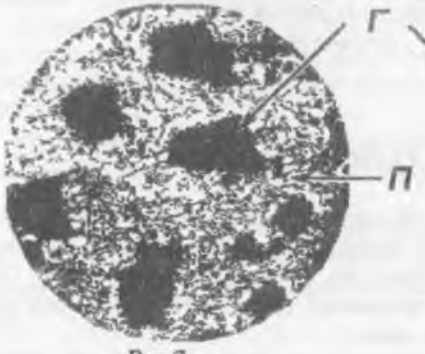



Рис.7.
Ковкий чавун
на перлітній основі

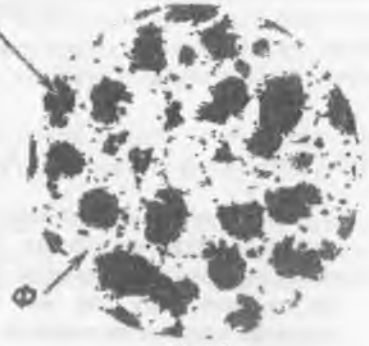



Рис.8.
Ковкий чавун
на феритній основі



## 7. БІЛИЙ ЧАВУН

За вмістом вуглеця і по структурі розділяються на:

а) доевтектичні, вміст вуглеця від 2,14 до 4,3%; структурні складові перліт і ледебурит (рис.9). У полі зору видні великі темні зерна перліту, оточені ледебуритом (строката структура);

б) заевтектичні, вміст вуглеця від 4,3 до 6,67%; структурні складові первинний цементит і ледебурит (рис.10). У полі зору видні світлі довгасті кристали первинного цементиту, оточені ледебуритом (строката структура);

в) евтектичні, вміст вуглеця 4,3%; структурна складова ледебурит (рис.11). У полі зору видні дрібні темні зерна перліту, рівномірно розташовані на світлому фоні цементиту. В окремих місцях перлітні зерна мають неправильну довгасту форму через різну їх орієнтацію до площини шліфа.



Рис.9.
Доевтектичний білий чавун



Рис.10.
Заевтектичний білий чавун



Рис.11.
Евтектичний білий чавун

## 8. ОБЛАСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ЧАВУНІВ

Графіт сприяє тому, що сірі чавуни не схильні до вібрації (в порожнинах, зайнятих графітом, відбувається гасіння вібрацій). Це має велике значення для металоріжучих верстатів, турбін, двигунів внутрішнього згоряння і інших машин і механізмів, що мають рухомі частини і обертаються. Неврівноваженість маси таких частин приводить до виникнення вібрацій, які спричиняють швидке руйнування. У верстатів вібрації призводять до ускладнень обробки, зменшенню точності форми і розмірів. Тому станини верстатів, корпуси турбін і насосів, блоки циліндрів двигунів внутрішнього згоряння і картери виготовляються з сірих чавунів (ливарних), які до того ж володіють хорошими ливарними властивостями (з них значно легше і простіше виготувати виливки, ніж з інших сплавів).

Вкажемо ще на одну чудову властивість графіту - його високу адгезію (здатність прилипання) на сталі. Ця обставина, а також шарувата структура графіту пояснюють високі антифрикційні властивості сірих чавунів. При терті графіт сірого чавуна, попадаючи на поверхню, адсорбується нею. У результаті має місце не тертя сталі по сталі (металевої матриці чавуну), а тертя з графітовим прошарком, що істотно зменшує коефіцієнт тертя і руйнування поверхонь - знос. Завдяки цьому з сірих чавунів виготовляють ряд деталей, працюючих в умовах тертя - циліндрові втулки парових машин, двигунів внутрішнього згоряння і поршневих насосів, гальмові колодки і т.п.

СЧ10 - з нього виготовляють деталі, для яких міцнісна характеристика не є обов'язковою - опоки, арматуру, рамки, кришки, кожухи, масивні будівельні колони, фундаментні плити, корпусні деталі невідповідального призначення.

СЧ15, СЧ18 - з цих чавунів виробляють різні машинобудівні, енергомашинобудівельні, автотракторні і верстатні корпусні малонавантажені деталі, підморотні плити, шківи, маховики, ємкості для масла і охолоджуючої рідини, корпусу фільтрів, фланці, кришки.

СЧ20, СЧ21, СЧ24, СЧ25 - ці чавуни рекомендується застосовувати для виготовлення базових корпусних деталей підвищеної міцності і стійкості проти спрацювання, корпусів коробок передач, шпиндельних бабок, насосів, золотників, арматури, компресорів.

СЧ30, СЧ35 - чавуни цих марок застосовуються для лиття корпусів високої міцності і стійкості проти спрацювання, а також деталей, до яких пред'являються вимоги герметичності під тиском – корпусів, кронштейнів, корпусів насосів, циліндрових втулок і поршневих кілець двигунів внутрішнього згоряння.

*З високоміцних чавунів* виготовляють багато яких деталей (в тому числі фасонні), які раніше отримували з сталі, базові і корпусні деталі підвищеної міцності (корпуси і станини верстатів, великі планшайби, гільзи, каретки, циліндри, кронштейни, зубчасті колеса, колінчасті вали).

*Ковкі чавуни* феритного класу використовують для виготовлення хомутів, гайок, вентилів, деталей сільськогосподарських машин, фланців, муфт, педалей, гайкових ключів. Ковкі чавуни перлітного класу володіють високою міцністю,



помірною пластичністю і хорошими антифрикційними властивостями. З них отримують шестерні, черв'ячні колеса, поршні, підшипники, втулки, муфти.

*Білі чавуни* через високу твердість важко обробляються на верстатах. У зв'язку з цим не застосовуються як конструкційний матеріал. Однак їх висока твердість робить бажаною їх застосування для валків прокатних станів, щок каменедробарок і т.п. деталей.

## 9. КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. У чому складається відмінність чавунів від сталей?
2. По якій металографічній ознаці розрізняють білі і сірі чавуни?
3. Яка форма графіту у сірих ливарних чавунів?
4. Приведіть марку сірого ливарного чавуну і розшифруйте її.
5. Який елемент використовується в якості графітизатора в металургії сірих ливарних чавунів?
6. Укажіть характерні властивості сірих ливарних чавунів.
7. Яка форма графіту в ковких чавунах?
8. Чи зазнають обробки тиском (куванню, прокатці, волочінню) ковкі чавуни?
9. Як отримують виливки зі структурою ковкого чавуну?
10. Приведіть марку ковкого чавуну і розшифруйте її.
11. Яка форма графіту у високоміцних чавунів?
12. Які елементи застосовуються як модифікатор у виробництві високоміцних чавунів?
13. Чому високоміцні чавуни використовуються для виготовлення відповідальних деталей машин і механізмів?
14. Приведіть марку високоміцного чавуну і розшифруйте її.

## 10. ЗМІСТ ЗВІТУ

1. Викласти мету і задачі роботи.
2. Замалювати мікроструктуру шліфів чавунів, що вивчаються. Описати структурні складові. Указати групу, до якої відноситься чавун.
3. Привести зразкові марки вивчених чавунів, їх характерні властивості і область застосування.

# Лабораторна робота №6
# Термічна обробка вуглецевої сталі

Мета роботи: Ознайомитися з практикою проведення термічної обробки сталі, вивчити вплив температури нагріву і швидкості охолоджування на структуру і властивості сталі.

## І. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Необхідні властивості сталі і сплавів можна отримати термічною обробкою.

Термічна обробка сталі (і інших сплавів) складається з нагріву до певної температури, витримки і подальшого охолоджування з метою зміни властивостей шляхом зміни структури сплаву.

Всі основні види термічної обробки сплавів діляться на 5 груп:

1. *Відпал першого роду* полягає в нагріві металу нижче за температуру фазових перетворень для зняття внутрішніх напружень, усунення наклепу пластично деформованого металу (рекристалізаційний відпал) з нагрівом до температури $T_pK \approx 0{,}4T_{пл}K$.

2. *Відпал другого роду* (фазова перекристалізація) полягає в нагріві металу вище за температуру фазових перетворень з подальшим повільним охолоджуванням для отримання стійкого рівноважного стану. Різновид відпалу другого роду, що полягає також в нагріві металу вище за температуру фазових перетворень з подальшим охолоджуванням на повітрі називається нормалізацією.

3. *Гартування* представляє нагрів металу вище за температуру фазових перетворень з подальшим швидким охолоджуванням. Цей вигляд термічної обробки призводить до фіксації переохолодженого (або проміжного) нестійкого стану.

4. *Відпускання* (або старіння) полягає в нагріві загартованих сплавів нижче за температури фазових перетворень для отримання більш стабільного структурного стану сплава.

5. *Хіміко-термічна* обробка складається з нагріву сплава у відповідному хімічному середовищі для зміни структури і складу поверхневого шара.

Перед обробкою різанням на станках заготовки звичайно піддають зміцнюючій термообробці: відпалу або нормалізації.

Після механічної обробки вироби, як правило, піддають зміцнюючій термічній обробці.

Найбільш поширеним видом зміцнюючої термічної обробки вуглецевих сталей, що містять вуглеця більше за 0,3%, є гартування з подальшим



відпусканням. Рідше для конструкційних відпалених сталей використовується нормалізація.

Можливість зміцнення сталей шляхом термічної обробки зумовлена наявністю фазових перетворень в твердому стані: охолоджуючи сталь з аустенітною структурою з різними швидкостями і викликаючи тим самим різну міру переохолодження, можна отримати продукти розпаду аустеніту, різко відмінні по будові і властивостям.

Вплив швидкості охолоджування на температуру розпаду аустеніту евтектоїдної сталі показаний на рис.1.

При відносно невеликих швидкостях охолоджування аустеніт зазнає дифузійного перетворення при температурі 700-550°С (ці температури означаються $Ar_1$) з утворенням структур перлітного типу, представляючих собою механічну суміш кристалів фериту і цементиту, що мають пластинчасту будову.

Дисперсність отриманої суміші зростає (тобто менше розмір пластинок фериту і цементиту) по мірі зниження температури перетворення, одночасно зростають міцність і твердість, і знижуються пластичні властивості сталі. У залежності від міри дисперсності суміші структури називаються перлітом, сорбітом або троститом.

При значних швидкостях охолоджування аустеніт переохолоджується до більш низьких температур, при яких відбувається бездифузійне перетворення з утворенням мартенситної структури.

Мінімальна швидкість охолоджування, що зумовлює перетворення аустеніту в мартенсит, називається критичною швидкістю охолоджування $V_{кр}= V_4$ (рис.1). З збільшенням вмісту вуглеця в сталі критична швидкість охолоджування меншає, при цьому С-образні криві (рис.1) здвигаються праворуч.

Мартенсит являє собою пересичений твердий розчин вуглеця в α -залізі, має тетрагональну кристалічну гратку.

Перетворення аустеніту в мартенсит відбувається в інтервалі температур; на рис.2 показано положення температури початку $M_п$ і кінця $M_к$ мартенситного перетворення. Температурний інтервал мартенситного перетворення залежить від вмісту вуглеця в сталі.

Мартенсит є найбільш твердою і крихкою структурою сталі. Твердість мартенситу залежить від вмісту вуглеця в сталі (рис.3). Спочатку по мірі збільшення вмісту вуглеця твердість сталі збільшується, а потім з появою залишкового аустеніту і збільшення його кількості твердість її мало змінюється і навіть падає.

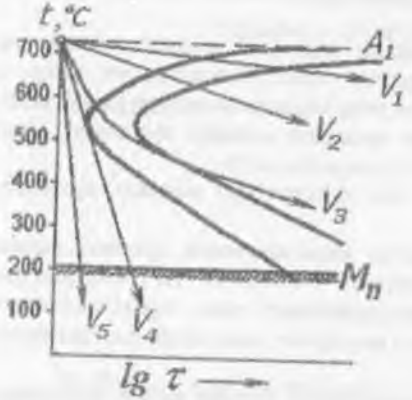



Рис.1.
Вплив швидкості охолоджування на температуру розпаду аустеніту в евтектоїдній сталі. $V_1<V_2<V_3<V_4<V_5$. Критична швидкість гартування $V_4$

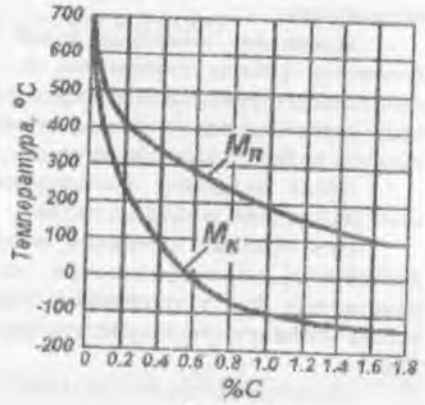



Рис.2.
Вплив вмісту вуглеця на температуру початку і кінця мартенситного перетворення

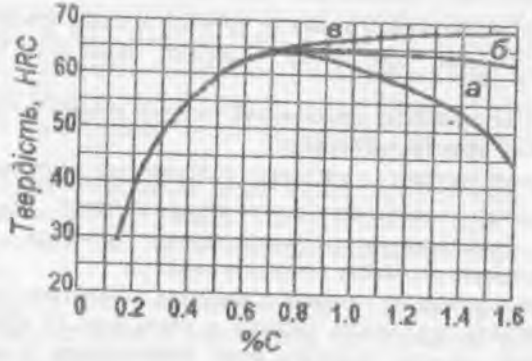



Рис.3.
Вплив вмісту вуглеця на твердість загартованої сталі: *а*) гартування вище за точку $Ac_3$; *б*) гартування заевтектоїдної сталі вище за точку $Ac_1$; *в*) твердість мартенситу



## 2. ГАРТУВАННЯ

Гартування є одним з перших і важливих етапів термічної обробки сталі.

Після гартування різко змінюються мікроструктура, механічні властивості сталі (міцність, твердість, в'язкість), хімічні властивості (однорідність сплаву, корозійна стійкість), фізичні властивості (магнітна проникність, коерцитивна сила, електроопір).

Але призначення гартування сталі – отримання високої твердості і підвищеної міцності.

Визначальними факторами при гартуванні сталі є:

1. Температура нагріву.
2. Час витримки.
3. Швидкість охолоджування.

У залежності від температури нагріву розрізнюють повне і неповне гартування сталі. Повним гартуванням називають гартування з нагрівом до температур однофазної аустенітної області, неповної – з нагрівом до міжкритичних температур, при яких зберігається надлишкова фаза – ферит або вторинний цементит.

Доевтектоїдні сталі піддають повному гартуванню: оптимальною температурою нагріву є температура, що перевищує точку $Ac_3$ на 30-50°С (лінія GS); заевтектоїдні сталі зазнають неповного гартування: оптимальною температурою нагріву є температура, що перевищує точку $Ac_1$ на 30-50°С (лінія SK) (рис.4).

Неповне гартування заевтектоїдної сталі зберігає в структурі вторинний цементит, який підвищує твердість і зносостійкість інструмента, що виготовляється з таких сталей (цементит твердіше за мартенсит). Неповне гартування доевтектоїдної сталі не рекомендується, так як кристали надлишкового фериту знижують твердість.

Час нагріву при гартуванні складається з часу нагріву до заданої температури ($\tau_н$) і часу витримки при цій температурі ($\tau_в$)

$$\tau = \tau_н + \tau_в .$$

Величина $\tau_н$ залежить від нагріваючої здатності середовища, від розмірів і форми деталей, від їх розміщення в печі. $\tau_в$ залежить від швидкості фазових перетворень, яка визначається мірою перегріву вище критичної точки і дисперсністю початкової структури.

Визначення часу витримки зразків при заданій температурі для наскрізного прогрівання і повного структурного перетворення проводиться згідно з наступними нормами для циліндричних зразків:

при температурі 600°С – 100 сек. на кожний мм діаметра.

при температурі 800°С – 50 сек. на кожний мм діаметра.

При нагріві заготовок квадратного перетину цей час повинен бути збільшений в 1,5 рази, а при нагріві пластин – в 2 рази.

У лабораторії нагрів сталі під гартування проводиться в муфельних електропічах.

Охолоджуючими середовищами при гартуванні частіше за все є вода (іноді з доданням солей, лугів або кислот для збільшення охолоджуючої здатності) і рослинні і мінеральні масла.

Гартувальні середовища вибираються в залежності від критичної швидкості гартування. Для вуглецевих конструкційних сталей застосовується вода при температурах не більше за 25°С. Для інструментальних високовуглецевих сталей (із вмістом вуглеця ≥ 0,8%), а також для легованих сталей застосовується масло. Орієнтовно швидкість охолоджування можна прийняти:

у воді – 600 гр/сек, в маслі – 150 гр/сек і на повітрі –30 гр/сек.

Для збільшення швидкості охолоджування необхідно механічно знищити парову сорочку шляхом енергійного рушення деталі в гартувальному середовищі протягом 2-3 секунд.

Гартування сталі супроводиться істотним збільшенням об'єму (до 1%), що в умовах високої швидкості і неодночасності перетворення по об'єму виробу, що загартовується, спричиняє появу значних внутрішніх напружень. Гартувальні напруження можуть привести до викривлення виробу і утворення тріщин в процесі гартування. Крім того, високі внутрішні напруження, що залишилися, можуть спричинити деформацію виробa з течією часу в умовах експлуатації. Тому загартовані деталі машин і інструмент завжди зазнають відпустки.




Рис.4.
Оптимальний інтервал температур нагріву сталі під гартування



## 3. ВІДПУСКАННЯ

Під відпусканням сталі розуміють нагрів загартованої сталі нижче критичних температур $Ac_1$ з подальшим охолоджуванням на повітрі або в маслі. Режим відпускання визначає кінцеві властивості загартованого виробу.

Практичними цілями відпускання є: зменшення гартувальних напружень, зниження твердості загартованої сталі до необхідного рівня, отримання потрібного комплексу механічних. властивостей (міцності, пластичності і в'язкості).

Основним перетворенням при відпусканні є розпад мартенситу – виділення надлишкового вуглеця, що його пересичує, у вигляді дрібних кристаликів карбіду заліза – цементиту. Частковий розпад мартенситу відбувається в загартованій сталі навіть в процесі вилежування при кімнатній температурі, однак з підвищенням температури процес прискорюється і досягає більш повного розвитку. Мартенсит, збіднений вуглецем в процесі відпускання, називається відпущеним. Твердість відпущеного мартенситу майже рівна твердості мартенситу гартування, а пластичні властивості значно зростають. На мікрошліфі голки мартенситу гартування світлі, а у мартенситу відпускання – темні.

Розпад мартенситу при постійному нагріві завершується при температурах біля 400°С. Ферито-цементитна високодисперсна механічна суміш, що при цьому утворюється, називається троститом відпускання. Більш високі температури нагріву викликають процес коагуляції, тобто зростання кристалів цементиту шляхом злиття дрібних кристалів в більш великі. У результаті знижується дисперсність ферито-цементитної суміші, структура наближається до рівноважної.

Структура вуглецевої сталі, отримана після відпускання при 500-650°С, називається сорбітом відпускання, або зернистим сорбітом. Більш високі температури нагріву спричиняють утворення структури зернистого перліту.

Нарівні з вказаним основним перетворенням в інтервалі температур 200-300°С відбувається розпад залишкового аустеніту загартованої сталі: аустеніт перетворюється у відпущений мартенсит. Розпад мартенситу спричиняє зменшення питомого об'єму загартованої сталі, розпад аустеніту – збільшення питомого об'єму сталі. На рис.5 показана зміна питомого об'єму вуглецевих сталей в процесі відпускання, а на рис.6 – зміна .твердості загартованих вуглецевих сталей в залежності від температури відпускання.

У залежності від температури нагріву розрізнюють низьке, середнє і високе відпускання.

*Низьке відпускання* – нагрів загартованої сталі до 180-250°С і подальше охолоджування. Мета: зниження залишкових напружень і підвищення в'язкості без помітного зниження твердості (HRC 58-62). При низькому відпусканні відбувається перетворення мартенситу гартування в мартенсит відпускання і залишкового аустеніту в мартенсит відпускання. Структура низького відпускання – відпущений мартенсит.

Низькому відпусканню звичайно піддають ріжучий і вимірювальний інструмент з вуглецевих і низьколегованих сталей після гартування.

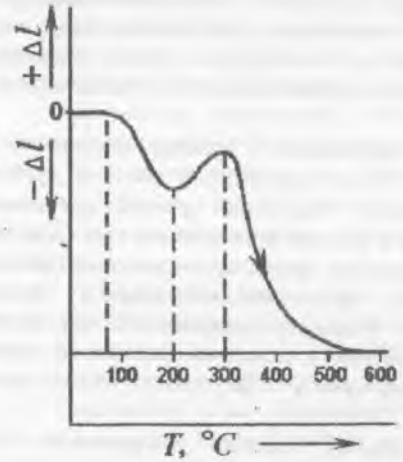



Рис.5.
Зміна об'єма загартованої сталі в процесі відпускання

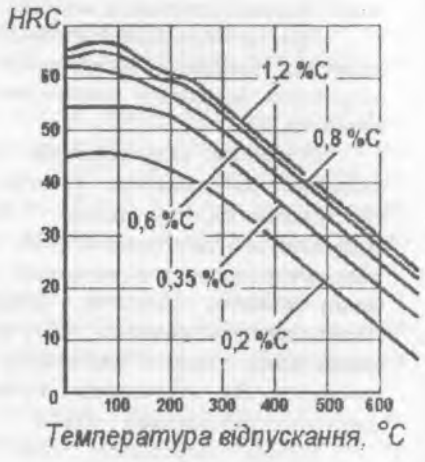



Рис.6.
Вплив температури відпускання на твердість вуглецевих сталей з різним вмістом вуглеця

*Середнє відпускання* – нагрів загартованої сталі до 300-500°С і подальше охолоджування. При середньому відпусканні мартенсит повністю розпадається з утворенням троосститу відпускання.

Застосовується середнє відпускання для пружин і ресор з метою досягнення оптимального поєднання високої межі пружності, в'язкості і міцності, при цьому знижується твердість до HRC 40-50.

*Високе відпускання* – нагрів загартованої сталі до 500-650°– і подальше охолоджування. Його застосовують для повного зняття залишкових напружень і отримання найкращого поєднання міцності, в'язкості і пластичності сталі.

При високому відпусканні повністю відбуваються всі перетворення і утворюється структура сорбіту відпускання. Високому відпусканню звичайно піддають вироби з конструкційної сталі із вмістом вуглеця 0,3-0,5%.

Гартування сталі з подальшим високим відпусканням на сорбіт носить назву термічного **поліпшення**. Останній термін застосовується саме тому, що комплекс механічних властивостей сталі внаслідок вказаної термічної обробки значно вище за властивості її у відпаленому і нормалізованому стані. Ця обробка рекомендується для середньовуглецевих конструкційних сталей.



Порівняння властивостей сорбітної структури, отриманої при нормалізації внаслідок дифузійного перетворення аустеніту, і сорбітної структури, отриманої внаслідок гартування і високого відпускання показує, що при рівній твердості вони мають близькі значення межі міцності, але структура відпускання характеризується істотно більш високими значеннями межі текучості і ударної в'язкості. Причина такої відмінності в тому, що сорбіт відпускання має зернисту будову, тобто округлі кристали цементиту, впроваджені в м'яку феритну основу, на відміну від пластинчастого цементиту і фериту у сорбіті, отриманого внаслідок нормалізації.

## 4. КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Яка мета термообробки?
2. У яких випадках проводять рекристалізаційний відпал?
3. До яких температур нагрівають заготовки при рекристалізаційному відпалі і як проводиться їх охолодження?
4. Укажіть мету повного відпалу, температуру нагріву, швидкість подальшого його охолодження.
5. З якою метою проводиться гартування, охарактеризуйте структуру і властивості правильно загартованої сталі.
6. Чому неповне гартування доевтектоїдної сталі приводить до отримання зниженої твердості після гартування?
7. Чому оптимальну твердість заевтектоїдних сталей забезпечує проведення неповного гартування?
8. Яка роль швидкості охолоджування при гартуванні?
9. З якою метою проводиться відпускання загартованої сталі?
10. Охарактеризуйте структуру і властивості сталі після гартування і низького відпускання.
11. Охарактеризуйте структуру і властивості сталі після гартування і середнього відпускання.
12. Охарактеризуйте структуру і властивості сталі після гартування і високого відпускання.
13. Опишіть суть хіміко-термічної обробки і мету її виконання.
14. Що таке "критична швидкість гартування"?
15. Чим визначається вибір охолоджуючого середовища при гартуванні?
16. Охарактеризуйте мету і суть нормалізації.
17. Яка термообробка застосовується у виробництві ріжучого інструмента?
18. Яка термообробка застосовується у виробництві деталей, працюючих в умовах пружних деформацій (пружин, ресор і т.д.)?
19. Яка термообробка застосовується у виробництві деталей, працюючих в умовах знакозмінних навантажень (вали, осі і т.д.)?
20. Яка термообробка називається "поліпшення" і чому вона забезпечує оптимальні механічні властивості деталей, працюючих в умовах динамічних навантажень.

## 5. ЗМІСТ ЗВІТУ

1. Стисло викласти мету і задачі термічної обробки, класифікацію видів термообробки.

2. Намалювати діаграму ізотермічного розпаду аустеніту (рис.1) з накладенням кривих охолоджування і указати, які структури виходять при різних швидкостях охолоджування сталі, замалювати ці структури.

3. Намалювати частину діаграми $Fe-Fe_3C$ (рис.5) з вказівкою на ній оптимального інтервалу температур для нагріву сталей під гартування.

4. Описати, яку структуру мають доевтектоїдна, евтектоїдна і заевтектоїдна сталі в нагрітому під гартування стані, які перетворення відбуваються внаслідок охолоджування з швидкістю більше критичної, і яку структуру набуває сталь внаслідок гартування.

5. Описати, які фазові і структурні перетворення відбуваються при відпусканні загартованої сталі (при низькому, середньому і високому відпусканні), і як змінюються її властивості.

6. По вказівці викладача описати режими термообробки зразків, що випробовуються, їх структуру і механічні властивості.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ


1. Бузило В.І., Сердюк В.П. Матеріалознавство: Навч. посібник. Дніпро: НТУ «ДП», 2021. – 243 с .
2. Холявко В.В. Механічні властивості та конструкційна міцність матеріалів: Лабораторний практикум / В.В. Холявко, І.А. Владимирський. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 114 с.
3. Копей В., Одосій З., Онисько О.. Технологія машинобудування: Навч. посібник. Ч. 1. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2021. 217 с.
4. Матеріалознавство, технологія конструкційних матеріалів і машинобудування: українсько-англійський тлумачний словник у 2-х книгах. Близько 20 000 слів та словосполучень. Книга 2. О-Я. Є.Г. Афтанділянц [та ін.]. К. Видавничий центр НУБіП України, 2018. 770 с.
5. Стальніченко О.І., Іоргачов Д.В., Іоргачов В.Д. Основи практичної підготовки моряків. Одеса: Астропринт, 2024. 408 с.



Видавець і виготовлювач
Одеський національний морський університет
65029, м. Одеса, вул. Мечникова, 34.
Тел. 0487320688

Свідоцтво
про внесення суб'єкта видавничої справи
в державний реєстр видавців, виготовлювачів
та розповсюджувачів видавничої продукції
ДК № 4242 від 26.12.11 р.

Підписано до друку 01.10.24. Формат 60x84/16.
Папір офсетний. Ум. друк. арк. 5,5.
Замов. № 219 Тираж 50 прим.