

**Міністерство освіти і науки України**  
**Тернопільський національний технічний університет**  
**імені Івана Пулюя**

*Кафедра будівельної механіки*

**Навчальний посібник**  
**з курсу**

**Технологія конструкційних матеріалів та матеріалознавство**  
**Розділ «Матеріалознавство»**  
для студентів спеціальностей:  
131 «Прикладна механіка», 133 «Галузеве машинобудування»,  
208 «Агроінженерія»

**Тернопіль, 2023**

**УДК 621.81621.002.3**

**ББК 30.3**

**Б-75**

*Рекомендовано до друку вченою радою  
Тернопільського національного технічного університету ім. Івана Пулюя  
(протокол №2 від 21 лютого 2023 року)*

**Рецензенти:**

**Бочар І.Й.** – кандидат технічних наук, кафедри сфери обслуговування, технологій та охорони праці Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка

**Золотий Р.З.** – кандидат технічних наук, кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.

**Бодрова Л.Г.**

Б-75 Технологія конструкційних матеріалів та матеріалознавство, розділ Матеріалознавство: Навчальний посібник / Л.Г. Бодрова, Г.М. Крамар, Я.О. Ковальчук, І.В. Коваль – Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2023. – 157 с.

ISBN

Навчальний посібник для студентів закладів вищої освіти. Подана інформація про атомно-кристалічну будову металів і сплавів, їх властивості, методи дослідження, основні групи конструкційних та інструментальних матеріалів. Описано наукові основи вибору та оптимізації режимів термічної обробки, області застосування сучасних матеріалів.

В посібнику приведено довідкові таблиці та діаграми фазового стану сплавів, які дають змогу правильно обрати матеріал з врахуванням технічних вимог та економічної ефективності його застосування, а також тестові завдання для модульного контролю та питання для самопідготовки, які охоплюють весь матеріал курсу.

Посібник буде корисним студентам при вивченні курсу «Технологія конструкційних матеріалів та матеріалознавство», при виконанні курсових та дипломних проектів, а також аспірантам та інженерно-технічним працівникам, робота яких пов'язана з обробкою матеріалів.

**УДК 621.81621.002.3**

**ББК 30.3**

ISBN

© Бодрова Л.Г., 2023

## З М І С Т

Вступ	4	
ТЕМА 1. Макроскопічний аналіз сталевих виробів		5
ТЕМА 2. Вивчення процесу первинної кристалізації	11	
ТЕМА 3. Термічний аналіз металів і сплавів	20	
ТЕМА 4. Пластична деформація і рекристалізація металів	26	
ТЕМА 5. Визначення твердості металів і сплавів методом Брінелля	34	
ТЕМА 6. Визначення твердості металів і сплавів методом Роквелла	38	
ТЕМА 7. Вивчення структури металів і сплавів методом мікроскопічного аналізу	41	
ТЕМА 8. Мікроструктура і властивості вуглецевих сталей у відпаленому стані	51	
ТЕМА 9. Макро- і мікроструктура зварних з'єднань із вуглецевих сталей	56	
ТЕМА 10. Мікроструктура і властивості чавунів	61	
ТЕМА 11. Термічна обробка сталей	69	
ТЕМА 12. Хіміко – термічна обробка сталі	82	
ТЕМА 13. Мікроструктура і властивості легованих сталей	91	
ТЕМА 14. Мікроструктура і властивості інструментальних легованих сталей і твердих сплавів	95	
ТЕМА 15. Мікроструктура і властивості алюмінію і сплавів на його основі	103	
ТЕМА 16. Мікроструктура і властивості міді та сплавів на її основі	109	
ТЕМА 17. Будова і властивості пластмас	118	
Глосарій	123	
Додатки	132	
Додаток 1. Діаграми фазового стану найбільш використовуваних сплавів	133	
Додаток 2. Властивості та характеристики сплавів	140	
Література	156	

## ВСТУП

Навчальний курс «Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство», розділ «Матеріалознавство» – один із основних у циклі технічних дисциплін при підготовці інженерів, які працюватимуть у галузі машинобудування.

При виконанні лабораторного практикуму з матеріалознавства значну увагу приділено навчально-дослідній роботі з вивчення мікроструктури матеріалів, які застосовуються у машинобудуванні, залежності їх властивостей від хімічного складу, структури, способів обробки та умов експлуатації. Вивчення теорії і практики різних способів зміцнення матеріалів та правильного їх вибору дозволяє забезпечити високу надійність і довговічність деталей машин. Знання основних матеріалів, які застосовуються у машинобудуванні, допомагають студентам розробляти раціональні технологічні процеси виробництва як з точки зору якості отриманої продукції, так і з точки зору економічної ефективності.

Теоретичний матеріал відповідає робочій програмі з курсу «Технологія конструкційних матеріалів та матеріалознавство», розділ «Матеріалознавство» для студентів спеціальностей: 131 «Прикладна механіка», 133 «Галузеве машинобудування» та 208 «Агроінженерія».

Метою посібника є забезпечення можливості студентам самостійно оволодіти матеріалом курсу.

## ТЕМА 1. МАКРОСКОПІЧНИЙ АНАЛІЗ СТАЛЬНИХ ВИРОБІВ

**Макроскопічний аналіз** полягає у визначенні будови металів і сплавів неозброєним оком і (або) через лупу при невеликих збільшеннях (до 30 разів).

Макроскопічний аналіз дозволяє робити висновок про будову металу або зразка в цілому. Будову металів, яку вивчають з допомогою макроаналізу, називають **макроструктурою**.

Методи вивчення макроструктури поділяють на три основні групи: **глибокого та поверхневого травлення і відбитків**. Методи травлення дають інформацію про стан матеріалу, дефекти, пов'язані з його отриманням і обробкою.

**Глибоке травлення** дозволяє виявити тріщини, обезвуглецьований, навуглецьований і азотований шари, сегрегації шкідливих домішок, дендритну структуру. Після глибокого травлення макрошліф має рельєфну поверхню, на якій видно елементи макроструктури і дефекти.

**Поверхнєве травлення** дозволяє виявити окремі деталі структури, а також проводити подальші мікроскопічні дослідження. Воно потребує ретельної підготовки поверхні шліфа (тонке шліфування), особливо для оцінювання форми та розміру зерна, встановлення різнозернистості, напрямку росту зерен.

**Метод відбитків** полягає в тому, що зображення макроструктури з'являється не на шліфі, а на фотопапері. Щільність контакту поверхні металу з фотопапером має бути повною, не допускається наявність бульбашок повітря. Реактиви реагують з певними структурними складовими, утворюючи характерне забарвлення структури. Найбільш широко застосовують метод відбитків для виявлення розподілу сірки (метод Баумана).

**Основними завданнями макродослідження є:**

1. Виявлення прихованих вад металу – тріщин, пористості, плівок, рихлості, зональної неоднорідності.
2. Виявлення характеру кристалічної будови металу.
3. Виявлення домішок в металі і характеру їх розподілу.
4. Виявлення будови металу після термомеханічної обробки.
5. Виявлення будови термічно оброблених або зварних виробів (зони гартування, цементації, термічного впливу).

**Виявлення прихованих вад металу.**

Це завдання найчастіше вирішують шляхом глибокого травлення. Таких вад, як тріщини (після гартування), розшарування металу не видно на поверхні навіть за допомогою лупи. Піддаючи вироби з такими вадами дії кислот, ми «розкриваємо» їх внаслідок енергійного роз'їдання поверхні.

Для цієї мети використовують суміш соляної, сірчаної кислот і дистильованої води. Для прискорення дії реактив застосовують в підігрітому до 50°C стані. Час травлення залежно від складу сталі – від 20 хв до 2 год. Цей же реактив використовують для виявлення дендритної структури. В цьому випадку час дії значно менший. Вуглецеві сталі протравлюються ним погано, а хромонікелеві – добре.

Також використовують 20%-ий розчин сірчаної кислоти у підігрітому до 60°C стані (час дії до 2 год.).

### ***Виявлення характеру кристалічної будови.***

В металі можуть утворюватися як зерниста, так і дендритна структура. Дендритна структура є початковою стадією кристалізації металу, подальший розвиток якої призводить до утворення поліедричної або зернистої структури.

При певних методах травлення можна одночасно виявити обидві структури, показавши їх взаємозв'язок. Слабодіючі реактиви, такі, як реактив Гейна (10%-ий водяний розчин подвійної солі хлорної міді й амонію), виявляють в першу чергу границі зерен. Використовуючи більш енергійні реактиви (розчини кислот), можна виявити дендритну структуру. Для виявлення дендритної структури у вуглецевих сталях застосовують реактиви:

– 10%-ий розчин персульфату амонію  $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ , підігрітий при 80-90°C упродовж 5 - 10 хв;

– реактив Кешієна із суміші концентрованих соляної та сірчаної кислот і дистильованої води упродовж 20 - 25 хвилин при кімнатній температурі.

Макрошліф сталі, попередньо протертої спиртом, занурюють шліфованою поверхнею в один із реактивів. Після певного витримання шліфи промивають водою й аналізують.

### ***Виявлення домішок і характеру їх розподілу.***

Хімічний аналіз дає середній вміст елементів у пробі металу, але не дає уявлення про їх розподіл. Неоднорідність хімічного складу за об'ємом виливка, деталі, зерна, яка виникає при кристалізації металу називають **ліквацією**. Найбільш схильні до ліквації сірка, фосфор, в меншій мірі – кремній, марганець, вуглець займає проміжне місце. Спосіб виявлення неоднорідності розподілу домішок базується на різному забарвленні місць із різним їх умістом.

Сірка в сталях є шкідливим елементом і її скупчення на окремих ділянках структури викликає підвищену крихкість. Для виявлення ліквації сірки в сталевих шліфах використовують **метод Баумана**. Для цього необхідно:

- макрошліф добре протерти ватою, змоченою спиртом, і покласти на стіл шліфованою поверхнею вгору;

- лист глянцевого бромистосрібного фотопаперу на світлі вимочити упродовж 5...10 хв у 5%-му водному розчині сірчаної кислоти, підсушити між двома листами фільтрувального паперу для видалення надлишку розчину;

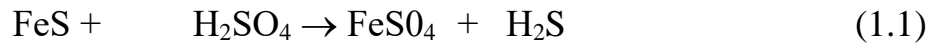
- накласти фотопапір емульсійною стороною на робочу поверхню макрошліфа, прогладити зверху рукою або гумовим валиком для видалення бульбашок повітря;

- витримати фотопапір на макрошліфі упродовж 2...3 хв, стискаючи їх між собою, і обережно зняти фотопапір;

- отриманий відбиток промити водою, зафіксувати в 25%-му водному розчині гіпосульфіту, знову промити водою та просушити.

Отримання на фотопапері ділянок коричневого кольору вказує на місця, збагачені сіркою (скупчення сульфідів). Якщо фотопапір має рівномірне забарвлення, то сірка розміщена рівномірно.

В пограничних шарах металу, де є домішки сірки (у вигляді FeS, MnS) відбувається взаємодія:



Газоподібний сірководень, який виділяється в місцях, де є сірка, діє на фотопапір з утворенням сірчистого срібла. Після цього папір закріплюють у 10-15%-ому розчині гіпосульфїту. На чутливому шарі паперу проявляються темні крапленьня, які відповідають домішкам сірки в металі. Крім того, за відносною густиною краплень можна зробити висновок про ступінь забруднення сіркою. Фосфор цим способом не визначають.

**Метод Гейна** дозволяє виявити ліквіацію фосфору. Шліф, протертий спиртом, занурюють в 10-12%-ий водний розчин подвійної солі хлорної міді і амонію шліфованою поверхнею на 1-2 хвилини. Після промивання шліф сушиться фільтрувальним папером. Місця, збагачені фосфором, забарвлюються в темний колір.

### **Вивчення зламів, їх класифікація і характерні ознаки.**

При макроаналізі широко використовують метод фрактографії. **Фрактографія** вивчає будову зламів. Злам служить своєрідною фотографією процесу руйнування, структурного стану і властивостей матеріалу в локальному об'ємі.

Для аналізу використовують свіжоутворену поверхню руйнування без механічних пошкоджень, слідів окиснення, бруду тощо. Наявність оксидів, слідів масла, фарби може дати додаткову інформацію про умови утворення тріщини. Аналіз макрозламу починають з огляду поверхні руйнування неозброєним оком або за допомогою лупи (збільшення 5...10 разів) і повільно переходять до збільшення в 20...120 разів.

При проведенні макроаналізу злам оцінюють і класифікують за такими **основними ознаками**: орієнтація поверхні руйнування, макрогеометрія, ступінь пластичної деформації, шорсткість, колір.

Орієнтація зламу пов'язана з характером навантаження і напруженим станом, нормальними і дотичними напруженнями, які визначають руйнування.

**За орієнтацією поверхні руйнування** злами класифікують на прямий, косий (навскісний) і прямий з навскісним (чашковий).

**Прямим** (рис. 1.1) називають злам, поверхня якого орієнтована нормально до осі зразка або виробу, тобто перпендикулярно напрямку найбільших розтягуючих зусиль. Така орієнтація зламу є характерною ознакою крихкого руйнування.

**Косий** злам, поверхня якого нахилена під кутом до осі зразка, утворюється шляхом зрізу в площині найбільших напружень. Такий злам спостерігається при руйнуванні анізотропних матеріалів з обмеженою пластичністю.

**Прямий злам зі скосом** (чашковий) утворюється при розтягуванні гладких циліндричних зразків (найчастіше конструкційних легованих сталей) і характеризується наявністю на поверхні волокнистої будови, розміщеної в середній частині перерізу зразка, перпендикулярно напрямку розтягуючих напружень, і бокових зрізів, орієнтованих приблизно під 45° до основної поверхні руйнування.

Формування «чашки» пов'язане з утворенням шийки в деформованому зразку, що призводить до значних бокових і осьових напружень у центрі зразка.

Наявність бокових зрізів країв зламу є ознакою макров'язкого руйнування. За максимальної реалізації пластичності матеріалу в зоні руйнування при розтягуванні можуть утворитися повністю *конічні* злами, характерні лише для дуже пластичних матеріалів (свинець, чистий алюміній, електролітична мідь).

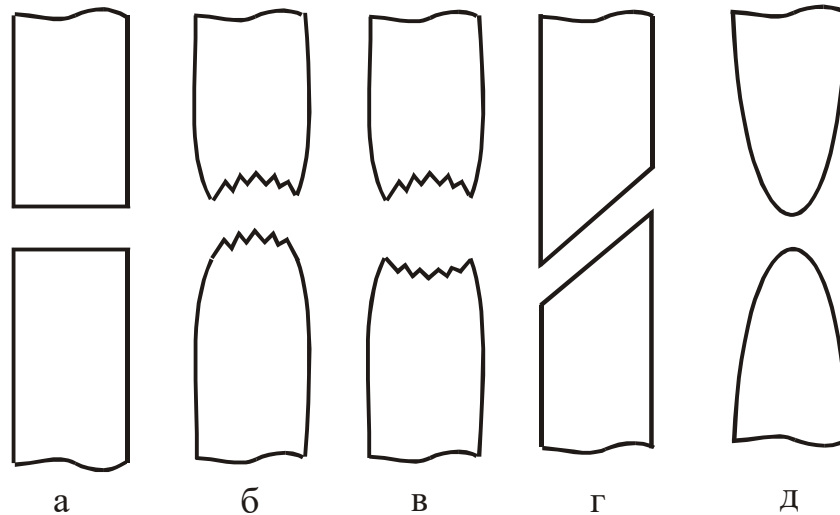


Рис.1.1. Характерні види зламів при розтягуванні  
а) прямий, б) прямий і з скосами типу «чашка – конус»,  
в) прямий зі скосами типу "подвійна чашка", г) косий, д) конічний.

Вид зламу є критерієм оцінювання якості матеріалу. Існує умовний поділ зламів на крихкі й пластичні.

**За макрогеометрією** злами поділяють на однорідні та неоднорідні.

Для *однорідних* зламів характерна морфологічно однакова поверхня, що спостерігається рідко, наприклад, при руйнуванні дуже крихких матеріалів, вуглецевих сталей за низьких температур.

Більшість зламів *неоднорідні*. Це може бути зумовлено двома причинами:

– неоднорідністю досліджуваного матеріалу за хімічним складом, структурою, властивостями (анізотропністю матеріалу);

– особливостями процесу руйнування, пов'язаними з вихідною неоднорідністю напруженого і деформованого стану.

Неоднорідність поверхні зламу візуально помітна за зміною шорсткості на різних ділянках зламу. При *втомному руйнуванні* за шорсткістю на поверхні зламу можна виділити ділянки зародження тріщини 2, розвитку втомного руйнування 3 (мала шорсткість) та статичного доламу 4 (висока шорсткість) (рис. 1.2). Крім того, на зразку показано надріз (концентратор напружень).

Для ділянки втомного руйнування 3 характерна дрібнозерниста структура, гладка матова поверхня.

Ділянка доламу формується на заключній стадії руйнування, коли внаслідок втомного руйнування величина поперечного перерізу зменшується до критичної величини і циклічні напруження досягають границі міцності. В крихких матеріалах зона доламу має крупнокристалічну структуру, а для в'язких матеріалів



характерними є волокниста будова та пластичні підтяжки вздовж периферії зразка (рис. 1.2 б, поз. 4).

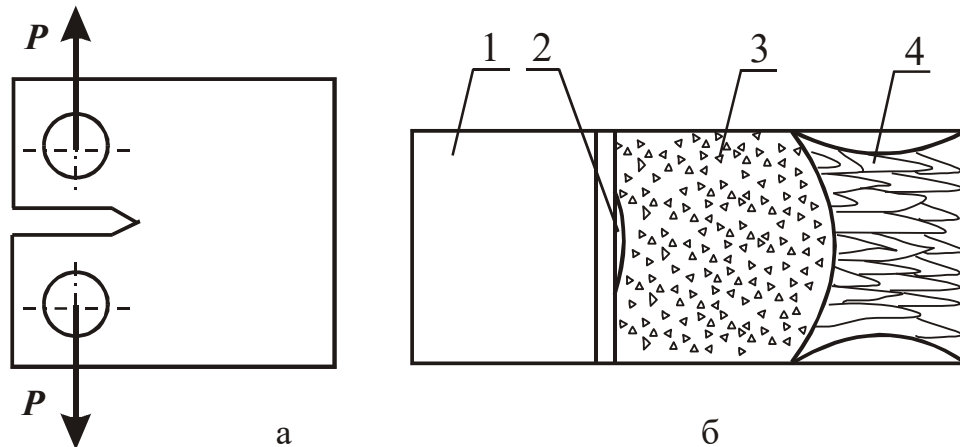


Рис. 1.2. Стандартний зразок для випробовування матеріалів на міцність під дією циклічних навантажень (а) та фрактограма втомного зламу (б)

У реальних конструкціях концентраторами напружень, з яких може розпочатися втомне руйнування, бувають:

- конструктивні (канавки, уступи, проточки тощо);
- технологічні (низька якість механічної обробки, тріщини після обробки тиском або термічної обробки);
- металургійні дефекти (структурна неоднорідність матеріалу, ліквації сірки та фосфору в сталі тощо).

Фрактографічні дослідження є обов'язковими при експертному оцінюванні поверхонь руйнування в реальних конструкціях. Ці результати дають можливість визначити причини руйнування для їх усунення в майбутньому.

Класифікація зламів *за шорсткістю поверхні*.

Наявність кристалічного зламу є однією із характерних ознак крихкого руйнування, а наявність волокнистого – в'язкого. До числа дефектів, які неможливо усунути і які викликані порушенням технології термічної і гарячої механічної обробки, належить нафталінистий злам, що має крупнозернисту будову й утворює на поверхні гладкі, блискучі фасетки неметалічного виду.

*За ступенем пластичної деформації* злами ділять на *крихкі, квазікрихкі і в'язкі*.

Відмінність *за кольором* є однією із характерних ознак зламів, пов'язаних з будовою, умовами випробовування і наявністю легуючих елементів у сталі. Вуглецеві сталі мають сріблястий колір зламу, нікелеві – світло-сірий. Марганець надає зламу сталі характерний тьмянний сірий колір.

### Контрольні питання

1. Що таке макроаналіз, його суть?
2. Завдання макроаналізу.
3. Що таке макроструктура?
4. Які вади металу називають «прихованими», їх характеристика?
5. Можливі домішки в металі.

6. Види кристалічної будови металу.
7. Види зламу металу.
8. Реактиви, їх характеристика, вибір.
9. Дендритна і зерниста будова металу.
10. Вплив фосфору і сірки на властивості сталі.
11. Як розміщуються домішки в металі?
12. Що таке ліквіація?
13. Що таке анізотропія, поліморфізм?
14. В чому полягає метод Баумана?
15. Як і для чого аналізують металеві вироби після зварювання, хіміко-термічної обробки?
16. Вплив легуючих металів на колір зламу.

## ТЕМА 2. ВИВЧЕННЯ ПРОЦЕСУ ПЕРВИННОЇ КРИСТАЛІЗАЦІЇ

Метали залежно від температури і тиску можуть перебувати в трьох агрегатних станах: кристалічному, рідкому та газоподібному. У стані газу вони не відрізняються від неметалів, а у рідкому та кристалічному станах мають специфічні властивості. Такі властивості металам надає *металевий тип зв'язку* – тобто зв'язок, зумовлений взаємодією електронного газу й іонів ґратки металу.

Кристал типового металу можна розглядати як сукупність позитивно заряджених іонів, що знаходяться в середовищі вільних *колективізованих електронів*. При зближенні атомів металу їх валентні електрони розташовуються не на зовнішніх орбітах, а займають широкий енергетичний рівень і можуть досить легко переміщуватися всередині металу. Цим пояснюється високі тепло- і електропровідність металів.

Наявність великої кількості вільних електронів визначає ненаправлений характер металевого зв'язку, завдяки чому іони металу можуть легко зміщуватися зі своїх місць під дією зовнішньої сили. Цим зумовлена висока пластичність металів.

Для кристалічного стану характерні закономірне розташування атомів у просторі. *Кристалічна ґратка* – закономірне розміщення атомів (іонів), що характеризується періодичною повторюваністю у просторі, властиве твердим кристалічним тілам.

*Елементарна кристалічна ґратка* – це мінімальна сукупність атомів, яка при багатократному повторенні в просторі дозволяє відтворити просторову кристалічну ґратку.

Для металів характерними є такі *типи* елементарних кристалічних комірок: *кубічна об'ємноцентрована* (ванадій, ніобій, тантал, хром, літій, натрій,  $\alpha$ -залізо,  $\beta$ -титан та ін.), *кубічна гранецентрована* (мідь, срібло, золото, алюміній, свинець, платина,  $\gamma$ -залізо та ін.), *гексагональна компактна* (берилій, магній, кадмій, цинк,  $\alpha$ -кобальт,  $\alpha$ -титан,  $\alpha$ -цирконій), *тетрагональна* (індій,  $\beta$ -олово,  $\gamma$ -марганець).

*Основними характеристиками* кристалічних ґраток є: *параметр* або період комірки – це найменша відстань між сусідніми атомами в напрямках осей координат; *координаційне число* – кількість рівновіддалених найближчих сусідів вибраного атома;

*базис* – кількість атомів, що припадають на одну елементарну кристалічну комірку; *щільність упаковки (коефіцієнт компактності)* – відношення об'єму елементарних частинок, які відповідають одній елементарній комірці, до всього об'єму елементарної комірки. Для простої кубічної решітки цей коефіцієнт дорівнює 0,52, для ОЦК – 0,68, ГЦК – 0,74.

Кристали металів мають, як правило, невеликі розміри. Тому реальний металевий виріб складається з великої кількості кристалів. Таку будову називають *полікристалічною*. В полікристалічному агрегаті окремі кристали мають неправильну форму, їх називають *зернами* або *кристалітами*.

Для кристалічних тіл, в т.ч. і металів, характерні такі властивості, як анізотропія та поліморфізм.

*Анізотропія* – це векторіальність властивостей матеріалів у різних кристалографічних напрямках. Вона зумовлена різною кількістю іонів та різними

відстанями між ними і, отже, різними значеннями сил зв'язку між іонами в різних напрямках у кристалі.

**Поліморфізм** – це наявність у багатьох металів і деяких неметалів різних типів кристалічних ґраток залежно від тиску і температури. Різні кристалічні ґратки одного й того ж елемента називають його поліморфними модифікаціями і позначають початковими літерами грецької абетки, починаючи із низьких температур ( $Fe_{\alpha}$ ,  $Fe_{\gamma}$ ;  $Co_{\alpha}$ ,  $Co_{\beta}$ ;  $Mn_{\alpha}$ ,  $Mn_{\beta}$ ,  $Mn_{\gamma}$ ,  $Mn_{\delta}$ , та ін.).

**При поліморфному перетворенні різко змінюються властивості металів і сплавів: теплоємність, теплопровідність, електропровідність, магнітні, механічні, хімічні тощо.**

Кристалічна будова реальних металів і сплавів не є ідеальною, тобто періодичність розташування атомів (іонів) у кристалічній ґратці порушується численними **дефектами** – недосконаlostями її будови. До них належать **точкові, лінійні та поверхневі** мікроефекти. Існують також об'ємні макроефекти. До точкових дефектів належать вакансії, міжвузлові та домішкові атоми і їх комплекси. До лінійних дефектів відносять дислокації – лінійні та гвинтові. Поверхневі дефекти – це межі зерен і структурних елементів, з яких складаються зерна. До об'ємних дефектів відносять пори і домішки інших фаз.

Процес утворення твердої кристалічної фази із рідини називають **первинною кристалізацією**. Форма, величина і напрямки кристалів впливають на фізико-механічні властивості металів і сплавів.

Процес переходу кристалічного тіла з однієї фази в іншу зумовлений тим, що новий стан є енергетично стійкішим і має менший запас вільної енергії. Цей перехід відбувається з виділенням (при кристалізації) або поглинанням (при плавленні) прихованої теплоти. Виділення або поглинання прихованої теплоти пояснює збереження сталої температури протягом алавлення або кристалізації.

Кристалізація починається після деякого переохолодження рідкої речовини нижче рівноважної температури кристалізації  $T_s$  (рис.2.1). При температурі  $T_s$  обидві фази (рідка і тверда) знаходяться у рівноважному стані.

Процес кристалізації може проходити тільки при переохолодженні металу нижче рівноважної температури  $T_s$ . Різниця між теоретичною  $T_s$  і реальною  $T_{кр}$  температурами кристалізації називають **ступенем переохолодження**:

$$\Delta T = T_s - T_{кр} \quad (2.1.)$$

Ступінь переохолодження не є сталою величиною. Вона залежить від швидкості охолодження, природи і чистоти металу (рис.2.2). Процес первинної кристалізації проходить у **дві стадії**:

- а) утворення центрів кристалізації;
- б) ріст кристалів.

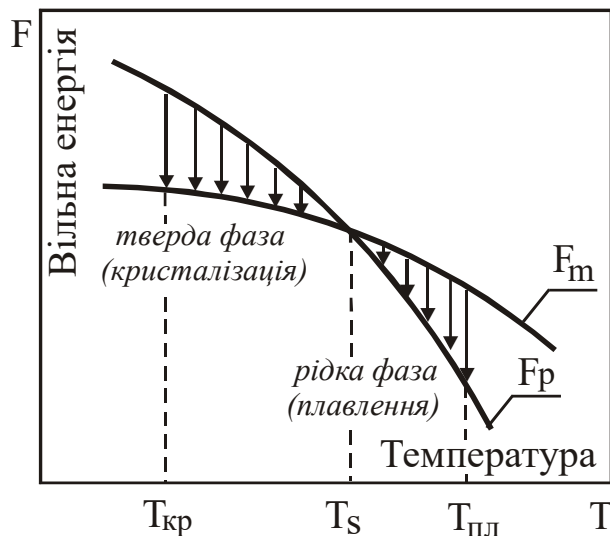


Рис. 2.1. Зміна вільної енергії рідкої і твердої фази залежно від температури.

Існує два механізми утворення центрів кристалізації: *самочинний і гетерогенний*.

*Самочинне* утворення зародків проходить у високочистому рідкому металі. Для рідини характерний ближній порядок у розташуванні атомів, тобто лише в окремих мікрооб'ємах зберігається впорядковане розташування атомів, що відповідає твердому стану. Внаслідок теплового руху ближній порядок нестійкий, а тому зі зниженням температури збільшується кількість і розмір таких мікрооб'ємів. При температурах кристалізації деякі з них перетворюються у зародки твердої фази. Утворення зародків викликає зменшення вільної енергії за рахунок переходу деякого об'єму з рідкого стану в твердий. Подальший ріст твердої фази пов'язаний зі зменшенням поверхневої енергії. Ріст зародків із розмірами меншими критичного призводить би до росту запасу внутрішньої енергії, що суперечить природі самого процесу.

*Критичним розміром* зародка називають мінімальний розмір зародка, здатного до росту. При утворенні зародка розміром менше критичного, вільна енергія системи зростає, тобто приріст її внаслідок утворення вільної поверхні переважає її зменшення в результаті утворення твердої фази (рис.2.2.).

Після утворення зародка проходить подальший ріст кристалів шляхом переходу атомів металу з рідкого стану на поверхню зародка.

*Гетерогенне* утворення зародка проходить на готових підкладках, якими є тверді частинки в сплаві, стінки форми, виливниць при умові, що поверхнева енергія між підкладкою і твердою фазою менша поверхневої енергії між зародком і твердою фазою. В реальних умовах утворення центрів кристалізації проходить за гетерогенним механізмом.

Число центрів кристалізації (ЧЦ) самочинно утворених в металі, і швидкість росту кристалів (ШР) залежить від ступеню переохолодження системи, яка, в свою чергу, залежить від швидкості охолодження (рис.2.4).

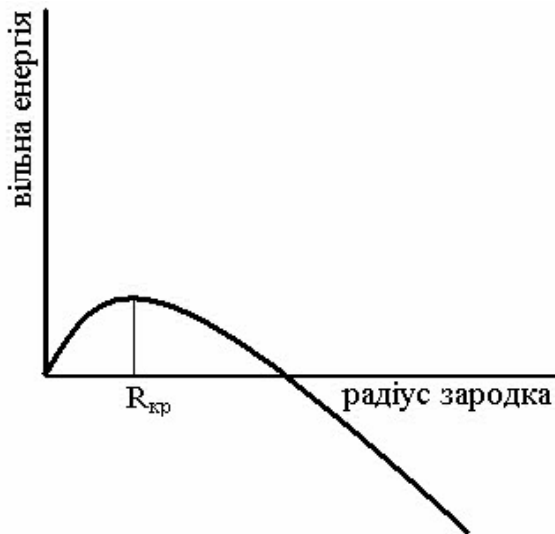


Рис.2.2. Зміна вільної енергії залежно від розміру зародка.

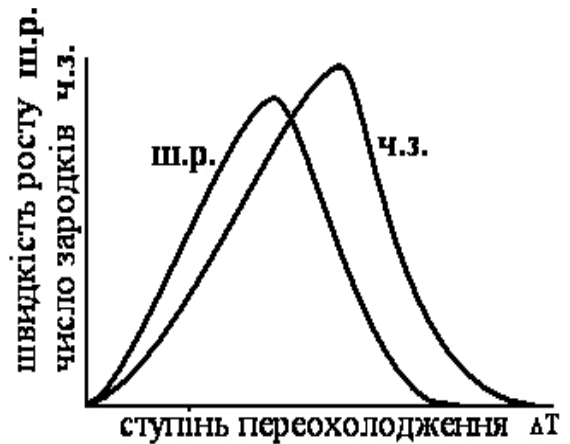


Рис.2.3. Швидкість росту кристалів і число зародків кристалізації залежно від ступеня переохолодження.

За відсутності переохолодження (при температурі  $T_s$ ) число зародків і швидкість їх росту дорівнюють нулю і процес кристалізації не відбувається.

Зі збільшенням ступеня переохолодження зростає число центрів і швидкість їх росту. Проте швидкість утворення зародків випереджує швидкість їх росту. Експериментально доведено, що для даного ступеню переохолодження ЧЗ і ШР є сталими величинами протягом усього часу затвердіння (постулат Д.К.Чернова).

Кристалізація при великих ступенях переохолодження сприяє утворенню дрібнозернистої структури. Отже, змінюючи швидкість охолодження, можна отримати зерна різної величини, а, відповідно, і впливати на властивості металів.

Розмір зерен залежить від числа зародків і швидкості росту:

$$d = 1,1 (\text{ШР} / \text{ЧЗ})^{3/4} \quad (2.2).$$

На процес кристалізації впливають й інші фактори, такі як: наявність домішок, газових включень, температура металу і форми, чистота поверхні виливниці.

Часто на практиці при розливці рідких металів користуються процесом штучного регулювання зерна, який носить назву *модифікування*. При цьому в метал вводять в невеликій кількості домішки різних речовин, які практично не змінюючи хімічного складу сплаву, сприяють утворенню дрібнозернистої структури. Такі речовини називають *модифікаторами*. Модифікатори поділяють на дві групи:

I-го роду – речовини, які знаходяться у розплавленому металі в твердому стані;

II-го роду – речовини, які розчинені в рідкому металі (поверхнево-активні).

*Модифікатори першого роду* є додатковими центрами кристалізації і повинні мати вищу температуру плавлення, ніж основний метал та бути з ним ізоморфними.

*Модифікатори другого роду* при утворенні зародка утворюють на його поверхні плівку, яка утруднює доступ атомів металу з рідкої фази на поверхню зародка.

Форма кристалів суттєво залежить від швидкості охолодження та наявності нерозчинених частинок, напряму тепловіддачі та ін.

Швидка і нерівномірна тепловіддача призводить до утворення *дендритних* кристалів. Кристалізація в цьому випадку починається з утворення осі кристалу, яка росте в напрямку основної тепловіддачі. Далі осі розгалужуються і кристал набуває дендритної будови. Процес завершується тим, що заповнюються всі міжосьові проміжки і кристал набуває округлої форми, витягнутої в напрямку основної тепловіддачі. Такі кристали називають *стовбчастими дендритами*. Дендритна форма кристалу зберігається тільки в тому випадку, якщо не вистачає металу для заповнення всіх міжосьових порожнин.

У випадку, коли процес проходить при повільній і рівномірній кристалізації, тобто коли кристали ростуть з однаковою швидкістю в усіх напрямках, то їх форма буде *зернистою* або *поліедричною*.

Процес кристалізації зручно досліджувати на прикладі насичених розчинів солей, які на відміну від металів є прозорими, не потребують високих температур нагрівання і мають ті ж особливості механізму кристалізації та характер і будову кристалів, що і метали.

### Контрольні запитання

1. Будова кристалічних тіл.
2. Властивості кристалічних тіл.
3. Металевий тип зв'язку.
4. Типи кристалічних ґраток, їх характеристики.
5. Дефекти кристалічної будови.
6. Будова зерна металу. Монокристал і полікристал.
7. Анізотропія. Поліморфізм.
8. Первинна кристалізація.
9. Ступінь переохолодження.
10. Стадії і механізми процесу кристалізації.
11. Ближній і дальній порядки.
12. Фактори, що впливають на величину і форму зерна.
13. Модифікатори, їх класифікація.

### Приклад тестових завдань для модульного контролю до розділу «Атомно-кристалічна будова металів, процеси плавлення і кристалізації»

1. Які із приведених груп металів не схильні до поліморфізму?
  1. Кольорові.
  2. Рідкоземельні.
  3. Чорні.
  4. Благородні.
2. В яких умовах кристалізації можна одержати дрібнозернисту структуру?
  1. При  $\Delta t$  (ступень переохолодження) = 0.
  2. При  $\Delta t \rightarrow \infty$ .

3. При  $\dot{\epsilon}$  (швидкості утворення центрів)  $>$  ш.к. (швидкості кристалізації).
4. При ш.к.  $>$   $\dot{\epsilon}$ .
3. При створенні яких умов можна одержати крупнозернистий метал?
1.  $\Delta t = 0$ .
  2.  $\Delta t \rightarrow \infty$ .
  3.  $\dot{\epsilon} >$  ш.к.
  4. ш.к.  $>$   $\dot{\epsilon}$ .
4. Скільки поліморфних перетворень має залізо?
1. 1.
  2. 2.
  3. 3.
  4. 4.
5. Які із дефектів будови металу не відносять до атомно-кристалічних?
1. Вакансії.
  2. Міжвузельні атоми.
  3. Блоки мозаїки.
  4. Дислокації.
6. З якою метою вводять модифікатори при кристалізації?
1. Для підвищення пластичності.
  2. Для подрібнення структури.
  3. Для зниження температури кристалізації.
  4. Для підвищення температури кристалізації.
7. Зміна типу кристалічної решітки металу під дією зовнішніх факторів носить назву:
1. Анізотропії.
  2. Гомогенізації.
  3. Поліморфізму.
  4. Ізотропії.
8. Що відноситься до дефектів структурного характеру металів?
1. Вакансії.
  2. Блоки мозаїки.
  3. Міжвузельні атоми.
  4. Дислокації.
9. На чому ґрунтується дія модифікаторів I роду?
1. На зміні хімічного складу сплаву.
  2. На прискоренні процесу кристалізації.
  3. Збільшенні кількості зародків кристалізації.
  4. Збільшенні швидкості росту кристалів.
10. В чому полягає принципова різниця між рідким та твердим кристалічним станом?
1. В меншому порядку розташування атомів.
  2. В наявності “ближнього порядку”.
  3. В меншому порядку та стабільності розташування атомів в рідині.
  4. В меншій стабільності розташування атомів.
11. Чому дорівнює базис кубічної гранецентрованої решітки?
1. 2.
  2. 3.
  3. 4.
  4. 6.
12. За яких умов кристалізації є можливим одержання аморфного металу?
1. При повільному охолодженні.



2. При  $\Delta t = 0$ .
  3. При прискореному охолодженні.
  4. При надшвидкому охолодженні.
13. Який із факторів не впливає на гомогенну кристалізацію?
1. Флуктуація густини металу.
  2. Флуктуація енергії металу.
  3. Температура плавлення.
  4. Наявність «ближнього порядку».
14. До якої групи речовин відносяться модифікатори II роду?
1. Тугоплавних речовин.
  2. Ізоморфних речовин.
  3. Легкоплавних речовин.
  4. Поверхнево-активних речовин.
15. Який фізичний зміст температури  $T_s$ ?
1. Початок кристалізації.
  2. Початок плавлення.
  3. В рівновазі існує 2 фази – тверда кристалічна та рідка.
  4. Кінець кристалізації.
16. Сформулюйте фізичну суть теплових ефектів. Вони відображають:
1. Кількість виділеного при реакції тепла.
  2. Зміну вільної енергії системи.
  3. Зміну теплоємності (тепловмістимості) системи.
  4. Зміну ентальпії системи.
17. Який тип решітки, із приведених нижче, не зустрічається в чистих металах?
1. Гексагональна.
  2. Тригональна.
  3. Кубічна.
  4. Тетрагональна.
18. Яке співвідношення періодів та кутів характерне для тетрагональної решітки?
1.  $a=b=c$ ;  $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ .
  2.  $a \neq b \neq c$ ;  $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ .
  3.  $a=b \neq c$ ;  $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ .
  4.  $a=b \neq c$ ;  $\alpha=\beta=\gamma=120^\circ$ ;  $\delta=90^\circ$ .
19. Який із приведених нижче металів не належить до групи чорних?
1. Co.
  2. Mn.
  3. Zn.
  4. Ti.
20. Чому дорівнює координаційне число примітивної кубічної решітки?
1. 4.
  2. 6.
  3. 8.
  4. 12.
21. При створенні яких умов можна одержати аморфний метал?
1.  $\Delta t = 0$ .
  2.  $\Delta t \rightarrow \infty$ .
  3. ч.з > с. к.
  4. с. к. > ч.з.
22. Які із приведених груп металів не схильні до поліморфізму?

1. Кольорові.
  2. Рідкоземельні.
  3. Чорні.
  4. Благородні.
23. Які із приведених нижче властивостей не властиві для кристалічних тіл:
1. анізотропія;
  2. ізотропія;
  3. алотропія (поліморфізм);
  4. гомогенність.
24. Який тип решітки, із приведених нижче, не властивий металам?
1. Гексагональна.
  2. Тригональна.
  3. Кубічна.
  4. Тетрагональна.
25. Якого типу кристалічної решітки в металах не існує?
1. Гексагональна щільно упакована.
  2. Гексагональна гранецентрована.
  3. Кубічна об'ємноцентрована.
  4. Тетрагональна.
26. Який із факторів в значній мірі впливає на процес кристалізації?
1. Хімічний склад металів.
  2. Ступінь переохолодження.
  3. Швидкість охолодження.
  4. Величина вільної енергії системи.
27. Якого типу взаємодії компонентів не існує в сплавах?
1. Хімічна взаємодія.
  2. Розчинення компонентів.
  3. Утворення впорядкованих механічних сумішей.
  4. Утворення ковалентних в'язків.
28. Що не відображають критичні точки на кривій охолодження металу?
1. – температури дослідження металу.
  2. – температури початку та кінця кристалізації.
  3. – температури фазових перетворень.
  4. – температури поліморфних перетворень.
29. Що не відноситься до структурних дефектів металів?
1. Фрагменти зерен.
  2. Блоки мозаїки.
  3. Зерниста будова.
  4. Примісні атоми.
30. Які основні властивості металів?
1. Висока густина пакування атомів в кристалах, хороша електропровідність і пластичність.
  2. Металічний блиск і теплопровідність.
  3. Висока пластичність і міцність.

4. Від'ємний температурний коефіцієнт електропровідності, металічний блиск, пластичність, висока електро- і теплопровідність, висока густина.

### ТЕМА 3. ТЕРМІЧНИЙ АНАЛІЗ МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ

**Термічний аналіз** металів і сплавів полягає у визначенні температур фазових поліморфних перетворень. Він ґрунтується на наявності теплового ефекту перетворення. Будь-яке перетворення в металі (плавлення, кристалізація, поліморфні перетворення) супроводжується поглинанням або виділенням тепла – тепловим ефектом. Графічне зображення зміни температури в часі при охолодженні носить назву **кривої охолодження**. Температури початку і кінця фазових та поліморфних перетворень, які визначають за кривими охолодження, називають критичними точками.

Правильність побудови кривих охолодження перевіряють за допомогою **правила фаз** (закон Гіббса), яке встановлює взаємозв'язок між кількістю компонентів, фаз та числом ступенів вільності системи і визначається за формулою:

$$C = K + 1 - \Phi, \quad (3.1)$$

де  $C$  – число ступенів вільності, тобто кількість факторів рівноваги (концентрація, температура), які можуть змінюватися незалежно при незмінній кількості фаз;

$K$  – кількість компонентів системи;

$\Phi$  – кількість фаз.

З рівняння (3.1) можна зробити висновок, що існує одна температура, за якої система знаходиться в рівновазі у двофазному стані. Це означає, що процес кристалізації проходить при сталій температурі – ізотермічно. У подвійній системі в рівновазі найбільше може бути три фази, в потрійній системі – чотири і т.д, тобто не більше  $K + 1$ .

Отримавши велику кількість кривих охолодження для сплавів різного хімічного складу, можна побудувати діаграму фазового стану цієї системи.

Якщо переносити критичні точки ряду сплавів даної системи в координати температура (вісь ординат) – концентрація (вісь абсцис) на вертикалі відповідних сплавів і з'єднати температури початку (лінія ліквідус) і кінця кристалізації (лінія солідус), то отримаємо графічне зображення фазового і структурного стану сплавів даної системи, тобто **діаграму стану**.

На рис. 3.1 зображено діаграму стану системи Pb-Sn. Ця система є важливою для мікроелектроніки завдяки широкому застосуванню свинцево-олов'янистих припоїв. Кожна точка діаграми відповідає сплаву певного складу, що знаходиться за певної температури в умовах рівноваги. З діаграми стану видно, що при зміні складу сплаву змінюється його температура плавлення. Коли при виготовленні мікросхеми потрібно провести декілька послідовних паянь, то для кожного наступного паяння потрібно застосовувати припой з нижчою температурою плавлення, щоб не розплавити попередні місця паяння.

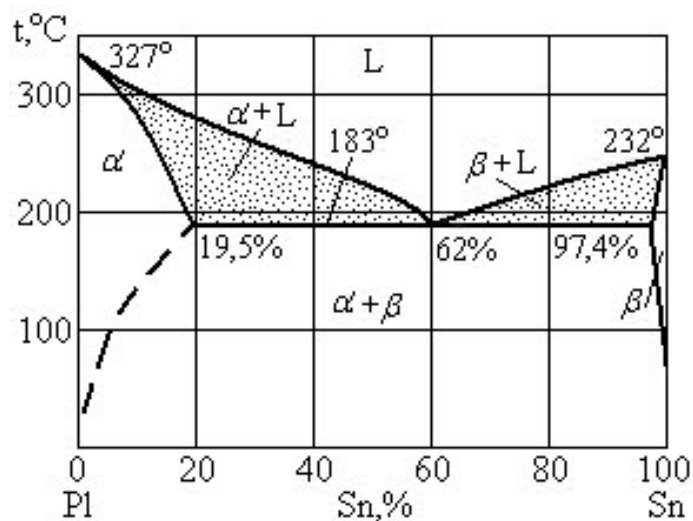


Рис.3.1. Діаграма стану Pb-Sn.

На рис.3.2 зображено схему установки для визначення критичних точок металів і сплавів. До її складу входять електронагрівник 1, який розплавляє досліджуваний сплав 3 в тиглі 2, накритому кришкою. Для контролю за зміною температури використовують термоелектричний пірометр. До його складу входять термопара 5, її оболонки 6, з'єднувальні провідники 7 та термовольтметр 8.

**Термопара 5** – це дві дротини з різних металів зі спаяними кінцями з одного боку, а інші з'єднані з гальванометром. Гарячий спай термопари 4 призначений для розміщення в зоні визначення температури. Матеріали дротин підібрані таким чином, що при їх сумісному нагріванні в ділянці гарячого спаю виникає різниця потенціалів, величина якої змінюється зі зміною температури. Два інших кінці дротин термопари з'єднані з провідниками 7 (холодні спаї), які йдуть до гальванометра 8.

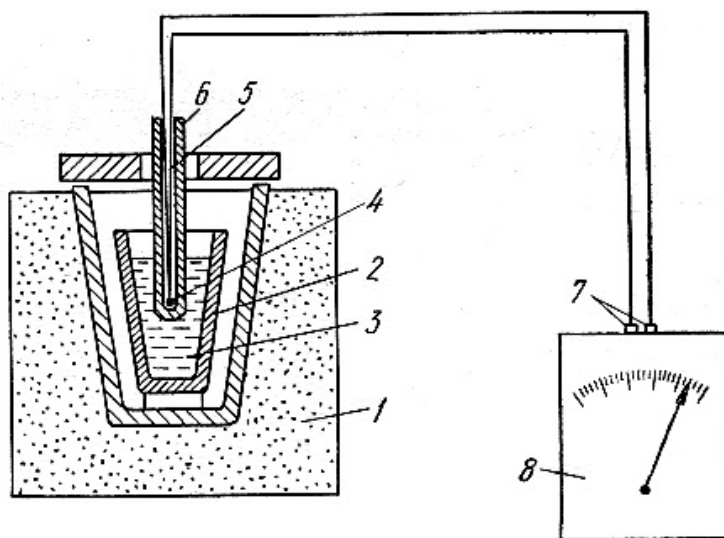


Рис.3.2. Схема установки для визначення критичних точок металів і сплавів методом термічного аналізу.

Гальванометр фіксує різницю потенціалів, отриману на термопарі. Шкала гальванометра протарована не в мілівольтах, а в градусах Цельсія, тому такий

гальванометр (мілівольтметр) називають *термовольтметром*. Чим вищою є температура гарячого спаю термопари, тим більше відхиляється стрілка термовольтметра. Залежно від робочої температури використовують різні термопари.

В техніці найширше застосування знайшли термопари (за матеріалом дротин): платино-платинородієві, ПП-1 (0...1300°C); хромель-алюмельові, ХА (0...1000°C); хромель-копельові, ХК (0...600°C); мідь-константанові, МК (0...400°C).

Для вимірювання температури в сплавах Pb - Sn використовують мідь-константанову термопару з інтервалом температур від 290 до 400 °С (*константан* – сплав, що складається з 58,8% Cu, 1,2% Mn і 40% Ni).

### Контрольні запитання

1. Основні види взаємодії компонентів у сплавах.
2. Правила фаз і відрізків.
3. Зв'язок між діаграмами стану і властивостями сплавів.
4. Криві охолодження чистих металів і сплавів.
5. Аналіз кривих охолодження із застосуванням правила фаз.
6. Основні методи побудови діаграм стану.
7. Евтектична кристалізація. Діаграма стану I роду.
8. Діаграма стану II роду.
9. Діаграми стану III роду.
10. Діаграми стану IV роду.
11. Діаграми стану з поліморфними перетвореннями в компонентах.

### Приклад тестових завдань для модульного контролю до розділу «Теорія сплавів та діаграми фазового стану»

1. В яких координатах будують діаграми фазового стану?
  1. Температура – час.
  2. Концентрація – час.
  3. Температура – концентрація.
  4. Температура – тиск.
2. Який фізичний зміст вертикалі проведеної через діаграму фазового стану?
  1. Температура плавлення чистого компоненту.
  2. Сплав певної концентрації, що розглядається в широкому інтервалі температур.
  3. Сплав, що розглядається при певній температурі.
  4. Ордината чистого компоненту.
3. Яке із позначень фаз характеризує обмежений твердий розчин?
  1. AnBn.
  2.  $\alpha$ .
  3.  $\gamma = A(B)$ .
  4. B.
4. Що характеризує лінія солідус на діаграмі?
  1. Ізотермічне перетворення.

2. Початок кристалізації сплавів.
3. Евтектичне перетворення.
4. Кінець кристалізації.
5. Яких поліморфних модифікацій заліза не існує?
  1. Fe<sub>α</sub>.
  2. Fe<sub>β</sub>.
  3. Fe<sub>γ</sub>.
  4. Fe<sub>ε</sub>.
6. Використовуючи правило фаз, встановити, яка із приведених відповідей правильно характеризує температурні умови кристалізації чистого металу.
  1.  $C = 1 - 2 + 1 = 0$ .
  2.  $C = 1 - 1 + 1 = 1$ .
  3.  $C = 2 - 1 + 1 = 2$ .
  4.  $C = 2 - 2 + 1 = 1$ .
7. Який тип взаємодії компонентів описує діаграма III роду?
  1. Хімічну взаємодію в твердому стані.
  2. Обмежену розчинність у твердому стані.
  3. Евтектичну кристалізацію чистих компонентів.
  4. Необмежену розчинність в рідкому та твердому стані.
8. Перетворення рідкої фази на впорядковану механічну суміш двох твердих фаз при сталій температурі називається:
  1. Евтектоїдним перетворенням.
  2. Евтектичним перетворенням.
  3. Перитектичним перетворенням.
  4. Перитектоїдним перетворенням.
9. Якого типу фаз не існує в структурі металічних сплавів?
  1. Диполів.
  2. Твердих розчинів.
  3. Хімічних сполук.
  4. Чистих компонентів.
10. Що із перерахованого нижче не є фазою?
  1. – Хімічна сполука.
  2. – Твердий розчин.
  3. – Чистий компонент.
  4. – Механічна суміш.
11. Як позначається на діаграмі фазового стану сплав, що розглядається в інтервалі температур?
  1. – Вертикальною лінією.
  2. – Горизонтальною лінією.
  3. – Точкою.
  4. – Похилою лінією.
12. Який метод дослідження металів та сплавів є основним при побудові діаграм фазового стану?
  1. Металографічний.
  2. Термічного аналізу.
  3. Хімічного аналізу.
  4. Фрактографічний.

13. Проекція точки перетину коноди з лінією ліквідус на вісь концентрацій показує:
5. Склад рідкої фази.
  6. Склад твердої фази.
  7. Склад сплаву.
  8. Фазовий склад.
14. Що характеризує лінія ліквідус на діаграмі?
5. Изотермічне перетворення.
  6. Початок кристалізації сплавів.
  7. Евтектичне перетворення.
  8. Кінець кристалізації.
15. Якого типу взаємодії компонентів не існує в сплавах?
5. Хімічна взаємодія.
  6. Розчинення компонентів.
  7. Утворення впорядкованих механічних сумішей.
  8. Утворення ковалентних зв'язків.
16. Що із перерахованого нижче є фазою:
1. Твердий розчин.
  3. Евтектика.
  3. Евтектоїд.
  4. Механічна суміш.
17. Як називається правило, яке визначає склад фаз в діаграмах стану подвійних систем?
1. Правило відрізків.
  2. Правило концентрацій.
  3. Правило конод.
  4. Правило фаз.
18. Яка із найпростіших діаграм стану описує хімічну взаємодію компонентів у твердому стані?
1. I роду.
  2. II роду.
  3. III роду.
  4. IV роду.
19. Який тип діаграм стану характеризує необмежену розчинність компонентів як у рідкому так і у твердому стані?
1. I роду.
  2. II роду.
  3. III роду.
  4. IV роду.
20. Скільки типів кристалічних решіток (сингоній) існує у природі?
1. 3.
  2. 5.
  3. 7.
  4. 10.
21. Який тип взаємодії в твердому стані характеризує діаграма II роду?
1. Обмежену розчинність.
  2. Необмежену розчинність.
  3. Евтектичну кристалізацію.
  4. Хімічну взаємодію.
22. Якою є кількість фаз, що знаходяться в рівновазі при евтектичному перетворенні у двохкомпонентній системі?
1. 1.
  2. 3.





## ТЕМА 4. ПЛАСТИЧНА ДЕФОРМАЦІЯ І РЕКРИСТАЛІЗАЦІЯ МЕТАЛІВ

**Деформацією** називається процес зміни форми і розмірів тіла під дією зовнішніх сил.

Процес деформації складається з таких послідовних етапів:

- а) пружна деформація, яка зникає після зняття навантаження;
- б) пластична або залишкова деформація, яка зберігається після зняття навантаження;
- в) руйнування матеріалів.

### **Процес деформації в одному кристалі.**

Існує цілий ряд методів отримання монокристалів таких великих розмірів, що з них можна виготовити зразки для дослідження і по них спостерігати процес деформації одного кристалу.

Найбільш простим методом вирощування монокристалів є метод місцевого охолодження розплавленого металу, результатом чого є ріст зерна з одного центру кристалізації.

Реальний кристал не має ідеально правильного розміщення атомів в усьому об'ємі. Він складається із окремих блоків, по різному орієнтованих. Переважно один блок повернутий по відношенню до іншого на кут декілька хвилин.

На границях блоків спостерігаються вільні вузли ґратки, тобто пружне зміщення значної кількості атомів. При пружній деформації монокристалу під дією зовнішніх сил змінюється відстань між атомами в кристалічній ґратці. Зняття навантаження усуває зміну міжатомної відстані і деформація зникає.

Пластична деформація пов'язана з переміщенням атомів всередині кристалу і зумовлює залишкову зміну форми.

Пластична деформація в кристалах може здійснюватись двома способами: **ковзанням і двійникуванням.**

В основному процес пластичної деформації монокристалу здійснюється шляхом послідовних ковзань тонких шарів атомів - блоків по відношенню до інших по визначених кристаліграфічних площинах.

Зародками ковзання є групи зміщених один відносно одного атомів. Зсув виникає в місці, де існує дислокація, яка поширюється шляхом багатократного пробігу дислокації в даній площині під дією дотичних напружень.

Щоб здійснити зсув в металі (монокристалі) з ідеально правильною кристалічною будовою, необхідно перемістити всі атоми в площині зсуву, число яких  $10^{14}$  /см<sup>2</sup>. Для цього необхідно було б зусилля в сотні, тисячі разів більше, ніж в реальних умовах. Такий зсув існує, як ідеальний, теоретично можливий.

Міцність металу з ідеальним механізмом зсуву називається теоретичною:

$$\sigma_{\text{теор.}} = Nf; \quad (4.1)$$

де: N – число атомів в площині руйнування, що приходяться на одиницю площі поперечного перерізу,

f – сила взаємного притягування атомів.

Механізм зсуву реальних кристалів пояснює теорія дислокацій (рис.4.1.).



Рис.4.1. Залежність міцності металів від кількості дислокацій.

Так як реальні метали ідеально правильної кристалічної будови не мають, то реальний зсув – це процес переміщення дислокацій. Тому міцність реальних металів значно менша теоретичної:

$$\sigma_{\text{реальна.}} = \alpha \sigma_{\text{теор.}} \quad (4.2)$$

де:  $\alpha$  – коефіцієнт, який враховує збільшення числа атомів, що одночасно беруть участь в елементарних актах руйнування.

Реальну міцність металів можна підвищити:

- а) наклепом,
- б) термічною обробкою,
- в) легуванням,
- г) отриманням структур із зміцнюючими фазами.

Площинами найлегшого зсуву є площини з найменш щільною упаковкою атомів. В металах, які мають кубічну об'ємноцентровану ґратку ( $\text{Fe}_\alpha$ , Cr, W та інші), площинами легкого ковзання є діагональні площини (110). В гранецентрованій ґратці ( $\text{Fe}_\gamma$ , Cu, Al, Ni та ін) – площини октаедра (111).

Кожний зсув викликає спотворення ґратки в пограничних шарах атомів на площині ковзання. Одночасно зі зсувом спостерігається зміна орієнтації площин ковзання по відношенню до діючої сили.

При подальшому збільшенні навантаження ковзання перекидається на другу площину і викликає тут зміцнення, потім на третю і т. д.

В результаті пластичної деформації монокристал стає розділеним лініями ковзання на пружно деформовані зміцнені ділянки. Процес деформації при рості напружень закінчується руйнуванням.

Пластична деформація в металах Cu, Ag, Ni та інші, може здійснюватись шляхом двійникування, суть якого полягає в зсуві частини кристалу в інше положення, симетричне залишеній частині, відносно площини двійникування.

#### ***Пластична деформація полікристалічного металу.***

Структура металів і сплавів складається із великої кількості довільно орієнтованих зерен (кристалів), які мають неправильну зовнішню форму. При деформації полікристалічного металу на процес пластичної деформації всередині окремих зерен накладається ще і міжкристалічна деформація, тобто крім ковзання і

двійникування в кожному зерні, зерна повертаються і ковзають окремо один від одного.

Пластична деформація полікристалічного металу неоднорідна, що пояснюється неодинаковою орієнтацією кристалів. Під дією зовнішнього навантаження в першу чергу починають деформуватись зерна, в яких площини легкого ковзання розміщені найбільш зручно по відношенню до прикладеної сили. Але деформація цих зерен утруднена сусідніми зернами, які мають інше розміщення площин ковзання.

Першою ознакою залишкової деформації металу є поява в зернах лінії зсуву. Лінії зсуву є навіть при незначних деформаціях.

При подальшому збільшенні ступеня деформації блоки і площини ковзання в кожному зерні повертаються в напрямку деформації. Така визначена орієнтація зерен називається текстурою деформації (рис. 4.2 б), а мікроструктура текстурованого металу - волокнистою. Метал стає при цьому анізотропним.

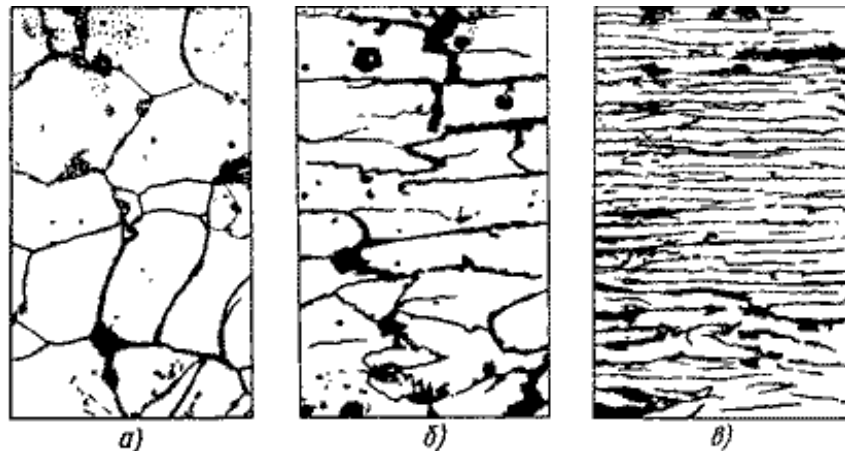


Рис. 4.2. Структура металу до (а) і після (б, в) деформації.

Зміна структури деформованого металу викликає зміну механічних властивостей. Із збільшенням ступеня деформації підвищуються границя міцності і твердість з одночасним зниженням пластичності (рис.4.3).

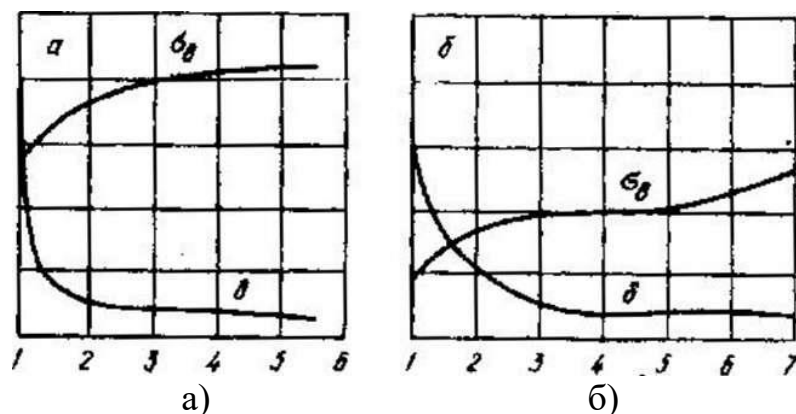


Рис.4.3. Зміна механічних властивостей міді (а) та алюмінію (б) залежно від ступеня пластичної деформації.

Зміцнення металу під дією пластичної деформації називається **наклепом**.

### **Рекристалізація металів.**

Пластична деформація, яка викликає спотворення кристалічної ґратки, подрібнення блоків первинних зерен і перетворення їх у витягнуті волокна, підвищує рівень вільної енергії металу. Деформований метал знаходиться в термодинамічно нестійкому стані, тому в нагартваному металі спонтанно протікають процеси, які приводять його в стійкий стан. Швидкість цих процесів зростає з підвищенням температури.

В нагартваному металі при нагріванні протікають такі процеси:

- а) поворот першого роду,
- б) поворот другого роду або полігонізація;
- в) первинна рекристалізація або рекристалізація;
- г) вторинна (збиральна) рекристалізація.

При нагріванні нагартваного металу до невисоких температур проходить часткове зняття спотворень кристалічної ґратки в межах зерна і внутрішніх напружень. Механічні властивості металу і мікроструктура при цьому не змінюється. Це **процес повороту 1-го роду**.

Процес **полігонізації або повороту 2-го роду** протікає в металі при напруженій і спотвореній кристалічній ґратці. Кристалічні зерна внаслідок переміщення дислокацій стають розділені на блоки із неспотвореною кристалічною ґраткою. В процесі повороту 2-го роду проходить часткове відновлення властивостей без помітних змін мікроструктури.

Процес **первинної рекристалізації** проходить при нагріванні деформованого металу до температур, які викликають зародження нових центрів кристалізації і ріст зерен навколо них за рахунок деформованих кристалів. Структура металу цілком замінюється новими зернами різної орієнтації.

В процесі рекристалізації таких металів як Al інколи нові зерна ростуть орієнтовано, утворюючи так звану текстуру рекристалізації. Найнижча температура при якій під мікроскопом виявляють нові зерна, називається **температурою рекристалізації**. Її визначають за законом Бочвара:

$$T_{\text{рек.}} = a \cdot T_{\text{пл}}, \quad (4.3)$$

де  $T_{\text{рек.}}$  – температура рекристалізації,

$a$  – коефіцієнт, що залежить від чистоти металу:

$a = 0,1 - 0,2$  для металів високого ступеню чистоти;

$a = 0,3 - 0,4$  для технічно чистих металів;

$a = \text{до } 0,8$  для сплавів,

$T_{\text{пл.}}$  – температура плавлення.

Температура рекристалізації для кожного металу не є постійною. Вона залежить від ступеня деформації і від наявності домішок. Домішки, які є в металі, сповільнюють процес рекристалізації.

У зв'язку зі зміною структури металу в процесі рекристалізації різко змінюються механічні властивості: міцність і твердість знижуються, а пластичність зростає.

Нові зерна після заповнення всього об'єму металу - дрібні. При подальшому підвищенні температури протікає процес *вторинної (збиральної) рекристалізації*, який полягає у звичайному рості зерен, причому крупні зерна ростуть за рахунок малих.

Рушійною силою процесів повороту і первинної рекристалізації є прагнення до переходу в стан з мінімальним запасом об'ємної вільної енергії, рушійною силою процесу вторинної (збиральної) рекристалізації є прагнення до переходу в стан з мінімальним запасом поверхневої вільної енергії.

Зв'язок між величиною утворених при рекристалізації зерен, ступенем деформації і температурою виражає діаграма рекристалізації. Як правило, чим більший ступінь деформації і нижча температура рекристалізації, тим дрібніше зерно. При малих ступенях деформації (8-15%) величина зерна після рекристалізації може стати значно більшою. Такий ступінь деформації називають *критичним*.

Утворення в результаті рекристалізації дуже великих зерен різко зменшує пластичність металу, тому потрібно уникати критичного ступеня деформації.

### **Контрольні запитання**

1. Будова моно- і полікристалічного тіла.
2. Види недосконалостей кристалічної будови і їх вплив на властивості.
3. Що таке дислокація? Як змінюється міцність зі збільшенням числа дислокацій?
4. Реальна і теоретична міцність металів, шляхи підвищення реальної міцності.
5. Механізм пружної і пластичної деформації.
6. Ідеальний і реальний зсув.
7. Вплив холодної пластичної деформації на структуру і властивості металів.
8. З якою метою використовується холодна пластична деформація?
9. Поворот і рекристалізація. Як визначити температуру рекристалізації?
10. Що таке критичний ступінь деформації?
11. Вплив температури рекристалізації і ступеня деформації на структуру і властивості металів.
12. Що таке холодна і гаряча пластична деформація металів?

### **Приклад тестових завдань для модульного контролю до розділу «Пластична деформація та рекристалізація металів»**

1. Як змінюються властивості металів під дією пластичної деформації:
  1. Зростає пластичність і зменшується міцність.
  2. Зростає міцність і твердість.
  3. Зростає в'язкість.
  4. Зменшується пластичність і міцність.
2. Якої структури набуває деформований метал:
  1. Пластинчастої.
  2. Голчастої.
  3. Волокнистої.
  4. Зернистої.
3. Текстура деформації це:

1. Крупнозерниста структура.
  2. Дрібнозерниста структура.
  3. Крупноголчаста структура.
  4. Волокниста структура.
4. В чому полягає суть явища наклепу?
1. Зміцненні металлу.
  2. Пом'якшенні металлу.
  3. Зняття внутрішніх напруг.
  4. Переродженні структури.
5. Суть явища рекристалізації?
1. Перехід металу з рідкого в твердий кристалічний стан.
  2. Перехід кристалічного металу в рідкий стан.
  3. Перехід рідкого металу в аморфний стан.
  4. Зміна структури пластично деформованого металу при нагріванні до певної температури.
6. Який із факторів не впливає на процес рекристалізації?
1. Температура.
  2. Тиск.
  3. Час.
  4. Ступінь пластичної деформації.
7. Якої стадії процесу рекристалізації не спостерігається?
1. Первинної.
  2. Вторинної.
  3. Третинної.
  4. Збираючої.
8. Критичному ступеню деформації відповідає:
1. Мінімальний розмір зерна після рекристалізації.
  2. Волокниста структура.
  3. Максимальний розмір зерна після рекристалізації.
  4. Голчаста структура.
9. Температура рекристалізації металу залежить від:
1. Температури плавлення.
  2. Чистоти металу.
  3. Напруженого стану.
  4. Типу кристалічної решітки.
10. При визначенні  $t_{\text{рекр.}}$  металу згідно правила Бочвара ( $t_{\text{рекр.}} = \alpha \cdot T_{\text{пл.}}$ , К) коефіцієнт  $\alpha$  для високочистих металів дорівнює:
1. 0,1 – 0,2.
  2. 0,3 – 0,4.
  3. 0,6 – 0,8.
  4. 0,8 – 1,0.
11. Деформація металу нижче температури рекристалізації називається:
1. Критичною.
  2. Холодною.
  3. Гарячою.

4. Попередньою.
12. Гаряча пластична деформація відбувається за наступних умов:
1.  $T_{\text{деф.}} = T_{\text{рекр.}}$ .
  2.  $T_{\text{деф.}} < T_{\text{рекр.}}$ .
  3.  $T_{\text{деф.}} > T_{\text{рекр.}}$ .
13. Процес рекристалізації відбувається за наступним механізмом:
1. Дифузійним.
  2. Зародковим.
  3. Поліморфним.
  4. Ступінчатим.
14. Який із наступних металів не наклепується при кімнатній температурі?
1. Sn ( $T_{\text{рекр.}} = -33^{\circ}\text{C}$ ).
  2. Al ( $T_{\text{рекр.}} = 100^{\circ}\text{C}$ ).
  3. W ( $T_{\text{рекр.}} = 800^{\circ}\text{C}$ ).
  4. Fe ( $T_{\text{рекр.}} = 550^{\circ}\text{C}$ ).
15. Якими структурними змінами супроводжується вторинна (збираюча) рекристалізація?
1. Подрібненням зерна.
  2. Зникненням текстури деформації.
  3. Утворенням конгломератів зерен.
  4. Ростом розміру зерна.
16. Яка термічна обробка дозволяє усунути явище наклепу?
1. Нормалізація.
  2. Повний відпал.
  3. Відпуск.
  4. Рекристалізаційний відпал.
17. Які зміни не відбуваються на мікроструктурному рівні в процесі пластичної деформації?
1. Подрібнення блоків мозаїки.
  2. Двійникування зерен.
  3. Ріст густини дислокацій.
  4. Падіння внутрішніх напруг II і III роду.
18. Що лежить в основі механізму пластичної деформації металів?
1. Переповзання дислокацій.
  2. Дифузія атомів.
  3. Ідеальний скол структури.
  4. Двійникування зерен.
19. До якого типу дефектів належать дислокації?
3. Лінійних.
  4. Точкових.
  5. Поверхневих.
  6. Структурних.
20. Тепловий гістерезис системи це:
1. Різниця між теоретичною та реальною температурами кристалізації.



2. Різниця між реальними температурами плавлення та кристалізації.

3. Різниця між реальною та теоретичною температурами плавлення.

## ТЕМА 5. ВИЗНАЧЕННЯ ТВЕРДОСТІ МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ МЕТОДОМ БРІНЕЛЛЯ

**Твердість** – це властивість поверхневого шару матеріалу чинити опір пластичному деформуванню або руйнуванню при місцевій контактній дії. У техніці використовують різноманітні методи вимірювання твердості. Найпоширенішими є **методи Брінелля, Роквелл, та Віккерса**, а також вимірювання мікротвердості. Ці методи ще називають методами втискання. Крім них, використовують методи подряпинок, відбивання, ультразвуковий та ін.

Для багатьох сплавів виявлена залежність між твердістю та іншими механічними, технологічними й експлуатаційними характеристиками матеріалів (міцність, зносостійкість, пластичність, здатність оброблятися тиском, різанням тощо). Наприклад, для деяких пластичних матеріалів залежність між межею міцності та твердістю за Брінеллем записується у вигляді

$$\sigma_s = K \cdot HB, \quad (5.1)$$

де  $HB$  – твердість за Брінеллем, МПа;  $K$  – коефіцієнт пропорційності ( $K=0,35$  – для сталі;  $0,55$  – для міді та її сплавів у відпаленому стані;  $0,4$  – для міді та її сплавів після наклепування).

Таким чином, знаючи твердість матеріалу, можна оцінити й інші його характеристики.

Суттєвою перевагою експериментальних методів визначення твердості є те, що всі вони неруйнівні, тобто для їх реалізації не потрібно виготовляти спеціальні зразки, а величина твердості визначається на поверхнях готових деталей без їх пошкодження.

### **Визначення твердості за Брінеллем**

Умови визначення твердості за Брінеллем регламентуються державним стандартом. Схема визначення твердості показана на рис.5.1.

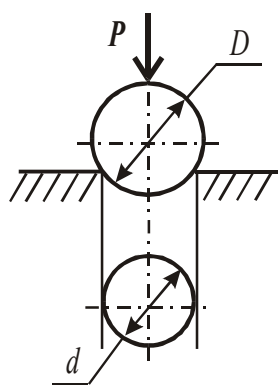


Рис. 5.1.  
Схема визначення  
твердості за Брінеллем

**Число твердості за Брінеллем  $HB$**  визначають як відношення величини навантаження  $P$ , яким втискали кульку, до площі поверхні отриманого сферичного відбитка (лунки),  $F$ :

$$HB = P/F = 2P/\pi D \left( D - \sqrt{D^2 - d^2} \right). \quad (5.2)$$

Діаметр відбитка визначають за допомогою спеціальної лупи, яка має шкалу з ціною поділки  $0,02$  мм.

У поверхню зразка за допомогою твердоміра Брінелля втискають сталю загартовану кульку (*індентор*) діаметром  $D$ , який може бути рівним 2,5; 5 або 10 мм. Діаметр кульки вибирають у зворотній залежності від очікуваної твердості (див. табл. 5.1). Внаслідок пластичної деформації поверхневих шарів зразка отримується відбиток у вигляді сферичної лунки діаметром  $d$  (див. рис. 5.1).

Щоб не проводити аналітичних обчислень за формулою (5.2) на практиці часто використовують стандартною таблицею, в якій приведено залежність числа твердості  $HB$  від  $d$ ,  $D$  і  $P$ . Якщо використовувати міжнародну систему одиниць  $SI$ , приймаючи значення зусилля у  $H$ , площі лунки в  $mm^2$ , то значення  $HB$  отримаємо в  $MPa$ . В такому випадку в конструкторській і технологічній документації вказують значення твердості та її розмірність, наприклад:  $HB\ 4500\ MPa$ . Допускається позасистемна розмірність зусилля в  $kgf$ , площі в  $mm^2$ . Тоді отримують розмірність твердості  $kgf/mm^2$ . При вказуванні значення твердості таку розмірність умовно опускають, наприклад  $HB\ 270$ .

Для пластичних матеріалів, схильних до повзучості (зростання пластичної деформації під дією постійного навантаження), випробування на твердість проводять з *деякою витримкою* при постійному навантаженні. Її час зростає зі зростанням пластичності металу. Для чорних металів витримка становить 10 с, кольорових 30...60 с (табл. 2.1).

Діаметр кульки, навантаження (від 156 до 30000  $H$ ) та час витримки під навантаженням (10, 30 і 60 с) вибирають залежно від очікуваної твердості та товщини зразка (табл.5.1).

Таблиця 5.1.

**Параметри випробувань при визначенні твердості за методом Брінелля**

Матеріал	Інтервал твердості за Брінеллем, $MPa$	Мінімальна товщина зразка, $mm$	Діаметр кульки, $D$ , $mm$	Співвідношення між $P$ , $kgf$ і $D$ , $mm$	Навантаження $P$		Час витримки, $s$
					$kgf$	$H$	
Чорні метали	1400...1500	6...3	10	$P=30D^2$	3000	29430	10
		4..2	5		750	7357	
		<2	2,5		187,5	1839	
Кольорові метали	<1400	>6	10	$P=10D^2$	1000	9810	10
		6...3	5		250	2452	
		<3	2,5		62,5	613	
Кольорові метали	350...1300	9...6	10	$P=10D^2$	1000	9810	30
		6...3	5		250	2452	
		<3	2,5		62,5	613	
Кольорові метали	80...350	>6	10	$P=2,5D^2$	250	2452	60
		6...3	5		62,5	613	
		<3	2,5		15,6	153	

### **Переваги методу Брінелля**

- простота випробувань і порівняно висока точність отримуваних результатів;
- проста залежність між твердістю *НВ* та границею міцності матеріалів;
- можливість визначення твердості сплавів, які мають неоднорідну макроструктуру, наприклад, чавуну.

### **Недоліки методу Брінелля**

- обмежене застосування (до *НВ* 4500 МПа), зумовлене можливою деформацією сталльної кульки;
- неможливість випробування тонких виробів (товщиною менше 2...3 мм) та тонких поверхневих шарів (менше 1 мм);
- наявність на деталі відносно великого відбитка (діаметром до 6 мм), який залишається після випробувань, що може привести до непридатності деталі для подальшої експлуатації.

### **Будова і принцип роботи твердоміра Брінелля**

Принципова **схема твердоміра Брінелля** зображена на рис. 5.2. За допомогою поворотного штурвала 1 і гвинта 2 рухомий стіл 3 може здійснювати зворотно-поступальний рух вгору-вниз. На стіл встановлюється випробовуваний зразок 4. Поворотом штурвала стіл піднімається і зразок дотикається до індентора 5.

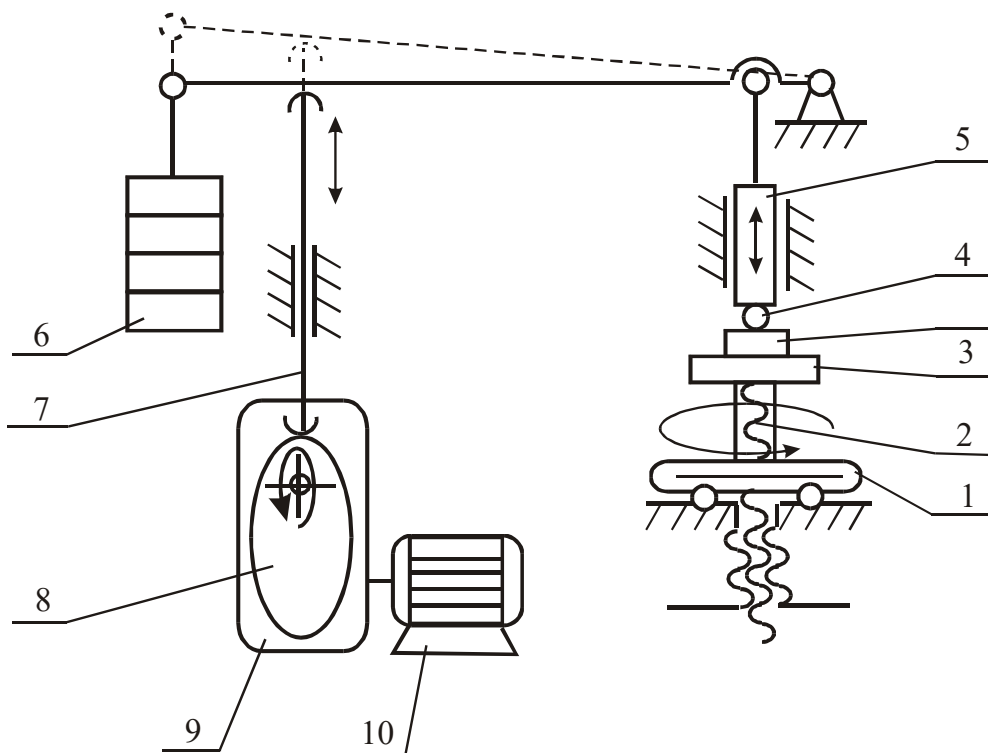


Рис.5.2. Принципова схема твердоміра Брінелля

Навантаження для втискання індентора в досліджувану поверхню створюється за рахунок ваги гир через важільну схему із співвідношенням довжини плечей 1:50. У початковому положенні (коли зусилля до індентора ще не прикладене) вага гир 6 сприймається штоком 7, який приводиться в рух кулачком 8 від черв'ячного редуктора 9 та електродвигуна 10. Для створення нормативного навантаження (див. табл. 5.1) на твердомірі встановлюється необхідна кількість гир. Запуск двигуна 10

здійснюється кнопкою на панелі керування твердоміра. Після повороту кулачка 8 вага гир через важіль сприймається індентором, який проникає в поверхневі шари контрольованого зразка. В момент прикладання навантаження до зразка запалюється сигнальна лампочка, яка гасне при знятті навантаження. Час витримки зразка під навантаженням забезпечує реле часу.

Сучасні твердоміри для визначення твердості за Брінеллем можуть бути *універсальними* (один прилад для визначення твердості за Брінеллем та Роквеллом). Як правило, робоче зусилля в ньому створюється також за рахунок ваги гир, однак привід силового механізму здійснюється не від електродвигуна через кулачок, а важелем від руки.

В табл. 5.3 наведені співвідношення між значеннями твердості визначеними різними методами. Еталоном порівняння взята твердість за Брінеллем.

Таблиця 5.2

Співвідношення між числами твердості, визначеними різними методами

Брінелль, HB	Роквелл,			Брінелль, HB	Роквелл,		
	HRC	HRA	HRB		HRC	HRA	HRB
183	8	56	90	235	21	61	101
197	9	57	91	241	23	62	102
192	11	57	92	246	24	62	-
197	12	58	93	255	25	63	-
201	13	58	94	262	26	63	-
207	14	59	95	269	27	64	-
212	15	59	97	277	28	64	-
217	17	60	98	285	29	65	-
223	19	60	99	293	30	65	-
229	20	61	100	302	31	66	-

### Контрольні запитання

1. Що розуміють під поняттям “твердість матеріалу”?
2. Назвіть основні методи вимірювання твердості. В яких випадках доцільно використовувати той чи інший метод?
3. Суть методу Брінелля. Які переваги і недоліки даного методу порівняно з іншими?
4. В яких одиницях вимірюється твердість за Брінеллем.
5. Як вибирають параметри випробувань (діаметр кульки, величина навантаження, час витримки під навантаженням) при визначенні твердості за Брінеллем?

## ТЕМА 6. ВИЗНАЧЕННЯ ТВЕРДОСТІ МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ МЕТОДОМ РОКВЕЛЛА

Вимірювання твердості за Роквеллом регламентується державним стандартом. При вимірюванні твердості за Роквеллом *індентором* служить стальна кулька діаметром 1,588 мм (для м'яких матеріалів) або алмазний конус з кутом при вершині 120° і радіусом заокруглення вершини 0,2 мм.

При визначенні твердості за Роквеллом до індентора прикладається спочатку попереднє навантаження  $P_0=100\text{ Н}$ , а потім – основне  $P_1$  (рис. 6.1).

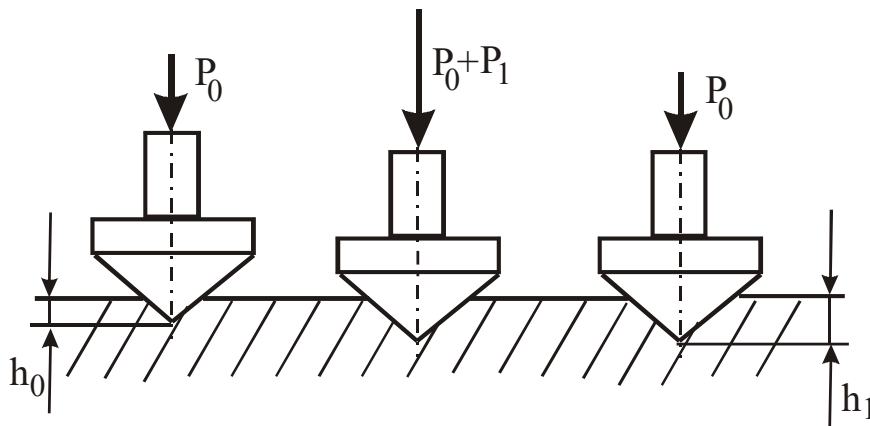


Рис. 6.1. Схема визначення твердості за Роквеллом.

$P_0$  – попереднє навантаження величиною 100 Н;

$P_1$  – основне навантаження.

Таким чином, загальне навантаження на індентор рівне

$$P = P_0 + P_1 \quad (6.1.)$$

і вибирається залежно від типу індентора та очікуваної твердості матеріалу (табл. 6.1.). Числом твердості в цьому методі є деяка *умовна величина*, яку визначають безпосередньо за показами стрілки на циферблатному індикаторі твердоміра.

При використанні алмазного конуса з повним навантаженням 1500 Н або 600 Н твердість визначають за чорною шкалою (С або А) приладу. Отриману твердість позначають відповідно *HRC* або *HRA* та умовним (безрозмірним) числом твердості Роквелла, наприклад *HRC 45*.

При використанні сталюї кульки із сумарним навантаженням 1000 Н, твердість визначається за червоною шкалою *B*. Конструктивно ця шкала зміщена відносно нульового положення чорної на 30 поділок.

Про твердість матеріалу роблять висновок за різницею глибин втиснення індентора під дією двох послідовно прикладених навантажень  $P_0$  і  $P_1$ .

За одиницю твердості  $e$  прийнято величину, яка відповідає осьовому переміщенню індентора на 0,002 мм.

$$e = (h_1 - h_0) / 0,002, \quad (6.2)$$

де  $h_1$  і  $h_0$  – глибина втискання індентора при прикладанні відповідно повного ( $P_0 + P_1$ ) та попереднього  $P_0$  навантаження.

Стрілка приладу вказує на величину твердості за Роквеллом на вибраній шкалі.

Таблиця 6.1.

**Умови визначення твердості за Роквеллом**

Приблизна твердість за Віккерсом	Шкала Роквелла	Тип індентора	Навантаження, Н	Допустимі межі виміру твердості за Роквеллом
600...2400	B	Стальна кулька	1000	25...100
2400...9000	C	Алмазний конус	1500	20...67
3900...9000	A	Алмазний конус	600	70...85

Товщина матеріалу при визначенні твердості за Роквеллом повинна бути не менше 8-кратної глибини втискання індентора, що складає 0,5...1 мм.

Конструктивна **схема твердоміра Роквелла** подібна до твердоміра Брінелля (навантаження електромеханічне або важільне, піднімання зразка за допомогою гвинта). Відмінність полягає лише в тому, що конструкцією передбачений спеціальний відліковий прилад (**індикатор**), на якому розміщено три шкали і який безпосередньо показує величину твердості. Ціна поділки шкали 0,002 мм.

Індикатор має дві стрілки. *Велика стрілка* вказує на твердість, а *мала* служить для контролю величини попереднього навантаження (співпадання стрілки з крапкою циферблату вказує на досягнення попереднього навантаження в 100 Н).

Нульова поділка чорної шкали співпадає з початковим положенням стрілки. Червона шкала зміщена відносно нульової поділки чорної шкали на 30 поділок у напрямку, протилежному до руху стрілки індикатора при збільшенні навантаження.

При підніманні стола після контакту зразка з індентором мала стрілка почне повертатися. Підіймання стола закінчують, коли мала стрілка співпадає з крапкою. Це відповідає величині попереднього навантаження 100 Н. При цьому велика стрілка також буде переміщатись і зупиниться приблизно у вертикальному положенні з відхиленням до 5 поділок від нуля чорної шкали. Точне встановлення великої стрілки на нуль здійснюють поворотом циферблата з допомогою тросів, які приводяться в рух гофрованим сектором.

**Форму індентора** вибирають за табл. 6.1.

**Переваги методу Роквелла:**

- висока продуктивність контролю;
- можливість без будь-яких розрахунків (відразу за шкалою приладу) визначити твердість досліджуваного зразка;
- простота обслуговування;

- висока точність вимірювання в порівнянні з іншими методами;
- збереження якісної поверхні після вимірювання (мало помітні сліди від індентора);
- можливість автоматизації процесу.

***Недоліки методу Роквелла:***

- не можна випробовувати неоднорідні за структурою сплави, крихкі вироби з раковинами на поверхні, криволінійні поверхні при радіусі кривизни менше ніж 15 мм, зразки товщиною менше 8-кратної глибини втискання індентора.

**Контрольні запитання**

1. Суть методу Роквелла. Які переваги і недоліки даного методу порівняно з іншими?
2. Які індентори і величини навантажень використовують при вимірюванні твердості за методом Роквелла?
3. В яких випадках при вимірюванні твердості за Роквеллом використовують кульку, а в яких – алмазний конус, і як вибирають величину навантаження?
4. В яких одиницях вимірюється твердість за Роквеллом?
5. Як вибирають параметри випробувань при визначенні твердості за Роквеллом?



## ТЕМА 7. ВИВЧЕННЯ СТРУКТУРИ МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ МЕТОДОМ МІКРОСКОПІЧНОГО АНАЛІЗУ

**Мікроскопічний аналіз** полягає в дослідженні структури матеріалів при великих збільшеннях (більше 50 разів) з допомогою мікроскопу на спеціально підготовлених зразках.

Будова (структура) металів, яка вивчається з допомогою мікроаналізу, називається **мікроструктурою**.

В залежності від потрібного збільшення для чіткого спостереження фаз, їх кількості, форми і розподілу, тобто структури в цілому, в мікроскопах використовують:

- біле світло і звичайні оптичні системи, що є комбінацією скляних лінз і призм (оптична мікроскопія, збільшення до 1 500 разів).
- електронні промені або, точніше, потік електронів для створення оптичних систем, для яких потрібно застосовувати електромагнітні або електростатичні лінзи (електронна мікроскопія, збільшення до 1 000 000 разів).

Метою даної роботи є вивчення методу оптичної мікроскопії.

### **Завдання мікроаналізу:**

- визначення фазового складу і структури сплавів у рівноважному стані;
- визначення нерівноважних структур (після гартування);
- визначення характеру обробки металу;
- визначення розміру зерна і включень, кількості неметалевих включень методами кількісної металографії.

Зразок металу, підготовлений для мікроаналізу, називається **мікрошліфом**. Приготування мікрошліфа полягає у вирізанні зразка, шліфуванні та поліруванні його до дзеркального блиску, травленні спеціальними реактивами.

Як правило, зразки мають діаметр 12 мм у випадку циліндричного зразка і 12 x 12 мм – у випадку зразка прямокутної форми. Висота зразків складає 10-15 мм. Якщо зразки невеликі (дріт, тонкі листи, дрібний ріжучий інструмент, шматки деталей), то для приготування шліфів їх затискають у струбцини або заливають в оправках легкоплавкими матеріалами (сплав Вуда, сірка, бакеліт тощо).

Шліфування шліфів відбувається вручну, або на крузі, що обертається, шліфувальним папером з поступовим переходом від паперу більшої зернистої до меншої аж до повного зникнення рисок.

При переході від одного номера зернистості до другого необхідно очищувати зразок від абразиву і змінювати напрям шліфування на 90°. Для шліфування можна також використовувати спеціальні пасти (паста ГОИ, яка складається із оксиду хрому, стеарину, олеїнової кислоти, соди, гасу і має три сорти зернистості – тонкий, середній, грубий; хромоалюмінієві пасти, які відрізняються від пасти ГОИ добавкою оксиду алюмінію).

Полірування знімає дрібні дефекти поверхні, риски, які залишилися після шліфування. Застосовують механічний, хіміко - механічний та електрохімічний способи полірування.

Механічне полірування здійснюють на верстатах, які мають круги, що обертаються. На круг натягують полірувальний матеріал - фетр, сукно, на який

наносять дрібні частинки абразивних матеріалів - оксидів алюмінію, заліза або хрому у вигляді водної суспензії або алмазні пасти марки АСМ або АМ. Для грубого полірування використовують абразиви з розміром зерна 1-10 мкм, для тонкого – до 1 мкм.

У випадку хіміко-механічного полірування використовують полірувальні абразивні частинки разом з хімічними речовинами (наприклад, розчин жовтої кров'яної солі), що сприяє більш швидкому поліруванню.

Електролітичне полірування проводять у ваннах, наповнених електролітом (фосфорна, сірчана, хлорна кислоти), де зразок є анодом, а катодом – свинець, мідь, алюміній, цинк. Головною перевагою електролітичного полірування є висока швидкість отримання дзеркальної поверхні при відсутності будь-яких спотворень структури у поверхневого шарі.

Після полірування будь-яким методом мікрошліф промивають водою, потім спиртом і просушують фільтрувальним папером.

При дослідженні поверхні металу під мікроскопом безпосередньо після полірування на світлому полі можна виявити окремі темні і сірі крапки та лінії, які можуть бути як неметалевими включеннями (оксиди, сульфіді, шлаки, силікати, графіт, нітриди), так і дефектами поверхні зразка, які не були усунуті після полірування (раковини, мікротріщини, сліди обробки).

Для вивчення структури після перегляду нетравленого шліфа його піддають травленню, що дозволяє визначити кількість, розміри, форму, взаємне розташування і кількісне співвідношення фазових і структурних складових.

**Травлення** полягає у взаємодії металу поверхні мікрошліфа з хімічно активними розчинами лугів, солей, кислот в спирті або воді в залежності від властивостей і будови досліджуваного металу. При травленні реактив взаємодіє з різними ділянками поверхні, що приводить до різного ступеню їх протравлюваності. Реактиви для дослідження мікроструктури сплавів приведені в табл.5.1.

Для мікроскопічного дослідження структури металів використовують металографічні мікроскопи марок МИМ - 7, МИМ - 8М, МИМ - 10, ММР - 4, "Неофот – 30 з допомогою яких розглядають шліфи у відбитому світлі і які можуть використовуватись для дослідження будови непрозорих предметів (металів, пластмас, мінералокераміки і т.п.).

Таблиця 7.1.

Реактиви для дослідження мікроструктури сплавів

Назва реактиву	Склад реактиву	Призначення і особливості застосування
1. Реактиви для травлення заліза і його сплавів 1.1 Для травлення вуглецевих, низьколегованих сталей і чавунів		
1. Спиртовий розчин азотної кислоти (реактив Іжевського)	Азотна кислота 1 - 5 мл, етиловий або метиловий спирт 100 мл.	Реактиви забарвлюють перліт в темний колір, виявляють границі зерен фериту, структуру мартенситу і продуктів відпуску
2. Спиртовий розчин пікринової кислоти (реактив Іжевського)	Пікринова кислота (кристалічна) 3 – 5 мл, етиловий або метиловий спирт 100 мл.	Застосовують для виявлення структури азотованої і цементованої сталі. Зі збільшенням кількості азотної кислоти в реактиві Іжевського зростає швидкість травлення. Час травлення від декількох секунд до хвилини
3. Розчин азотної і пікринової кислоти	Азотна кислота 2-4 мл, пікринова кислота 22 г, етиловий спирт 100 мл	Для виявлення границі зерен в загартованій сталі
4. Розчин азотної і соляної кислоти	Азотна кислота 25 мл, соляна кислота 50 мл, двохромовокислий калій 12 г, вода 25 мл	Для виявлення величини зерен в загартованій сталі.

1.2. Для травлення високолегованих сталей і нікелевих сплавів

5. Розчин азотної і соляної кислот в гліцерині	Азотна кислота 10 мл, соляна кислота 20 - 30 мл, гліцерин 30 мл	Для виявлення структури високохромових, швидкорізальних, аустенітних марганцевих сталей в загартованому стані рекомендують проводити по чергове травлення і полірування
6. Царська горілка	Соляна кислота 3 ч., азотна кислота 1 ч.	Для виявлення структури нержавіючих сталей і сплавів. Перед використанням реактив потрібно витримати 20 - 30 год.
7. Солянокислий розчин хлорного заліза	Хлорне залізо 5 г, соляна кислота 50 мл, вода 100 мл	Для дослідження структури високонікелевої нержавіючої аустенітної сталі
8. Розчин хромової і соляної кислот	Соляна кислота 50 мл, хромово кислота (10% - на) 50 мл	Для виявлення структури термічно обробленої аустенітної сталі
9. Солянокислий розчин мідного купоросу (реактив Марбе)	Сірководокисла мідь 10 г, соляна кислота 50 мл, вода (або етиловий спирт) 50 мл	Для виявлення структури високолегованої аустенітної сталі
10. Розчин хромпіку в соляній і азотній кислотах	Соляна кислота 45 мл, азотна кислота 50 мл, двохромовокислий калій 12 г	Для виявлення структури сплавів типу німонік

1.3. Для виявлення карбідів, фосфідів, вольфрамідів

11. Лужний розчин пікрату натрію	Пікринова кислота 2 г, їдкий натр 25 г, вода 100 мл	Для виявлення цементиту, який забарвлюється в темний колір, карбід хрому і вольфраму не забарвлюються. Реактиви застосовують в киплячому стані
12. Лужний розчин червоної кров'яної солі (реактив Муракамі)	Червона кров'яна сіль 10 г, їдкий калій 10 г, вода 100 г.	Застосовують в теплому стані для виявлення хромистих карбідів, вольфрамідів у швидкорізальних і інших сталях. Цей реактив виявляє фосфіди, в фосфідній евтектиці. Фосфід забарвлюється в темний колір
<b>II. Реактиви для травлення міді і мідних сплавів</b>		
13. Солянокислий розчин хлорного заліза	Хлорне залізо 10 г, соляна кислота 25 мл, вода 100 мл або хлорне залізо 5 г, соляна кислота 10 мл, вода 100 мл	Для виявлення структури міді, латуні, олов'янистої і алюмінієвої бронзи, сплавів вісмут - сурма і інших. В латунях $\beta$ -фаза забарвлюється в темний колір. Застосовують також для виявлення макробудови.
14. Аміачний розчин подвійної солі хлорної міді і хлорного амонію	Подвійна сіль 10 г, вода 100 мл, аміак до одержання нейтральної або кислотної реакції	Для виявлення структури міді і її сплавів, двохфазних латуней ( $\beta$ -фаза забарвлюється в темний колір)
15. Розчин персульфату амонію	Персульфат амонію 10 г, вода 90 мл	Для виявлення структури міді, латуні, олов'янистої бронзи, монель-металу.

III. Реактиви для травлення алюмінієвих сплавів		
16. Плавикова кислота	Плавикова кислота (48%) 0,5 мл, вода 99,5 мл	Для виявлення структури дуралюмінів і литих сплавів на алюмінієвій основі.
17. Розчин кислот	Плавикова кислота концентрована 1,0 мл, соляна кислота 1,5 мл, азотна кислота 2,5 мл, вода 95 мл	Для виявлення мікроструктури в сплавах типу дуралюмін.

### ***Будова металографічного мікроскопа***

Металографічний мікроскоп складається з оптичної системи, освітлювальної системи з апаратурою для фотографування і механічної системи.

В оптичну систему входять об'єктив, окуляр, дзеркала, призми і т.п. Об'єктив дає обернене збільшене дійсне зображення об'єкта і є системою лінз, розташованих в одній оправі, що знаходиться безпосередньо біля шліфа. Певний підбір корекційних лінз в об'єктиві дозволяє усунути явища хроматичної і сферичної аберацій.

***Хроматичною аберацією*** називається неоднакове заломлення лінзою променів різного кольору (різної довжини хвиль), які не мають однієї загальної точки сходження (фокусу). Хроматична аберація погіршує чіткість зображення, її можна повністю усунути лише застосуванням монохроматичного світла. В мікроскопах об'єктиви випускають двох типів: ахромати, які застосовують при малих і середніх збільшеннях і апохромати, які застосовують при великих збільшеннях.

***Сферична аберація*** полягає в тому, що промені, заломлені краєм лінзи і центральною її частиною, не сходяться в одній точці, що також погіршує чіткість зображення. Для зменшення цього виду аберації об'єктив виготовляють із двох лінз - випуклої і ввігнутої, які мають однакову, але різно напрямлену сферичну аберацію.

***Окуляр*** - це система лінз, розміщених в одній оправі і звернених до ока спостерігача. Окуляри виправляють оптичні дефекти і дають уявне збільшене зображення, отримане об'єктивом.

В металографічних мікроскопах використовують окуляри трьох типів; звичайні (Гюйгенса), компенсаційні і проєкційні. Звичайні використовують для роботи з ахроматичними об'єктивами (тобто для невеликих збільшень). Компенсаційні застосовують з апохроматичними об'єктивами, а проєкційні використовують при фотографуванні шліфів.

Звичайні окуляри збільшують від 2 до 15 разів, компенсаційні до 25 разів, тоді як збільшення об'єктивів бувають від 9 до 95 разів.

Корисне збільшення мікроскопу визначається за формулою:

$$M = d_1 / d, \quad (7.1)$$

де  $d_1$  – максимальна роздільна здатність людського ока, рівна 0,3 мм;  
 $d$  – максимальна роздільна здатність оптичної системи.

**Роздільна здатність** – це величина, обернена мінімальній відстані між двома точками, при якій точки розрізняються окремо.

Величина  $d$  визначається з умови дифракції світла і визначається в умовах прямого освітлення формулою:

$$d = \lambda / 2n \cdot \sin \alpha/2, \quad (7.2)$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі світла (для білого світла 600 нм),

$n$  – коефіцієнт заломлення середовища між об'єктивом і шліфом (для повітря  $n = 1$ , для кедрового масла - імерсійного середовища  $n = 1,51$ ),

$\alpha/2$  – половина кута розкриття вхідного світлового пучка  $\alpha/2_{\max} = 70^\circ$ ).

Величина  $n \sin \alpha/2$  називається **числовою апертурою** об'єктива ( $A$ ). Чим вона більша, тим більше максимальне збільшення мікроскопу. Наприклад, для об'єктива з апертурою 0,65 максимальне збільшення оптичної системи рівне 650.

Для чіткого зображення об'єкту потрібно, щоб загальне збільшення не перевищувало корисне збільшення системи, яке можна прийняти 500 - 1000 апертур взятого об'єктива.

Загальне збільшення мікроскопу визначають за формулою:

$$V_m = V_{\text{ок.}} \cdot V_{\text{об.}} \quad (7.3).$$

Збільшення окулярів і об'єктивів вказують на їх металевій оправі і в таблицях паспорту мікроскопа.

### **Освітлювальна система**

Шліф освітлюють за допомогою освітлювальної системи, яка складається з джерела світла, лінз, світлофільтрів і діафрагм. Як джерело світла, як правило використовують низьковольтні електричні лампи розжарювання, потужні кварцеві лампи і ксенонові лампи високого тиску. При візуальному спостереженні рекомендують жовто-зелені фільтри, як найбільш чутливі для людського ока.

Дослідження структури під мікроскопом проводять у світлому, темному і поляризованому світлі.

Основні дослідження проводять у світлому полі. В темному полі можна чітко виявити окремі, в основному, виступаючі над поверхнею мікрошліфа структурні складові. Це додатковий метод дослідження. Поляризоване світло, тобто світло, хвилі якого знаходяться в одній певній площині, застосовують для виявлення, в основному, неметалевих включень.

Механічна система мікроскопа

Металографічний мікроскоп має штатив, тубус, предметний столик, гвинти грубого і точного фокусування.

### **Типи металографічних мікроскопів**

За будовою розрізняють вертикальні і горизонтальні мікроскопи. Вертикальний мікроскоп МИМ - 7 дозволяє проводити дослідження у світлому або

темному полі, при вертикальному або косому освітленні, а також в поляризованому світлі. Збільшення мікроскопа МИМ - 7 – 60... 1440 разів.

Мікроскоп ММР - 4 (рис.5.1) за конструкцією та можливостями переважає мікроскоп МИМ -7. Його перевагою є наявність револьверної головки, в яку вмонтовано шість об'єтивів, поворот якої включає в оптичну систему той чи інший об'єтив. Крім того, мікроскоп має систему лінз, що дозволяє змінювати збільшення мікроскопу в 2 - 3 рази без зміни фокусування. Це досягається обертанням рукоятки. Мікроскоп дозволяє використовувати метод фазового контрасту шляхом включення кільцевої діафрагми 5, а в систему спостереження - фазової пластинки 18. Мікроскоп має бінокулярну насадку, що покращує можливості спостереження структури дослідником.

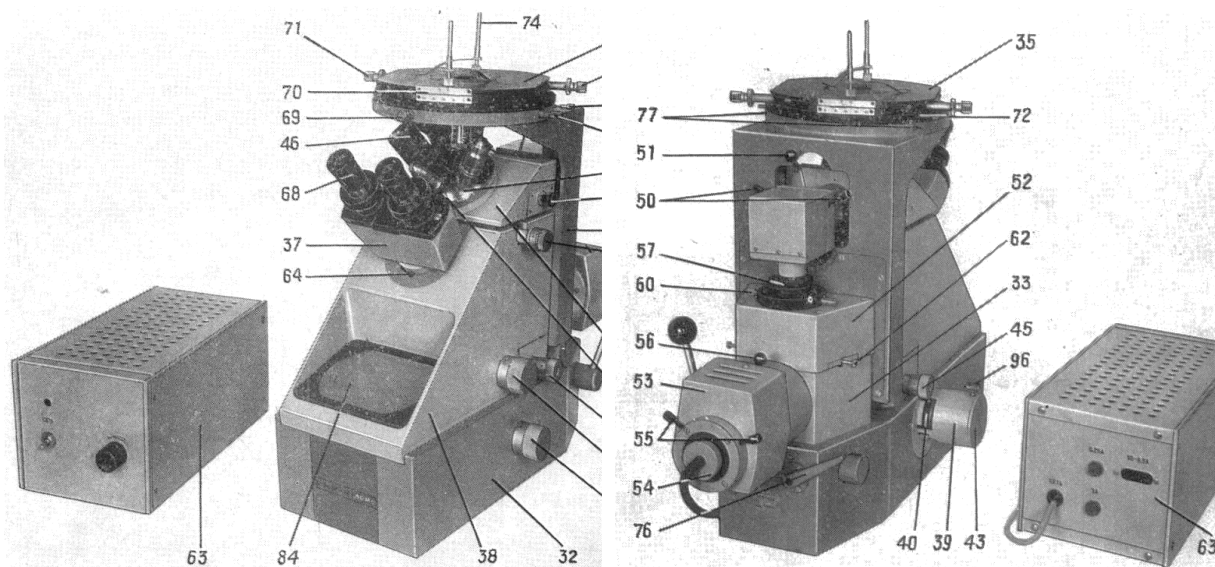


Рис. 7.1. Загальний вигляд металографічного мікроскопа ММР - 4.

Згідно з оптичною схемою (рис. 7.2) світло від галогенної лампи 1 типу КИМ 9-75 ( 9В, 75Вт ) проходить через колектор 2, діафрагму 4 і з допомогою призми 3 проектується у площину апертурної діафрагми 6. Далі зображення цієї діафрагмою, лінзою 7, дзеркалом 8, лінзою 7 і напівпрозорою пластинкою 11 проектується в площину опорного торця під об'єктив.

Польова діафрагма 9 знаходиться у фокальній площині лінзи 7 і проектується у нескінченність, а після об'єктиву – в площину шліфа. Промені, пройшовши через об'єктив, знову йдуть через нього, пластинку 11 і телеоб'єктивом 15 збираються в проміжній площині, яка є площиною предмета, для системи 16. Потім промені відбиваються від дзеркал 26 і 27, проходять через лінзи системи 20 і призму 21 і поступають у бінокулярну насадку 22.

При спостереженні у темному полі замість лінзи 7 і пластинки 11 промені проходять через лінзу, кільцеву діафрагму 10 і кільцеве дзеркало 12.

При спостереженні в поляризованому світлі в хід променів вводять поляризатор 13 і аналізатор 14.



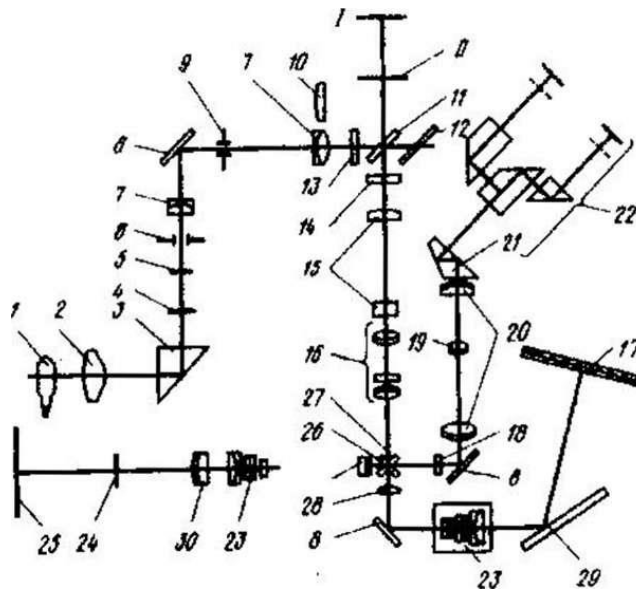


Рис. 7.2. Оптична схема мікроскопа ММР - 4.

Для фазового контрасту в освітлювальну систему включається діафрагма 5, в систему спостереження - фазова пластинка 18, а при настройці між лінзами 20 включається лінза 19. Для фотографування замість дзеркал 26 вводиться дзеркало 27, а при спостереженні на екрані 17 включаються дзеркала 26 і 27. Зображення проектується лінзою 28 і 23 з допомогою дзеркал 26 і 29 на екран 17 на фотопластинку 25 за допомогою лінзи 30.

#### ***Налаштування мікроскопа (світле поле)***

1. Встановіть об'єкт на предметний стіл.
2. Включіть освітлення.
3. Підніміть предметний стіл поворотом рукоятки 75 від себе.
4. Встановіть об'єктив  $F = 25\text{мм}$ ,  $A = 0,25$  поворотом револьвера 44 і опустіть стіл до упору.
5. Включіть, втискаючи рукоятку 48, відбиваючу пластинку і лінзу світлого поля.
6. Виключіть з ходу променів аналізатор з поляризатором, витягуючи рукоятку 49.
7. Введіть в хід променів дзеркало візуального спостереження поворотом рукоятки 81 до індексу "В".
8. Встановіть панкратичну систему, повертаючи рукоятку 82 до індексу "10/40", що відповідає збільшенню 100.
9. Встановіть в біокулярну насадку 37 окуляри 68 і 80 - окуляр  $10\times$  і  $10\times$  із шкалою.
10. Відкрийте апертурну діафрагму 57 поворотом кільця 58, встановіть її по шкалі 61 в положення "0" з допомогою гвинта 60.
11. Сфокусуйте мікроскоп на об'єкт обертанням рукояток 45 пристрою фокусування об'єктивів.
12. Відкрийте польову діафрагму поворотом рукоятки 51.
13. Встановіть окулярні трубки насадки по базі очей.

14. Спостерігаючи в окуляр зі шкалою за зображенням об'єкту і фокусуєчи мікроскоп, досягніть різкого зображення об'єкту в площині шкали окуляра.

15. Спостерігаючи за зображенням об'єкту двома очима, обертанням кільця 67 другої трубки досягніть такої ж різкості для другого ока.

16. Витягніть окуляр із шкалою і поставте точкову діафрагму 83. Перевірте центрування лампи. Пересуньте колектор вздовж осі з допомогою рукоятки 56, спроектуйте нитку лампи в площину апертурної діафрагми і, обертаючи центруючі гвинти 55, приведіть зображення нитки лампи в центр апертурної діафрагми.

17. Прикрийте апертурну діафрагму на  $1/3$  радіусу світлового діаметру, що відповідає 8-ій поділці шкали 59.

18. Поставте в окулярний тубус замість точкової діафрагми парний окуляр  $10\times$ .

19. Приведіть польову діафрагму в центр поля зору центральним гвинтом 50 і відкрийте її рукоятку 51 до розмірів поля зору.

Мікроаналіз дозволяє проводити не лише якісне дослідження структури, але й кількісну оцінку структурних складових. Це можна зробити на мікроскопах МИМ - 9, МИМ - 10, "Неофот - 30". Ці мікроскопи можна використовувати для дослідження структури методами фазового контрасту та інтерференції, для вимірювання рельєфу (точність 0,1 мкм), дослідження зламів (фрактографія), проведення кількісного і гранулометричного аналізу з допомогою напівавтоматичного інтеграційного пристрою.

### **Контрольні запитання**

1. В чому суть мікроаналізу?
2. Завдання мікроаналізу.
3. Що таке мікрошліф?
4. Етапи приготування мікрошліфів.
5. Способи полірування,
6. Що таке травлення?
7. Будова металографічного мікроскопу.
8. З чого складається оптична система мікроскопу?
9. Різновиди аберації. Способи її усунення.
10. Що таке об'єктив, окуляр?
11. Як визначають корисне збільшення мікроскопу?
12. Що таке роздільна здатність?
13. Що таке апертура об'єктива?
14. Як визначають загальне збільшення мікроскопу?
15. З яких елементів складається освітлювальна система?
16. З яких елементів складається механічна система?
17. Типи металографічних мікроскопів.
18. Оптична схема мікроскопа ММР - 4.
19. Переваги мікроскопа ММР - 4.
20. Налаштування мікроскопа ММР - 4.
21. Які завдання можна вирішувати на мікроскопах МИМ - 10, "Неофот - 30"?

## ТЕМА 8. МІКРОСТРУКТУРА І ВЛАСТИВОСТІ ВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ У ВІДПАЛЕНОМУ СТАНІ

**Вуглецеві сталі** – це сплави заліза з вуглецем, що містять до 2,14 % С і постійні домішки Si, Mn, Al, S, P, O, H, N та ін.

Усі сплави з умістом вуглецю більше 0,02 % при температурі 727 °С мають евтектоїдне перетворення. Цьому перетворенню в сплавах з умістом менше 0,8% вуглецю передуює виділення фериту, по лінії GS, а в сплавах з умістом вуглецю більше 0,8% у зв'язку зі зменшенням розчинності вуглецю в аустеніті й зниженням температури протікає процес виділення вторинного цементиту (по лінії ES). Евтектоїдне перетворення (лінія PSK) протікає за реакцією:



Таким чином, при сталій температурі 727 °С аустеніт, що містить 0,8% вуглецю, розкладається з утворенням механічної суміші, яка складається з фериту і цементиту, і яку називають евтектоїдом **або перлітом** (рис.8.1).

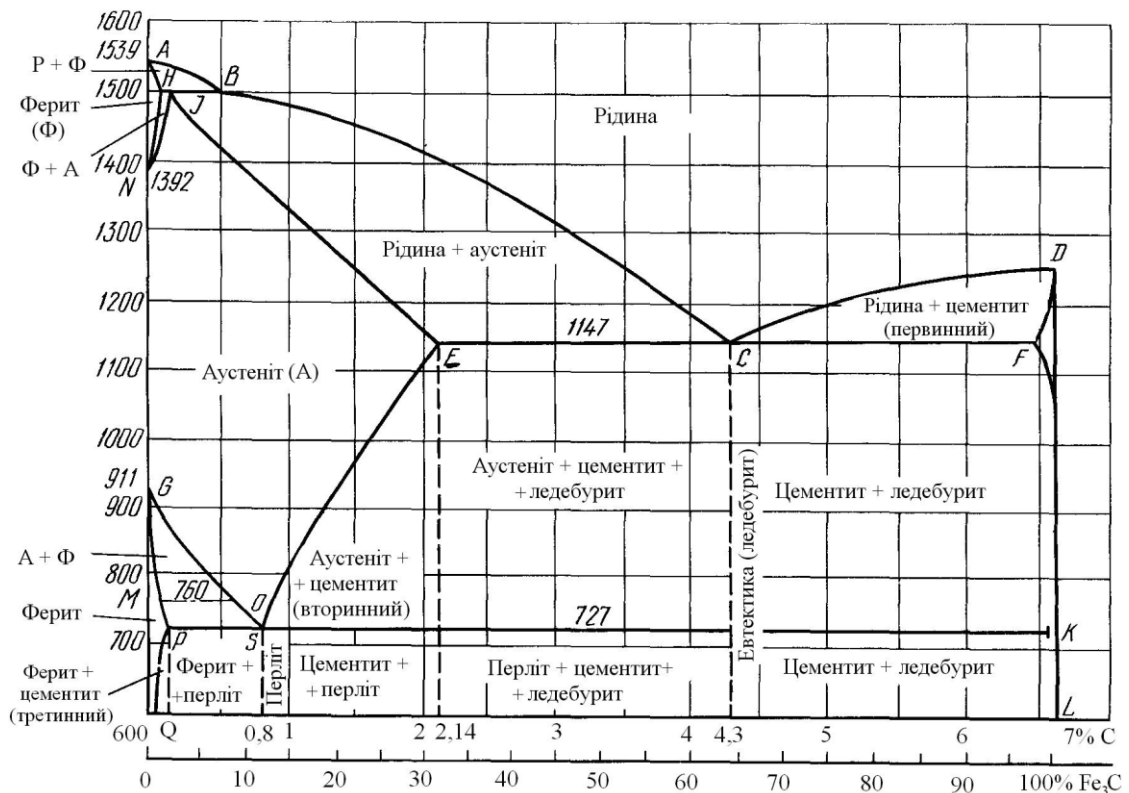


Рис. 8.1. Діаграма стану залізо–цементит.

Евтектоїд відрізняється від евтектики тим, що він утворюється в результаті розпаду не рідкого, а твердого розчину. Евтектичне перетворення на вуглецеві сталі не поширюється.

### **Класифікація вуглецевих сталей**

Сталі класифікують за наступними ознаками:

за структурою у рівноважному (відпаленому) стані;

за призначенням;  
за складом;  
за ступенем розкислення;  
за способом виробництва;  
за якістю.

### 1. Класифікація *за структурою*.

За структурою у рівноважному (відпаленому) стані вуглецеві сталі поділяють на:

- доевтектоїдні сталі з умістом від 0,02 % до 0,8 % вуглецю зі структурою, яка складається з фериту – світлі зерна і перліту – темні зерна. Кількість перліту в сталі змінюється пропорційно кількості вуглецю;

- евтектоїдні, що містять 0,8 % вуглецю, із структурою перліту;

- заевтектоїдні сталі з умістом від 0,8 % до 2,14 % вуглецю зі структурою, що складається з перліту і вторинного цементиту, розміщеного у вигляді сітки навколо зерен перліту. Цементит, як і ферит, при травленні 4%-им розчином азотної кислоти в спирті набуває білого кольору, тому застосовують лужний травник – нітрат натрію, який забарвлює цементит в темний колір і не діє на ферит.

### 2. Класифікація *за призначенням*.

Вуглецеві сталі за призначенням поділяють на:

- будівельні;

- машинобудівні або конструкційні, які залежно від термообробки поділяють на цементовані, покращувані, середньовідпущені (ресорно-пружинні), автоматні, ливарні;

- інструментальні сталі, що містять 0,7 – 1,3 % вуглецю;

### 3. Класифікація *за ступенем розкислення*:

- киплячі, розкислені лише марганцем (позначають *кп*);

- напівспокійні, розкислені марганцем і алюмінієм (позначають *пс*);

- спокійні, розкислені марганцем, кремнієм і алюмінієм (позначають *сп*).

Важливою експлуатаційною і технологічною характеристикою сталі є величина зерна, яку визначають з допомогою мікроскопа при 100 - кратному збільшенні шляхом вимірювання або порівняння зі стандартною шкалою, що містить 10 номерів (рис.8.2.) Номеру 1 відповідає найкрупніше зерно, а номеру 10 – найдрібніше. Киплячі сталі – крупнозернисті, спокійні – дрібнозернисті.

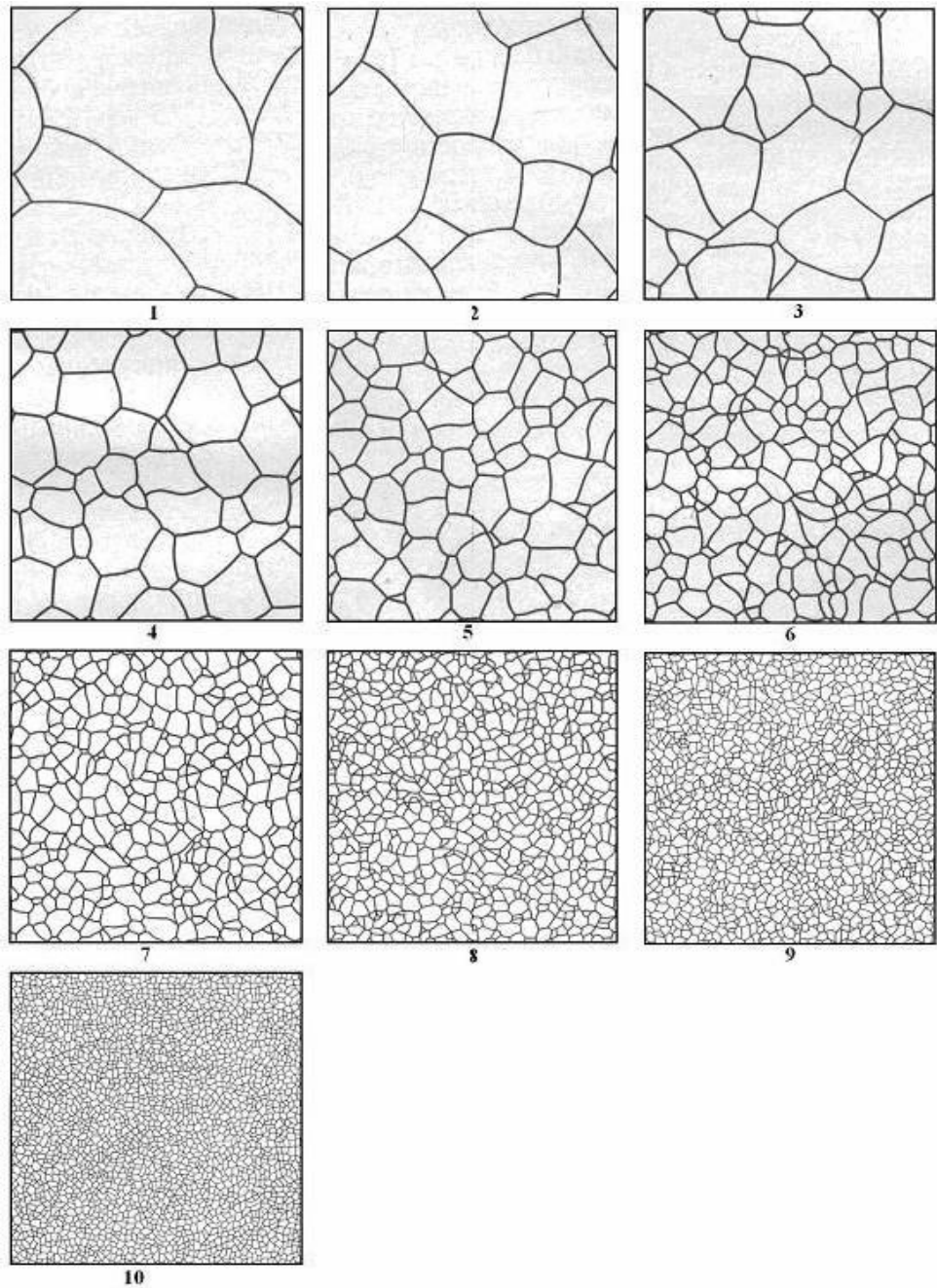


Рис.8.2. Стандартна шкала для оцінювання розмірів зерен (x100).

4. Класифікація *за складом*:

- маловуглецеві (0,02 – 0,25 % вуглецю);
- середньовуглецеві (0,25 – 0,64 % вуглецю);
- високовуглецеві (0,64 – 2,14 % вуглецю).

5. Класифікація *за способом виробництва*:

- мартенівські, отримані в мартенівських печах;
- конверторні, отримані в кисневих конверторах;
- електросталі, отримані в електропечах;
- вакуумні, отримані у вакуумних печах;
- електрошлакові, отримані способом електрошлакового переплаву.

6. Класифікація *за особливими (дефектними) структурами* сталі.

Особливими (дефектними) називають структури металів і сплавів, які не є типовими, їх отримують у результаті виконання деяких технологічних операцій або відхилення від встановлених режимів. До особливих структур належать:

- крупнозерниста структура;
- відманштеттова структура;
- структура перепаленого металу;
- структура зварного заліза;
- стрічкова або лінійчата структура.

Крупнозерниста структура спостерігається, як правило, в литій або перегрітій сталі. Вона знижує механічні властивості сталей. виправляють її відпалом.

Відманштеттова структура є наслідком додаткового прискореного охолодження перегрітої сталі з характерним розміщенням фериту у вигляді голок по границях і всередині зерен. Така структура є причиною дуже низьких механічних властивостей, особливо ударної в'язкості, її виправляють відпалом.

Структура перепаленого металу є результатом високого нагрівання (близько до точки плавлення). Для цієї структури характерні крупні зерна, межі яких оплавлені. Сталь обезвуглецьована на поверхні і по границях зерен. Перепал – не виправний дефект.

Зварне залізо отримують особливим способом. Після продування в конверторі отриманий метал виливають у ванну з рідким шлаком, отримують крицю, яку піддають обробці тиском. Такий метал не містить розчиненого кисню, не має бульбашок, тріщин, усадочних раковин. Недоліком цього заліза є наявність шлаку, який знижує механічні властивості. Мікроструктура зварного заліза складається з фериту і орієнтованих шлакових домішок.

Стрічкова структура є результатом забруднення сталі неметалевими домішками (оксидами, сульфідами), які при гарячій обробці тиском витягуються у вигляді стрічок у напрямку деформуючого зусилля. Стрічкова структура може бути і результатом порушення технологічної обробки тиском. Якщо кінець обробки тиском проводити при заниженій температурі у двофазній ділянці аустеніту і фериту, то ферит, що виділяється, витягується стрічками в напрямку прикладеного зусилля. Стрічкова структура супроводжується анізотропією властивостей. Усувають її відпалом або нормалізацією.

#### 7. Класифікація за *якістю*.

Класифікація за якістю проводиться залежно від кількості домішок сірки і фосфору: сталі звичайної якості (вміст S і P 0,04...0,05% кожного); якісні сталі (0,035% S, 0,035% P); сталі високої якості (0,025% S, 0,025% P);

#### *Маркування сталей*

Сталі за ГОСТ маркують буквенними і числовими індексами.

#### Сталі вуглецеві *звичайної якості*.

Сталі вуглецеві звичайної якості за ДСТУ 2651:2005 (ГОСТ 380 – 2005) поділяють на три групи:

- А – які поставляють за механічними властивостями;
- Б – які поставляють за хімічним складом;
- В – які поставляють за хімічним складом і механічними властивостями.

Залежно від нормуючих показників (вміст С, Р, S) сталь кожної групи поділяють на категорії.

Сталі залежно від групи маркують:

А – Ст0, Ст1, Ст2, Ст3, Ст4, Ст5, Ст6;

Б – БСт0, БСт1...БСт6;

В – ВСт1 ... ВСт5.

Букви Ст означають "сталь звичайної якості", цифри від 0 до 6 – умовний порядковий номер марки. Букви Б і В перед маркою означають групу сталі, групу А не вказують.

Індекси кп, пс, сп після номера марки означають ступінь розкислення сталі.

### ***Конструкційні якісні сталі.***

Конструкційні якісні сталі класифікують за ГОСТ 1050–88. Наприклад: 05 кп, 08 кп, 10 кп, 16 кп, Сталь 15, Сталь 20, Сталь 25, Сталь 30 ... Сталь 65.

Цифри вказують середній вміст вуглецю в сотих долях процента. Для позначення конструкційної якісної сталі з підвищеним умістом марганцю в кінці марки ставлять букву Г – 15Г, 20Г.

### ***3. Інструментальні вуглецеві якісні сталі.***

Інструментальні вуглецеві якісні сталі маркують за ГОСТ 1435–88 буквою У і цифрою, що вказує вміст вуглецю в десятих долях відсотка:

У7, У8 ... У13.

Для позначення високоякісної сталі в кінці марки ставлять букву А, наприклад, У7А.

## **Контрольні запитання**

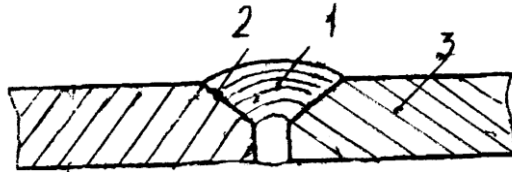
1. Що таке сталі?
2. Вплив вуглецю та домішок на властивості сталей.
3. Охарактеризувати фазові та структурні складові сталей.
4. Ізотермічні перетворення в сталях.
5. Класифікація вуглецевих сталей.
6. Маркування вуглецевих сталей.

## ТЕМА 9. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ІЗ СТАЛЕЙ

Залежно від стану металу в зварювальній зоні усі способи зварювання ділять на 2 групи: зварювання плавленням і зварювання тиском.

У даній роботі вивчатимемо будову зварного шва і ЗТВ для з'єднань, отриманих зварюванням плавленням сталевих виробів.

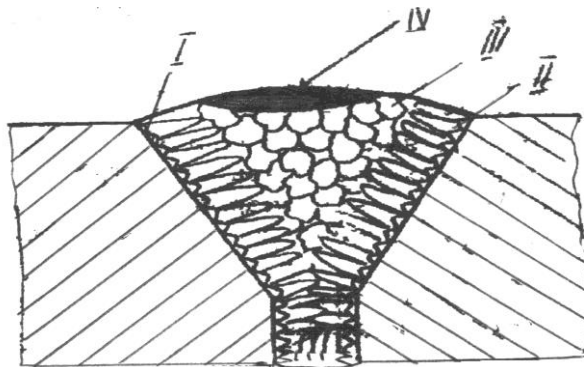
У зварному з'єднанні розрізняють 2 зони, які відрізняються за будовою: зона розплавленого металу і зона основного металу, що нагрівався при зварюванні в інтервалі температур  $T_{\text{плав.}} - T_{\text{кімн.}}$ , а також зона сплавлення, що міститься між ними (Рис.16.1).



1 – метал шва, 2 – зона сплавлення, 3 –основний метал

Рис.16.1. Будова зварного з'єднання

Зона розплавленого металу або зона зварного шва (рис.16.2). Зварний шов утворюється в результаті процесу кристалізації. Утворення і ріст кристалів у зварній ванні починається з нерозплавленої поверхні основного металу – кристали ростуть за рахунок рідкої фази (I – дрібних рівноосних кристалів). Якщо розмір зварного шва достатньо великий і росту кристалів нічого не заважає, то кристали набирають витягнутої форми, утворюється зона стовбчатих дендритів (II). Ці дендрити ростуть назустріч один одному в напрямку, протилежному напрямку тепловідведення, тобто нормально до розробки кромок.



I – зона дрібних рівноосних кристалів; II – зона стовбчатих дендритів; III – зона рівноосних кристалів; IV – усадочна раковина

Рис.16.2. Структура металевих швів

Дендрити можуть зімкнутись в середній частині січення шва і створити ослаблену зону. Це пояснюється поганим зрощенням кінців дендритів один з одним, наявністю домішок, утворенням пустот, усадочних раковин і гарячих тріщин. Ослабленої зони можна уникнути при створенні умов, що перешкоджають утворенню грубої стовбчатої структури. III зона – зона рівноосних кристалів, IV – усадочна раковина.



**Структуру металу шва можна покращити:**

**Підбором теплового режиму зварювання** (прискорення процесу, зменшення часу перебування металу при високих температурах).

**Модифікуванням металу шва.**

**Застосуванням спеціальних присадних матеріалів**, до складу яких входять елементи, що утворюють високотемпературні надлишкові фази (тверді розчини, карбіди і т.п.).

При кристалізації зварних швів у них може розвиватись внутрішньокристалічна та зональна *ліквація*. Це пояснюється тим, що склад твердої і рідкої фаз зварювального шва відрізняються за концентрацією розчинених елементів (вуглецю, розчинених присадок і домішок).

**Внутрішньокристалічна ліквація** – це нерівномірний розподіл домішок на границях кристалів та міжосьових просторах дендритів.

**Зональна ліквація** – це нерівномірний розподіл домішок у макрооб'ємах шва, що пов'язано як з технологічними особливостями (перемінною швидкістю руху електрода при дуговому зварюванні; при застосуванні багатосарового зварювання), так і тим, що при нагріванні сталі деякі компоненти та домішки дифундують від менш нагрітих до більш нагрітих ділянок. Тому в зоні сплавлення підвищується концентрація цих компонентів.

**Будова зони термічного впливу**

**ЗТВ** – це ділянки основного металу, що прилягають до зварного шва і в яких проходять структурні зміни під впливом тепла, яке передається від зварювальної ванни.

Структуру окремих зон визначають такими основними факторами:

Температурою і часом нагрівання.

Швидкістю охолодження.

Хімічним складом сталі.

У зварних з'єднаннях з маловуглецевих сталей розрізняють такі зони (рис.16.3.):

I – метал шва (будова литого металу).

II – зона сплавлення (характеризується високою хімічною неоднорідністю (S – 150–200%, P – 100–150%, Si – 20%, Mo – 40%, Cr – 20%, W – 60–70%, Mn – 15%, Ni – 10%). Оскільки цю ділянку нагрівають до температур, близьких до  $T_{пл.}$ , при цьому проходить значний ріст зерна аустеніту. При охолодженні тут утворюється крупнозерниста структура з пластинчастими виділеннями надлишкового фериту, яку називають відманштеттовою;

III – ділянка крупнозернистої мікроструктури.  $T_{пир.}$  – температура початку інтенсивного росту зерен аустеніту. При неправильному проведенні режиму зварювання в навколишній зоні можна спостерігати перепал, для якого характерні крупні зерна, оточені оксидами по границі. Перепал є невиправним видом браку;

IV – ділянка нормалізації. Інтервал температур –  $T_{пир.} - A_{с3}$ . Утворюється нормальна дрібнозерниста структура з рівноосними зернами фериту. Подібну структуру спостерігають у сталях після нормалізації.

V – ділянка неповної перекристалізації. Інтервал температур  $A_{c3} - A_{c1}$ . При охолодженні утворюються дрібні зерна фериту і перлиту, крім того зберігаються відносно крупні зерна фериту, тобто утворюється різнозерниста структура.

VI – ділянка рекристалізації. Інтервал температур  $A_{c1} - 600^{\circ}C$ . У цьому температурному інтервалі можуть проходити лише процеси рекристалізації, якщо перед зварюванням основний метал піддавали пластичній деформації.

Перегрівання металу, для якого характерна крупнозерниста структура, різко погіршує пластичні властивості цієї зони. Тому після зварювання, якщо це можливо, його потрібно термічну обробляти – нормалізувати, що може повністю усунути перегрівання.

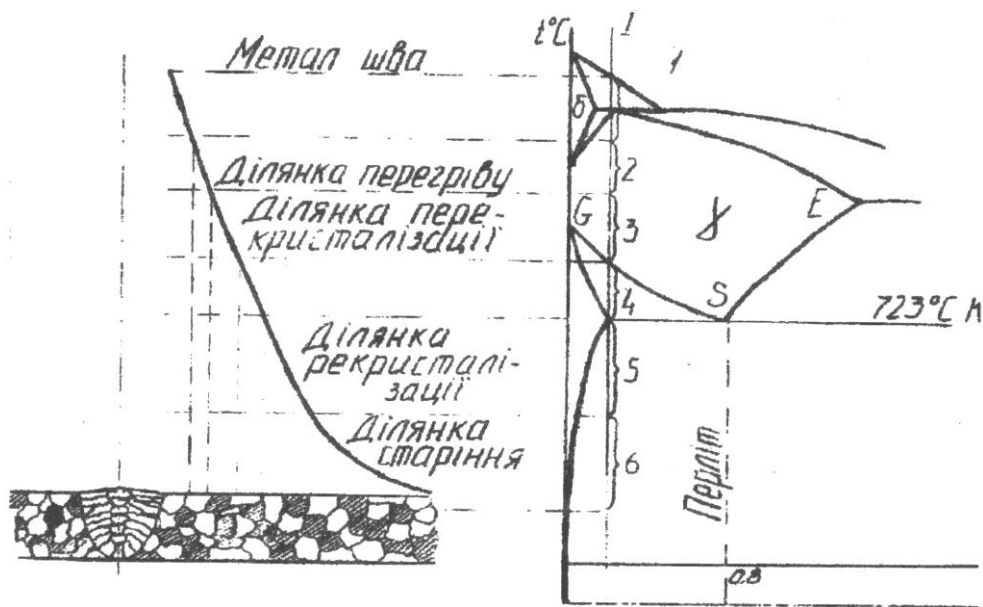


Рис.16.3. Схема ділянок у зоні термічного впливу зварного з'єднання

Якщо зварювання проводити у жорстких режимах, при яких швидкості нагрівання й охолодження дуже великі (точкове, роликкове), то і в маловуглецевих сталях можна спостерігати ділянки з дуже високою твердістю. Їх утворення викликане тим, що в процесі швидкого нагрівання вище  $t. A_{c3}$ , вуглець в аустеніті розподіляється нерівномірно – його концентрація в окремих зернах – від 0 до 0,8%. При швидкому охолодженні зерна аустеніту з високим вмістом вуглецю перетворюються в мартенсит.

Метастабільні структури в ЗТВ частіше утворюються в середньовуглецевих і легованих сталях.

### **Дефекти зварних з'єднань**

Дефекти в зварних з'єднаннях розрізняють за місцем розташування (зовнішні і внутрішні) та причинами виникнення.

Ці причини пов'язані з металургійними, термічними, гідродинамічними процесами при плавленні, кристалізації та охолодженні шва.

У процесі виготовлення зварних конструкцій можуть змінюватись розміри окремих елементів або конструкції в цілому, що викликане деформацією (коробленням) виробу та усадкою швів.

**Гарячі (кристалізаційні) тріщини** – це макро- і мікронесуцільності, які зароджуються в процесі первинної кристалізації металу шва і розвиваються при застиганні металу в твердому стані. Характерною їх особливістю є те, що вони розташовані вздовж напрямку росту стовбчатих кристалів.

Значно зменшити кількість гарячих тріщин можна:

- здійснивши попереднє підігрівання зварюваного металу в межах 150 – 500°C;
- за рахунок раціонального легування сталі;
- використанням режимів зварювання з мінімальним виділенням тепла;
- обмеженням умісту домішок сірки і фосфору в основному металі;
- подрібненням первинної структури металу шва.

**Холодні тріщини** утворюються при охолодженні зварного з'єднання до температур близько 200°C і є характерним дефектом зварних з'єднань із середньо- та високолегованих сталей перлітного і мартенситного класів. Найчастіше холодні тріщини утворюються в зоні навколо шва, рідше – в металі шва. Причини шва – гартувальні явища, сумарні напруження, підвищений вміст водню. Для попередження появи холодних тріщин потрібно регулювати термічний цикл зварювання шляхом вибору відповідного режиму та використовувати попереднє нагрівання.

**Пори** в швах мають круглу, витягнуту або більш складну форму. Виникають при первинній кристалізації металу зварювальної ванни в результаті виділення водню, кисню, азоту, оксиду вуглецю.

**Шлакові канали** – це заповнені шлаком несучільності. Утворюються, в основному, при зварюванні під флюсом у першому проході двосторонніх стикових швів, які утворюються на флюсовій підкладці.

**Зона несплавлення** – характерна для неї відсутність сплавлення між основним металом і металом зварювальної ванни периметром шва.

**Непроваром** називається місцева відсутність сплавлення між зварювальними елементами, між металом шва і основним металом. Причина – неправильний режим зварювання, зменшена сила струму, неправильний напрям електрода.

**Підріз** – це місцеве зменшення товщини основного металу біля межі шва. Призводить до різкої концентрації напружень. Причина – надто висока напруга дуги або недостатньо точне переміщення електрода по осі з'єднання.

**Напливом** називають натікання металу шва на поверхню основного металу без сплавлення з ним. Причина – неправильно вибраний режим зварювання, наявність на зварюваних кромках шару окалини.

**Пропали** – це порожнини у шві, утворені в результаті витікання зварювальної ванни. Причини – висока сила струму, збільшення зазору між зварними кромками, зміна нахилу електрода. Недопустимий дефект.

**Кратером** називають заглиблення, яке утворюється після обриву дуги в кінці шва біля межі сплавлення або між окремими шарами.

**Опіками** називають невеликі ділянки на основному металі поза зварним швом, які розплавилась. Ці ділянки мають низьку пластичність.

## Контрольні запитання

1. Будова зварного з'єднання.
2. Будова зони шва.
3. Шляхи покращення структури металу шва.
4. Різновиди ліквідації при кристалізації зварних швів.
5. Будова зони термічного впливу.
6. Дефекти зварних з'єднань.

## ТЕМА 10. МІКРОСТРУКТУРА І ВЛАСТИВОСТІ ЧАВУНІВ

**Чавунами** називають багатокомпонентні високовуглецеві сплави на основі заліза, що містять понад 2,14 % C; 1,0—3,5 % Si; 0,5—1,0 % Mn; до 0,3 % P та 0,2 % S.

Теоретична межа між сталями і чавунами вказана на діаграмі стану системи Fe – Fe<sub>3</sub>C точкою E, яка визначає найбільшу кількість вуглецю, що може бути розчинений в Fe<sub>γ</sub> при температурі 1147°C. Частіше зустрічаються чавуни з умістом 2,5 – 4,5 % C.

Крім заліза і вуглецю, які є головними компонентами сплаву, в чавунах завжди є інші елементи, що переходять до його складу в доменній печі із залізних руд, палива, флюсів. Такі елементи, як Ni, Cr, Cu, Mo потрапляють випадково, перебуваючи в залізних рудах, або ж їх вводять в чавун для надання йому особливих властивостей.

Вуглець у чавунах може бути або в хімічно зв'язаному із залізом стані у вигляді Fe<sub>3</sub>C, який називають **цементитом** або карбідом заліза, або у вигляді так званого вуглецю відпалу – **графіту**. Залежно від виду, в якому знаходиться вуглець в чавунах, їх поділяють на білі та сірі.

**Сірі чавуни** за формою графіту підрозділяють на сірі звичайні, ковкі і високоміцні. **Білі чавуни** – це переробні чавуни, їх використовують для виробництва сталі. Білі чавуни є також вихідним продуктом для отримання так званих "ковких" чавунів. Сірі звичайні, високоміцні та ковкі чавуни – це ливарні сплави, їх використовують для виготовлення відливок деталей машин. На поведінку вуглецю в сплавах із залізом впливають два фактори:

1. Хімічний склад сплаву.
2. Швидкість його охолодження, особливо в ділянці високих температур.

### **Білі чавуни**

У цих чавунах весь вуглець міститься у вигляді Fe<sub>3</sub>C. Цьому сприяє, головним чином, підвищений вміст Mn у чавунах. Марганець утворює карбіди з вуглецем і сприяє більшій стійкості Fe<sub>3</sub>C у чавуні. Марганцю в переробних чавунах міститься від 1,0 до 2,5 %. Аналогічно до марганцю діє хром, молібден та інші карбідоутворюючі елементи.

Мікроструктура білих чавунів залежить від умісту в них вуглецю, її легко можна визначити за діаграмою стану. Характерною структурною складовою білих чавунів є евтектика **ледебурит**.

**Ледебуритом** називають механічну суміш аустеніту і первинного цементиту, яка утворюється при температурі 1147 °C і містить 4,3 % C (точка C на діаграмі).

Білий чавун, який містить 4,3 % C, має структуру, яка складається тільки з ледебуриту. Це евтектичний білий чавун. При температурі 1147 °C аустеніт, який входить до складу евтектики, містить 2,14 % C. При зниженні температури від 1147 °C до 727 °C з аустеніту виділяється вторинний цементит (по лінії ES на діаграмі), який звичайно структурно не виявляється, так як він об'єднується з цементитом евтектичного походження. При температурі 727 °C аустеніт має 0,8 % C і при цій температурі перетворюється в перліт. Тому нижче 727 °C ледебурит є сумішню цементиту і перліту, яка зберігає характерні ознаки механічної суміші.

На відміну від ледебуриту, що утворився при температурі 1147 °С та існував до температури 727 °С, ледебурит в ділянках температур нижче евтектоїдної називають *перетвореним ледебуритом*. Білі чавуни з умістом вуглецю від 4,3 до 6,67 % називають заевтектичними. У структурі цих чавунів крім ледебуриту є зерна надлишкового первинного цементиту, який виділяється зі сплаву при його затвердінні, починаючи від лінії CD на діаграмі у формі довгих голкових кристалів.

Так як первинний цементит не має структурних перетворень, то при температурах нижче 727 °С структура заевтектичного білого чавуну складається з перетвореного ледебуриту і первинного цементиту. Білі чавуни з умістом вуглецю від 2,0 до 4,3 % називають доевтектичними.

Крім ледебуриту в їх структурі є надлишковий аустеніт, який виділяється з рідкого сплаву при його кристалізації по лінії BC на діаграмі. При охолодженні від температури 1147 °С до 727 °С аустеніт, що виділився спочатку, змінює свою концентрацію від 2,14 до 0,8 % С і при температурі 727 °С знову зазнає перлітного перетворення. Нижче 727 °С структура білого чавуну складається з перетвореного ледебуриту, перліту і вторинного цементиту.

Кількісне співвідношення між структурними складовими в білих чавунах визначають за діаграмою стану Fe - Fe<sub>3</sub>C, використовуючи правило відрізків.

Білі чавуни за механічними властивостями відзначаються крихкістю і високою твердістю, яка збільшується пропорційно вмісту вуглецю.

### *Сірі чавуни*

Характерною структурною складовою сірих звичайних чавунів є пластинчатий *графіт*.

Графіт не пластичний, має невисокі міцність і твердість. В сірому чавуні графіт, що розташований у вигляді пластинок різної форми і довжини, розрихлює його металічну основу і знижує властивості.

Графіт, як не металева складова, погано полірується і не відбиває світла в мікроскопі. Тому вже на нетравленому шліфі графіт можна легко відрізнити на фоні металевої основи чавуну.

Вуглець у сірому чавуні в більшості знаходиться у вигляді графіту. Частина вуглецю може також бути зв'язана з залізом у вигляді Fe<sub>3</sub>C.

$$C_{\text{заг}} = C_{\text{зв'яз}} + C_{\text{в}} \quad (9.1)$$

На відміну від мікроструктури білих чавунів, яку визначають загальним умістом вуглецю в чавуні, мікроструктура металевої основи сірих чавунів залежить тільки від кількості зв'язаного в них вуглецю. На цю кількість впливає наявність в чавуні домішок, які сприяють графітизації, особливо кремнію. Кількість кремнію в сірих чавунах заходиться в межах від 1,25 до 4,25 %. Аналогічно кремнію графітизації сірого чавуну сприяють також алюміній, нікель, мідь та ін.

На кількість Fe<sub>3</sub>C в чавуні значно впливає також швидкість охолодження сплаву. Швидке охолодження, як правило, сприяє утворенню Fe<sub>3</sub>C, повільне охолодження – його розкладу і виділенню графіту. *Графітизацією* називають процес виділення графіту при кристалізації або охолодженні сплавів заліза з

вуглецем. Графіт може утворюватись як із рідкої фази при кристалізації чавуну, так і з твердої фази при тривалому високотемпературному відпалі.

### **Класифікація сірих чавунів за видом металевої основи**

1. Якщо в сірому чавуні  $C_{зв'яз.} = 0\%$  і  $C_{заг.} = C_{граф.}$ , то мікроструктура такого чавуну складається з фериту і графіту.

2. Якщо уміст  $C_{зв'яз.} < 0,8\%$ , то структура сірого чавуну складається з фериту, перліту і графіту. Такі чавуни називають доевтектоїдними сірими чавунами.

3. Якщо уміст  $C_{зв'яз.}$  в сірому чавуні відповідає його вмісту в евтектоїді (0,8%), то мікроструктура такого чавуну складається з перліту і графіту.

4. Якщо уміст  $C_{зв'яз.}$  в сірому чавуні знаходиться в межах від 0,8 до 2,0 %, його мікроструктура складається з перліту, вторинного цементиту і графіту. Це так звані половинчасті сірі чавуни.

На практиці найчастіше отримують перлітний сірий чавун, який має високі механічні властивості, високу зносостійкість і добру оброблюваність різанням.

Форма виділення графіту в сірому чавуні істотно впливає на механічні властивості останнього. Чавун, в якому вуглець знаходиться у вигляді дрібних пластинок, має підвищені механічні властивості, чавун з крупнопластинчатим виділенням графіту – знижені механічні властивості. Високоміцний модифікований сірий чавун отримують шляхом додавання в чавун незадовго перед розливанням (на жолоб або в ковш) у невеликих кількостях (від 0,1 до 0,8 %) магнію і феросиліцію чи силікокальцію та інших. Модифікований чавун одержують з межею міцності на розтяг від 450 до 1000 МПа і відносним видовженням від 1,5 до 7,8 %.

### **Ковкий чавун**

**Ковким чавуном** називають чавун, отриманий спочатку у вигляді виливки білого чавуну, який шляхом подальшої термічної обробки – відпалу (томлення) змінює свою внутрішню будову і механічні властивості.

Отримання ковкого чавуну ґрунтується на термодинамічній нестабільності цементиту і його здатності при нагріванні до високих температур і витримуванні при цих температурах розкладатися з виділенням вуглецю у вигляді пластівців. Цей вуглець називають **вуглецем відпалу**.



Перебуваючи в чавуні у вигляді пластівців, вуглець відпалу руйнує і розпушує зв'язок зерен його металічної основи в меншій мірі, ніж графіт у сірому звичайному чавуні і такий чавун має підвищені механічні властивості, особливо міцність. Він також набуває деякої пластичності, яка дозволяє відливкам з ковкого чавуну сприймати пружні й незначні пластичні деформації без небезпеки їх руйнування.

Залежно від ступеня графітизації відливки структура ковкого чавуну може складатися з фериту і вуглецю відпалу; фериту, перліту і вуглецю відпалу або перліту і вуглецю відпалу.

### **Маркування чавунів**

Сірі звичайні чавуни згідно ГОСТ 1412–85 маркують згідно буквами СЧ і цифрами, що означають границю міцності на розтяг в кгс/мм<sup>2</sup>. Наприклад, СЧ10, СЧ15, СЧ20 і т.п.

Ковкі чавуни згідно ГОСТ 1215–79 маркують буквами КЧ і цифрами, перша з яких означає межу міцності на розтяг в кгс/мм<sup>2</sup>, а друга – відносне видовження в %. Наприклад, КЧ 33-8 ( $\sigma_p = 33$  кгс/мм<sup>2</sup> або 330 МПа,  $\delta = 8\%$ ).

Високоміцні чавуни згідно ГОСТ 7293–85 маркують буквами ВЧ і цифрами, які мають той же зміст, що і в ковких чавунах. Наприклад, ВЧ100 ( $\sigma_p = 100$  кгс/мм<sup>2</sup> або 1000МПа).

### **Контрольні запитання**

1. Яка різниця між сталями і чавунами?
2. В якому вигляді може бути присутнім вуглець у чавунах?
3. Яка різниця між білими і сірими чавунами? Галузь їх застосування.
4. Які структурні складові зустрічаються в білих чавунах?
5. Як поділяють білі чавуни залежно від вмісту в них С?
6. Що таке аустеніт, ледебурит, перліт?
7. Яка структурна складова характерна для сірих чавунів?
8. Як впливає графіт на властивості металічної основи сірого чавуну?
9. Властивості модифікованого чавуну.
11. Яка різниця в хім. складі білого і сірого чавунів? Де більше марганцю, де більше кремнію? Як ці елементи впливають на властивості чавунів?
12. Як впливає фосфор і сірка на ливарні властивості сірих чавунів?
13. Як класифікують сірі чавуни за структурою?
14. Що називають ковким чавуном? Яка різниця між ковким і звичайним сірим чавуном?
15. Яку мікроструктуру може мати ковкий чавун?
16. Як маркують чавуни?

### **Приклад тестових завдань для модульного контролю до розділу «Залізовуглецеві сплави»**

1. Що є мірою якості сталі?
  1. вміст вуглецю;
  2. розмір зерна;
  3. вміст шкідливих домішок сірки та фосфору;
  4. наявність легуючих елементів.
2. Сплав заліза з вмістом вуглецю 4,3 % називають:
  1. сталлю;
  2. евтектичним чавуном;
  3. доевтектичним чавуном;
  4. заевтектичним чавуном.
3. Твердий розчин вуглецю в  $\gamma$ -заліза називають:
  1. феритом;
  2. перлітом;



3. аустенітом;
4. цементитом.
4. Яка із приведених нижче схем характеризує евтектоїдне перетворення?
  1.  $\Phi + P \rightarrow A$ ;
  2.  $P \rightarrow A$ ;
  3.  $P \rightarrow A + Ц$ ;
  4.  $A \rightarrow \Phi + Ц$ .
5. Яка лінія діаграми Fe-Fe<sub>3</sub>C характеризує евтектичне перетворення?
  1. HJB;
  2. ABCD;
  3. ECF;
  4. PSK.
6. Яка з ліній діаграми Fe-Fe<sub>3</sub>C не описує ізотермічне перетворення?
  1. HJB;
  2. ECF;
  3. DFKL;
  4. PSK.
7. Сплав з вмістом вуглецю 1,5% називається:
  1. евтектоїдною сталлю;
  2. білим евтектичним чавуном;
  3. заевтектоїдною сталлю;
  4. доевтектичним чавуном.
8. Яка складова структури сталей не являється фазою?
  1. ферит;
  2. перліт;
  3. аустеніт;
  4. цементит.
9. Яку структуру має сплав з вмістом вуглецю 2%:
  1. ферит+перліт;
  2. перліт;
  3. ледебурит;
  4. перліт+цементит вторинний.
10. Чим відрізняються сірі чавуни від білих:
  1. вмістом вуглецю;
  2. вмістом цементиту;
  3. станом вуглецю;
  4. розміром зерна.
11. Яке перетворення на діаграмі є ізотермічним?
  1. по лінії ES;
  2. по лінії DFKL;
  3. по лінії PSK;
  4. по лінії АВ.
12. За яким показником сплави на діаграмі Fe-Fe<sub>3</sub>C поділяють на сталі та чавуни?
  1. за вмістом вуглецю;
  2. за вмістом цементиту;

3. за температурою;
  4. за вмістом заліза.
13. Яка складова структури сталей утворюється внаслідок перитектичного перетворення?
1. ферит;
  2. аустеніт;
  3. цементит;
  4. перліт.
14. Який тип структури не відноситься до браку:
1. крупнозерниста;
  2. стрічкова;
  3. дрібнозерниста;
  4. різнозерниста.
15. Що є мірою якості чавунів:
1. вміст вуглецю;
  2. розмір зерна;
  3. вміст шкідливих домішок;
  4. рівень механічних властивостей.
16. Який показник прийнято за основу при маркуванні вуглецевих сталей:
1. мікроструктуру;
  2. вміст шкідливих домішок сірки та фосфору;
  3. вміст вуглецю;
  4. розмір зерна.
17. Який тип браку є непоправимим?
1. крупнозерниста структура;
  2. структура перепалу;
  3. стрічкова структура;
  4. відманштеттова структура.
18. Яка із наступних марок сталей відноситься до високоякісних?
1. А20;
  2. Сталь20;
  3. У12;
  4. У10А.
19. Яка з наведених марок сталей поставляється за хімічним складом?
1. Ст 3;
  2. Ст 3кп;
  3. В Ст 3;
  4. Б Ст 3Г.
20. Які сплави заліза з вуглецем називають сталями? З вмістом вуглецю:
1. (0,1 - 4,3)%;
  2. (2,14 - 4,3)%;
  3. (4,3 - 6,67)%;
  4. (0,1 - 2,14)%
21. Чим відрізняються киплячі сталі від спокійних?
1. вмістом вуглецю;

2. вмістом шкідливих домішок;
  3. відсутністю Si;
  4. відсутністю розкислювачів.
22. До якої групи відноситься Сталь 45:
1. конструкційних;
  2. автоматних;
  3. інструментальних;
  4. сталей спецпризначення.
23. Який метод виробництва сталі є застарілим?
1. киснево-конверторний;
  2. бесемерівський;
  3. мартенівський;
  4. виплавка в електропечах.
24. Хімічна сполука заліза з вуглецем (6,67%С) називається:
1. ледебуритом;
  2. аустенітом;
  3. перлітом;
  4. цементитом.
25. Яка із наведених марок сталі є якісною?
1. Ст3;
  2. Сталь08Ю;
  3. У8А;
  4. БСт5кп2.
26. Яку із наступних марок сталей не можна піддавати термічній обробці?
1. Сталь 45;
  2. Ст 3;
  3. В Ст 3кп;
  4. Б Ст. 5.
27. Який із легуючих елементів підвищує поріг холодноламкості сталі?
1. Ni; 2. Ti; 3. Si; 4. Mn.
28. Чим відрізняються сталі марок У12 і У12Ш?
1. вмістом вуглецю;
  2. вмістом шкідливих домішок;
  3. розміром зерна;
  4. наявністю легуючих добавок.
29. За яким показником сірі чавуни поступаються сталям?
1. корозійною стійкістю;
  2. твердістю;
  3. міцністю;
  4. пластичністю.
30. З якою метою в сталі вводять легуючі елементи?
1. підвищення конструктивної міцності;
  2. покращення ливарних властивостей;
  3. усунення перегріву сталі;
  4. одержання зернистої структури.

31. Яка із нижче приведених марок сталі є особливо високоякісною?  
1. СтЗкпГ;  
2. У12А;  
3. Сталь75;  
4. У10Ш.
32. Які із приведених легуючих елементів не відносяться до групи основних?  
1. Al; 2. Cr; 3. Мо; 4. Ni; 5. Mn.
33. Який із проведених легуючих елементів не утворює в сталі карбідів?  
1. Cr; 2. Ni; 3. Ti; 4. Mn.
34. Які легуючі елементи розширюють область існування аустеніту?  
1. Ni;                      2. Cr;                      3. Mn;                      4. Ti.
35. Який вплив на властивості сталі виявляє нікель?  
1. підвищує міцність;  
2. підвищує в'язкість;  
3. підвищує твердість;  
4. підвищує міцність і в'язкість одночасно.
36. Яким чином впливають легуючі елементи карбідоутворюючої групи на положення основних ліній діаграми Fe-Fe<sub>3</sub>C?  
1. понижують лінію PSK;  
2. понижують лінію солідус;  
3. розширюють область існування аустеніту;  
4. звужують область існування аустеніту.
37. Який із легуючих елементів підвищує пружні властивості сталі?  
1. Cr;                      2. Mn;                      3. Ti;                      4. V.
38. Який вплив на властивості сталі мають мікродобавки бору?  
1. збільшують твердість;  
2. збільшують корозійну стійкість;  
3. розширюють інтервал робочих температур;  
4. підвищують міцність і твердість.
39. Який з легуючих металів підвищує корозійну стійкість сталі?  
1. Si;                      2. Mn;                      3. Ti;                      4. Cr.
40. Що характеризує конструктивна міцність матеріалу?  
1. комплекс фізико-механічних характеристик;  
2. показники міцності;  
3. показники пластичності;  
4. напружений стан матеріалу.

## ТЕМА 11. ТЕРМІЧНА ОБРОБКА СТАЛЕЙ

**Термічною обробкою** (ТО) називають нагрівання сплаву до певної температури, витримування його при даній температурі й подальше охолодження із заданою швидкістю.

**Метою** термообробки є отримання заданих властивостей сплаву шляхом зміни його структури без зміни форми і складу. Термічною обробкою можна змінити властивості (зміцнити, пом'якшити) сплавів з різною метою. Будь-який режим термообробки можна графічно представити в координатах температура – час (рис.12.1).

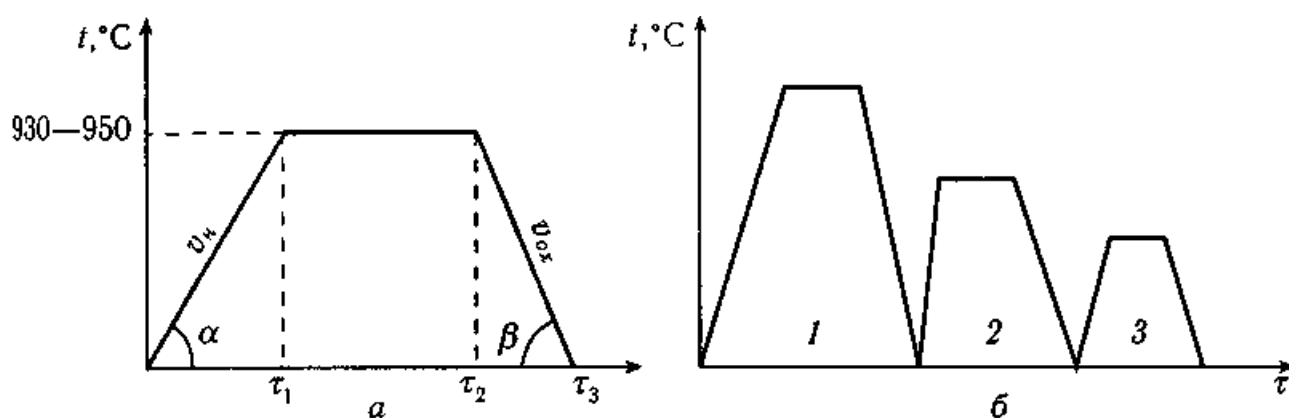


Рис. 12.1. Графік термічної обробки сталі: а — простої, б — складної.

Зміна складу і властивостей сплавів шляхом термічної обробки тісно пов'язана з діаграмами фазового стану. Діаграма стану показує, які сплави можуть піддаватися термічній обробці і в яких сплавах даної системи можна очікувати максимального ефекту термообробки. Для того, щоб можна було здійснити ТО, сплав повинен мати фазові перетворення в твердому стані або зміну розчинності зі зміною температури. Сплави, що не мають фазових перетворень, зумовлених зміною розчинності чи поліморфним перетворенням, не можуть зміцнюватись шляхом термічної обробки.

### **Основними видами ТО є:**

а) **відпал I-го роду** – термічна обробка сплавів, що не мають фазових перетворень у твердому стані, яка полягає у нагріванні їх до температури вище або нижче температури рекристалізації з подальшим повільним охолодженням (з піччю) з метою часткового або повного зняття явища наклепу. При нагріванні до температури 1050 °С у легованих сталях усувають дендритну ліквіацію.

б) **відпал II-го роду** – нагрівання вище температури фазових перетворень з подальшим повільним охолодженням з метою повного або часткового зняття внутрішніх напружень і пом'якшення сталі, усунення структурних дефектів. Якщо охолодження проводять прискорено, тобто на повітрі, то такий відпал називають **нормалізацією**;

в) **гартування** – нагрівання вище температури фазових перетворень із подальшим швидким охолодженням. При гартуванні різко змінюються властивості – твердість, міцність зростають, пластичність знижується, фіксується нерівноважний стан сплаву;

г) **відпуск** – термічна обробка, яка полягає у нагріванні загартованої сталі нижче температур фазових перетворень з метою зняття внутрішніх напружень і остаточного формування структури та властивостей.

Найпоширенішим видом зміцнюючої термообробки вуглецевих сталей, що містять більше 0,3 % вуглецю, є гартування з наступним відпуском.

Гартуванню піддають інструменти для обробки металів – різці, свердла, зубила, напильники; вимірювальний інструмент – калібри, шаблони; інструменти, що деформують метал у холодному стані – штампи, а також різноманітні деталі машин – пружини, шийки колінвалів та ін.

Основною структурною складовою загартованих сталей є **мартенсит**, тобто пересичений твердий розчин вуглецю в  $\alpha$ -Fe. Мартенсит утворюється в результаті бездифузійного перетворення переохолодженого до 200 °С аустеніту за схемою:



Мартенсит має дуже високу твердість і разом з тим він крихкий та непластичний.

Перетворення аустеніту в мартенсит супроводжується збільшенням об'єму на 2,5 – 3 %. Збільшення об'єму є однією з причин виникнення внутрішніх напруг, які можуть викликати деформування й утворення тріщин у виробках в процесі гартування.

Крім мартенситу, структурними складовими загартованої сталі можуть бути сорбіт, тростит і бейніт.

**Сорбіт** – це дрібнодисперсна суміш фериту і цементиту, яка утворюється в результаті розпаду аустеніту, переохолодженого до 650 °С.



Сорбіт має високі механічні властивості: високу міцність і добру в'язкість при підвищеній твердості (НВ 250 – 300).

**Тростит** також є сумішшю фериту і цементиту, але більш дисперсною, ніж сорбіт. Утворюється в результаті розпаду аустеніту, переохолодженого до 600 – 550 °С. Разом із високою міцністю тростит має високу границю пружності, але низьку в'язкість.

**Бейніт** – це структура змішаного типу – частково перлітного, частково мартенситного, оскільки складається з пересиченого розчину вуглецю в  $\alpha$ -Fe і цементиту  $\text{Fe}_3\text{C}$ . Твердість бейніту вища, ніж у перлітних структур (сорбіту і троститу), і нижча, ніж у мартенситу. Бейніт утворюється в проміжній ділянці, що межує з ділянками перлітного і мартенситного перетворень.

Залежно від способу охолодження гартування сталей можна проводити: ізотермічним методом, тобто в нагрітому середовищі до температури, яка лежить в інтервалі між точками  $A_{c1}$  (727 °С) і  $M_n$  (точка початку мартенситного перетворення); шляхом неперевного охолодження.

Процес ізотермічного розпаду зображають у вигляді С-подібних кривих, які показують кількість перетвореного аустеніту залежно від часу, що пройшов з початку перетворення при даній температурі (рис.12.2).

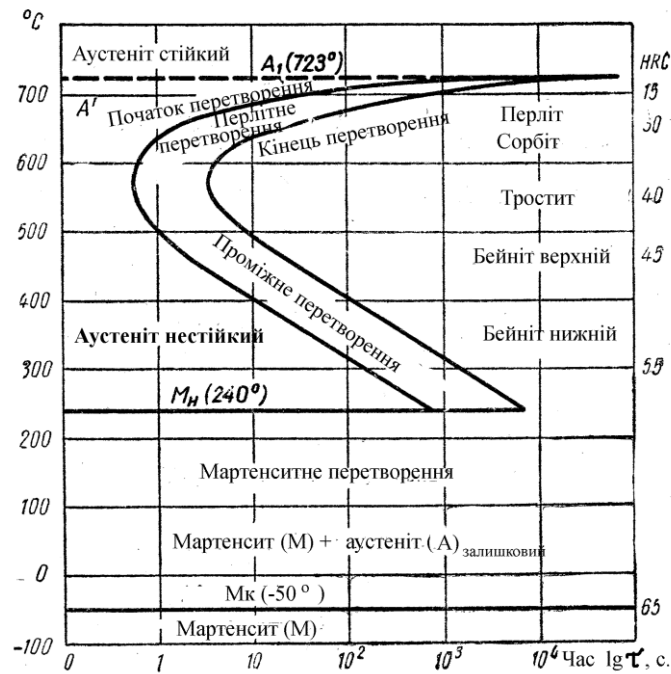


Рис.12.2. Діаграма ізотермічного розпаду аустеніту.

Перетворення при неперевному охолодженні пов'язують з перетвореннями при ізотермічному розпаді переохолодженого аустеніту, шляхом накладання кривих неперервного охолодження на С-подібну діаграму. При малих швидкостях будуть отримані перлітні структури – сорбіт, тростит, а при великих – мартенсит.

**Критична швидкість гартування** ( $V_{кр}$ ) – це мінімальна швидкість охолодження, при якій аустеніт перетворюється в мартенсит. Вона є важливою технологічною характеристикою ТО, оскільки залежно від неї обирають охолоджуюче середовище.

Температурний інтервал мартенситного перетворення ( $M_n - M_k$ ) залежить від хімічного складу сталі (рис.12.3.).

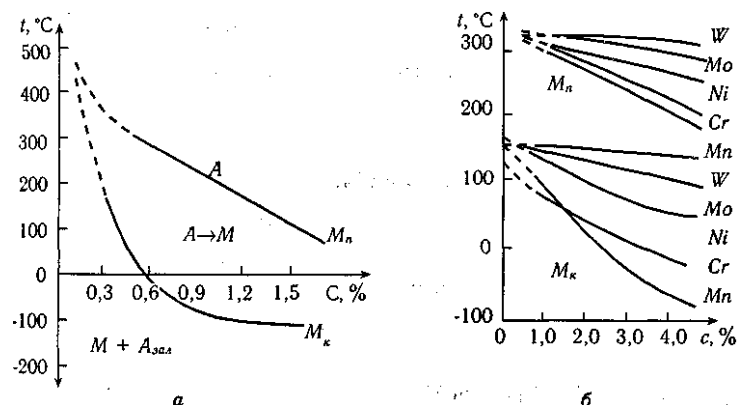


Рис. 12.3. Вплив вмісту вуглецю (а) і легуючих елементів (б) на температури мартенситних точок  $M_n$  і  $M_k$ .

Такі види термічної обробки, як гартування, нормалізація, відпал та ін. можна розглядати як комбінації з чотирьох головних перетворень, які відбуваються в сталі:

- перліту в аустеніт вище точки  $A_1$  при нагріванні:  $\Phi + \text{Ц} \rightarrow \text{А}$ ;
- аустеніту в перліт нижче точки  $A_1$  при охолодженні:  $\text{А} \rightarrow \Phi + \text{Ц}$
- аустеніту в мартенсит при температурах нижче температури метастабільної рівноваги цих фаз:  $\text{А} \rightarrow \text{М}$ ;
- розпадання мартенситу:  $\text{М} \rightarrow \Phi + \text{Ц}$ .

Ці перетворення можна ілюструвати графіком зміни вільної енергії в залежності від температури (рис. 12.3). Як видно з графіка, при температурах вище точки  $A_1$  найменшу вільну енергію має аустеніт і тому йде перетворення перліту в аустеніт. Нижче точки  $A_1$  спостерігається зворотне перетворення.

При температурі нижче  $t_0$  вільна енергія перліту мінімальна, але робота, яка необхідна для переходу аустеніту в мартенсит, менша, ніж для утворення перліту, і тому перехід аустеніту в мартенсит передре подальшому переходу мартенситу в перліт. Останній перехід енергетичне вигідний у всьому температурному діапазоні

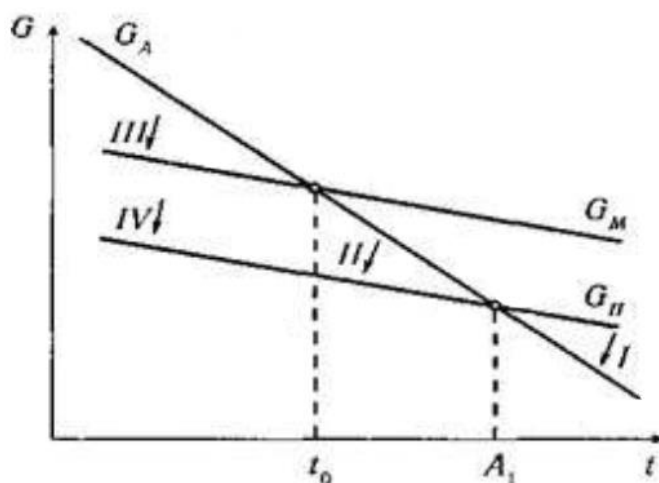


Рис. 12.3. Зміна вільної енергії аустеніту  $G_A$ , мартенситу  $G_M$  і перліту  $G_P$  зі зміною температури

Процес утворення аустеніту при нагріванні сталей складається з поліморфного  $\alpha \rightarrow \gamma$ -перетворення, розчинення в аустеніті цементиту або спеціальних карбідів, нітридів та інтерметалідів у легованих сталях, а також рекристалізації зерен аустеніту.

Утворення аустеніту при нагріванні може відбуватись за двома конкуруючими механізмами фазових перетворень: кристалографічне неупорядкованому і упорядкованому.

При неупорядкованому механізмі утворення аустеніту поліморфне  $\alpha \rightarrow \gamma$ -перетворення супроводжується перекристалізацією, тобто зміною величини і орієнтації зерен  $\gamma$ -фази, які утворюються по відношенню до вихідної  $\alpha$ -фази. При упорядкованому механізмі перехід не супроводжується перекристалізацією, яка протікає при більш високих температурах внаслідок первинної рекристалізації фазонаклепаного при зсувному перетворенні аустеніту.

Головним фактором, який визначає можливість того чи іншого механізму перекристалізації, є тип вихідної структури, а точніше її кристалографічна упорядкованість. При вихідній неупорядкованій структурі (ферито-карбідна суміш)



має місце тільки невпорядкований механізм перекристалізації. При вихідній впорядкованій структурі (мартенсит, бейніт, відманштеттовий ферит) може спостерігатись той або інший механізм перекристалізації.

Часто нагріванню для аустенізації піддають сталь, що має вихідну кристалографічне невпорядковану структуру ферито-карбідної суміші (ферито перлітна, перлітна, перлітна з надлишковими карбідами). При нагріванні вище критичних точок відбувається поліморфне перетворення. Зародки аустеніту утворюються по зсувному механізму, але цей процес співпадає з рекристалізацією наклепаного при фазовому перетворенні аустеніту. Тому при переході через критичну точку утворюється дрібне зерно аустеніту. Процеси фазового переходу і рекристалізації при такому механізмі співпадають.

Перетворення перліту на аустеніт у повній відповідності з діаграмою системи Fe—Fe<sub>3</sub>C може відбуватись лише за дуже повільного нагрівання. При звичайних умовах нагрівання перетворення відбувається лише при температурах, дещо більших від тих, що зазначені на діаграмі.

Експериментальне встановлено, що чим вища температура і чим швидше відбувається нагрівання, тим інтенсивніше і при більш високій температурі проходить перетворення, і навпаки. Надто повільне нагрівання призводить до злиття температур початку та кінця кристалізації.

Це, очевидно, й буде випадок зрівноваженого перетворення. У реальних умовах перетворення спостерігаються при температурі вище точки A<sub>c1</sub>, причому не при одній температурі, а в інтервалі температур, що лежать тим вище, чим швидше нагрівається сталь.

Кристали аустеніту зароджуються переважно на міжфазних поверхнях ферит-цементит. Перетворення складається з двох паралельних процесів: поліморфного перетворення  $\alpha \rightarrow \gamma$  та розчинення у  $\gamma$ -залізі кристалів цементиту. Поліморфне перетворення йде значно швидше, тому після його завершення аустеніт зберігає неоднорідність за вуглецем, для усунення якої потрібен певний час, що залежить від температури — чим вища температура перетворення  $P \rightarrow A$ , тим швидше перерозподіляється вуглець в аустеніті. Швидкість гомогенізації аустеніту залежить від вихідної структури сталі. Чим дрібніші частки цементиту і, відповідно, більша їх сумарна поверхня, тим швидше досягається однорідність аустеніту.

Отже, можемо зробити висновок, що процес перетворення перліту на аустеніт різко прискорюється за таких умов:

- при високій температурі;
- за наявності дрібних зерен перліту;
- при більшому вмісті у сталі вуглецю;
- при швидкому нагріванні.

Інтервал температур, в якому відбувається процес аустенізації, тим більший, чим швидше нагрівається метал.

Наведені положення стосуються лише евтектоїдної сталі. Доевтектоїдні сталі після нагрівання вище точки A<sub>c1</sub> складаються з аустеніту та фериту і тільки вище точки A<sub>c1</sub>, сталь набуває будови однорідного аустеніту — лінія GOS. Заевтектоїдні сталі, нагріті вище точки A<sub>c1</sub>, складаються з аустеніту й цементиту (вторинного) і

лише у нагрітих вище точки  $A_{ст}$  формується однорідна структура аустеніту — лінія SE.

### ***Визначення температури нагрівання для гартування***

Температуру нагрівання для гартування визначають відповідно до діаграми стану Fe – Fe<sub>3</sub>C за хімічним складом сталі. Для доевтектоїдної сталі оптимальна температура нагрівання має бути на 30 – 50 °C вище критичної точки  $A_3$ , а для заевтектоїдної сталі – на 30 – 50 °C вище критичної точки  $A_1$ .

В якості гартувальних середовищ використовують воду; розчини солей, лугів, кислот; мінеральні масла; розплави солей і легкоплавких металів.

### ***Способи гартування сталей***

- а) гартування в одному охолоджувачі;
- б) перервне гартування;
- в) гартування з підстуджуванням;
- г) гартування із самовідпуском;
- д) ступінчасте гартування;
- е) ізотермічне гартування;
- є) поверхневе гартування.

### ***Гартування в одному охолоджувачі***

Виріб, нагрітий до температури гартування, занурюють у гартувальне середовище (воду чи масло), де витримують до повного охолодження. Цей метод гартування найбільш простий і використовується для більшості сталевих виробів нескладної форми. Недоліком цього методу є небезпека виникнення великих внутрішніх напружень при температурі мартенситного перетворення, якщо гартування проводилось у воді.

### ***Перервне гартування***

Виріб охолоджують спочатку в швидко охолоджуючому середовищі, щоб уникнути розпаду аустеніту в перлітній або бейнітній областях, а потім – у повільно охолоджуючому, щоб уникнути утворення термічних тріщин. Як правило, перше охолодження проводять у воді, а потім виріб переносять в масло. Цей спосіб використовують для гартування виробів з вуглецевих інструментальних сталей середніх і великих січень. Недоліком цього методу є складність регулювання часу витримання у воді. Орієнтовно час витримання – 1 сек, на кожні 5 – 6 мм товщини виробу.

### ***Гартування з підстуджуванням***

Використовують цей метод для зменшення внутрішніх напружень. Загартовану деталь перед зануренням в охолоджувач деякий час витримують на повітрі. При підстуджуванні температура деталей не повинна знижуватися нижче критичної точки  $A_{с3}$  (для доевтектоїдних сталей) чи  $A_{с1}$  (для заевтектоїдних сталей).

### ***Ступінчасте гартування***

Загартовану деталь після нагрівання до температури гартування охолоджують у гартувальному середовищі, нагрітому вище температури  $M_n$ , що забезпечує швидкість охолодження вище критичної в інтервалі мінімальної стійкості аустеніту. Витримання в цьому середовищі повинно надати загартованій деталі температуру гартувальної ванни і не повинно перевищувати час, що

відповідає початку перетворення аустеніту для даної сталі. Потім проводять повільне охолодження, під час якого і проходить гартування, тобто перетворення аустеніту в мартенсит. Цей спосіб дає можливість провести гартування з мінімальними внутрішніми термічними напругами. Використовують ступінчате гартування для деталей з вуглецевих сталей діаметром до 10...12 мм, а з легованих – діаметром до 20...30 мм.

### ***Ізотермічне гартування***

Загартовувану деталь після нагрівання до температури гартування охолоджують в гартувальному середовищі, температура якого має бути в інтервалі 250 – 400 °С (трохи вище  $M_n$ ), тривалість часу витримування в гартувальному середовищі визначається часом перетворення аустеніту при даній температурі. Після ізотермічного гартування сталь має структуру бейніту, набуває високої твердості і підвищеної в'язкості. Гартувальними середовищами для ізотермічного гартування є розплави солей металів.

### ***Гартування з самовідпуском***

Застосовують для ударного інструменту (зубила, молотки і т. п.), якому необхідно надати різної твердості і в'язкості в різних частинах. При гартуванні у воді охолоджують тільки робочу частину інструменту, а потім, відбувається її нагрівання за рахунок частини інструмента, яку не занурювали у воду, до появи на поверхні робочої частини певного кольору:

солон'яно-жовтого кольору, якому відповідає	220 – 240 °С,
оранжевого –	240 – 260 °С,
червоно – фіолетового –	260 – 280 °С,
синього –	280 – 300 °С.

Нагрівання припиняють повторним охолодженням всього інструменту.

### ***Поверхнєве гартування***

Для деталей, що працюють в умовах тертя, висока твердість потрібна лише на поверхні. Цього можна досягти поверхневим гартуванням, при якому до температури гартування нагрівають тільки поверхневий шар металу, який потім швидко охолоджують. При цьому мартенсит утворюється у поверхневому шарі, а серцевина зберігає вихідну структуру. Нагрівання поверхневого шару деталі можна здійснювати газовим полум'ям, електрострумом і т. п.

### ***Відпуск сталі***

Гартування сталі супроводжується збільшенням об'єму, що викликає виникнення значних внутрішніх напруг. Гартувальні напруги можуть призвести до короблення й утворення тріщин у процесі гартування або викликати деформацію в умовах експлуатації. Тому загартовані деталі машин чи інструментів завжди піддають відпуску.

Відпуск здійснюють шляхом нагрівання загартованої сталі до температури нижчої  $A_1$ . Основним перетворенням при відпуску є розпад мартенситу – виділення надлишкового вуглецю у вигляді дрібних кристалів карбїду заліза, мартенсит гартування переходить у мартенсит відпуску. Залишковий аустеніт також перетворюється в мартенсит відпуску, а потім зі збільшенням температури нагрівання спостерігається ряд послідовних перетворень: мартенсит відпуску перетворюється в бейніт відпуску, бейніт – у тростит, а тростит – у сорбіт відпуску.

Структури гартування мають голково-пластинчасту будову, а структури відпуску – зернисту.

Залежно від температури нагрівання розрізняють три різновиди відпуску: низький, середній і високий відпуск.

**Низький відпуск** полягає в нагріванні загартованої сталі до температури 200 – 250 °С, витримуванні при цій температурі та повільному охолодженні. Утворена структура – відпущений мартенсит. Такий відпуск рекомендують для інструментальних сталей і цементованих деталей.

**Середній відпуск** полягає в нагріванні загартованої сталі до 350 – 400 °С, витримуванні при цій температурі та повільному охолодженні. Утворена структура – тростит відпуску. Такий відпуск рекомендують для пружин і ресор.

**Високий відпуск** полягає в нагріванні загартованої сталі до 550 – 650°С, витримуванні при цій температурі та повільному охолодженні. Утворена структура – сорбіт або перліт відпуску. Гартування сталі в комплексі з високим відпуском на сорбіт називають термічним **покращенням**. Застосовувати покращення рекомендують для середньовуглецевих сталей.

#### Завдання №1. Термічна обробка конструкційних сталей.

Встановлення залежності твердості сталей від швидкості охолодження.

Для виконання роботи взяти зразки Сталі 45 і нагріти їх до температури гартування. Тривалість витримки при температурі нагрівання – 10 хв. Нагріті зразки вийняти і швидко перенести в охолоджуюче середовище: на повітря, в масло, в розчин лугу, воду. Побудувати теплові режими відпалу, нормалізації і гартування. Вказати прогнозовані структури після кожного виду термічної обробки.

Після гартування зразки зачистити для зняття окалини і обезвуглецьованого шару. Виміряти твердість на твердомірі Роквелла з алмазним конусом при навантаженні 150 кг. Результати занести у таблицю. За одержаними даними побудувати графік в координатах: твердість – швидкість охолодження.

#### Завдання №2. Визначення критичних точок сталей.

Для виконання роботи взяти зразки Сталі 45 і нагріти до різних температур:

- нижче  $A_{c1}$  680 °С;
- вище  $A_{c1}$ , але нижче  $A_{c3}$  740 °С;
- вище  $A_{c3}$  800 °С;
- вище  $A_{c3}$  860 °С.

Зразки витримати при даних температурах 10 хв, а потім охолодити у воді. Після зняття окалини виміряти твердість на твердомірі Роквелла з алмазним конусом. Результати занести у таблицю. Вказати прогнозовану структуру після гартування.

#### Завдання №3. Вплив вмісту вуглецю на твердість сталей після гартування.

Для виконання роботи взяти зразки сталі з різним вмістом вуглецю (Сталь 08, Сталь 20, Сталь 45, У8, У12). Зразки нагріти до температури гартування, витримати 10 хв і охолодити у воді. Після зняття окалини виміряти твердість на твердомірі Роквелла алмазним конусом. Результати занести у таблицю. Вказати прогнозовану структуру після гартування. За отриманими даними побудувати графік залежності твердості від вмісту вуглецю.

**Завдання №4. Вплив температури відпуску на мікроструктуру і твердість загартованих сталей.**

Для проведення роботи взяти зразки сталі У8, попередньо загартовані на мартенсит. Перед відпуском виміряти твердість на твердомірі Роквелла з алмазним конусом. Потім провести відпуск при температурах 200, 400, 600 °С. Час витримування при температурі відпуску – 20 і 60 хвилин. Побудувати тепловий режим відпуску сталі.

Після відпуску виміряти твердість. За одержаними даними побудувати графік залежності твердості від температури відпуску.

### **Контрольні запитання**

1. Зв'язок діаграми стану з можливістю проведення термічної обробки.
2. Основні види термічної обробки сталі та їх призначення.
3. Чотири основних перетворення в сталях при нагріванні та охолодженні.
4. Діаграма ізотермічного розпаду переохолодженого аустеніту.
5. Будова і властивості продуктів розпаду аустеніту.
6. Мартенситна діаграма. Що таке мартенсит?
  1. Особливості мартенситного перетворення.
  2. Відпали I-го та II-го роду, їх різновиди.
  3. Мета гартування, вибір температури нагрівання для гартування.
  4. Гартувальні середовища.
  5. Способи гартування сталі, їх переваги й недоліки, області використання.
1. Види і призначення відпуску сталі.
2. Перетворення в сталях при відпуску.

### **Приклад тестових завдань для модульного контролю до розділу «Термічна обробка сталі»**

1. Яка мета рекристалізаційного відпалу сталі:
  1. часткове зняття наклепу;
  2. усунення дендритної ліквіації;
  3. пом'якшення сталі перед обробкою різанням;
  4. повне зняття наклепу.
2. Для чого заевтектоїдну сталь піддають відпалу на зернистий перліт (сфероїдизації):
  1. подрібнення зерна структури;
  2. подрібнення цементитної сітки;
  3. зняття внутрішніх напруг;
  4. усунення дефектів структури.

3. Який вид охолодження використовують при нормалізації сталі:
  1. вода;
  2. мінеральне масло;
  3. розплави солей;
  4. повітря.
4. Що є основою при виборі температур нагрівання під термічну обробку сталі:
  1. мартенситна діаграма;
  2. діаграма ізотермічного розпаду аустеніту;
  3. діаграма стану залізо-цементит;
  4. хімічний склад сталі.
5. Який із видів ТО передбачає найбільш повільне охолодження:
  1. гартування;
  2. дифузійний відпал;
  3. повний відпал;
  4. нормалізація.
6. Що необхідно знати для визначення критичних точок сталі:
  1. повний хімічний склад;
  2. вміст вуглецю;
  3. вміст кисню;
  4. вміст шкідливих домішок S і P.
7. Що покладено (взято) за основу сучасної класифікації видів термічної обробки:
  1. спосіб нагрівання;
  2. спосіб охолодження;
  3. температури нагрівання;
  4. характер внутрішніх перетворень.
8. Сталі з яким вмістом вуглецю не піддають гартуванню:
  1.  $C < 0,8\%$ ;
  2.  $C > 1,0\%$ ;
  3.  $C < 0,3\%$ ;
  4.  $C > 1,5\%$ .
9. В чому полягає суть термомеханічної обробки:
  1. зміцнення за рахунок дії хімічного і теплового факторів;
  2. зміцнення за рахунок наклепу;
  3. зміцнення за рахунок дії теплового фактору;
  4. за рахунок одночасної дії теплового фактору та пластичної деформації.
10. Який із видів термічної обробки не проводиться при температурах нижче лінії фазових перетворень(PSK) для сталей?
  1. нормалізація;
  2. гартування;
  3. відпал;
  4. відпуск.
11. Які фактори є основними при хіміко-термічній обробці?
  1. температура;
  2. температура та пластична деформація
  3. температура і час;
  4. температура та хімічно-активне середовище.
12. Яку із задач неможливо вирішити відпалом II роду?
  1. пом'якшення сталі;
  2. подрібнення сталі;
  3. зняття явища наклепу;
  4. усунення дефектів структури сталі.
13. Яке із перетворень в сталі не відноситься до основних?
  1. П – А;
  2. А – П;
  3. А – Т;
  4. А – М;
14. Які із перетворень супроводжують ТО, що складається із гартування та середнього відпуску?
  1. П – А; А – М;
  2. П – А; А – С;
  3. П – А; А – Т;
  4. П – А; А – М; М – Т.
15. Яка ТО сталі забезпечить одержання зернистої структури?
  1. повний відпал;
  2. нормалізація;
  3. гартування з високим відпуском;
  4. ізотермічний відпал;

16. Який із видів ТО потрібно використати для усунення в структурі сталі цементитної сітки?
1. повний відпал;
  2. гартування;
  3. рекристалізаційний відпал;
  4. сфероїдизуючий відпал.
17. Які із наведених нижче процесів не мають місця при відпуску?
1. вихід вуглецю з решітки заліза;
  2. утворення  $\epsilon$ -карбїду;
  3. коагуляція та сферодизація частинок структури;
  4. підвищення твердості.
18. В чому різниця між продуктами перетворення А – П в перлітній області?
1. в формі кристалів;
  2. в розмірах пластин;
  3. в складі кристалів Ф і Ц по вуглецю;
  4. в фазовому складі.
19. Яка із структур не утворюється в перлітній області при перетворенні А – П?
1. мартенсит;
  2. сорбіт;
  3. бейніт;
  4. тростит.
20. Який із видів відпалу не ґрунтується на фазових перетвореннях в твердому стані?
1. гомогенізаційний;
  2. повний;
  3. ізотермічний;
  4. нормалізація.
21. Яку структуру має мартенсит?
1. голчасту;
  2. сітчасту;
  3. полієдричну;
  4. пластинчасту.
22. Який вид ТО необхідно застосувати для одержання дрібнозернистої структури?
1. рекристалізаційний відпал;
  2. нормалізація;
  3. гартування з високим відпуском;
  4. ізотермічний відпал.
23. Якої структури мартенситу не існує?
1. крупноголчастої;
  2. крупнопластинчастої;
  3. дрібноголчастої;
  4. безструктурної.
24. За допомогою якої ТО можна усунути явище наклепу?
1. дифузійний відпал;
  2. відпал на зернистий перліт;
  3. гартування з високим відпуском;
  4. рекристалізаційний відпал.
25. Яка із структур сталі має найвищу пружність?
1. перліт;
  2. сорбіт;
  3. мартенсит;
  4. троостит.
26. Із наведених нижче оберіть вірний варіант нагрівання сталі 45 під гартування?
1. PSK+(30÷50)°C;
  2. GS+(30÷50)°C;
  3. PSK-(30÷50)°C;
  4. GS-(30÷50)°C.
27. Вкажіть типову ТО пружин із сталі?
1. нормалізація;
  2. гартування з високим відпуском;
  3. гартування із середнім відпуском;
  4. ізотермічний відпал.
28. Що лежить в основі обробки холодом?
1. перетворення аустеніту в перліт;
  2. перетворення аустеніту в мартенсит;
  3. перетворення аустеніту в бейніт;

4. розпад мартенситу на ферито-цементитну суміш.
29. Яка мета обробки сталей холодом?
1. максимальне підвищення міцності;
  2. максимальне підвищення твердості;
  3. підвищення в'язкості;
  4. підвищення міцності і в'язкості;
30. Вкажіть типову ТО вимірювального інструменту?
1. гартування із середнім відпуском;
  2. гартування із низьким відпуском;
  3. гартування з обробкою холодом та низьким відпуском;
  4. гомогенізація.
31. Що є основними факторами впливу при термічній обробці?
1. температура, тиск;
  2. хімічний склад;
  3. температура, час;
  4. швидкість нагрівання;
32. В чому полягає суть термічної обробки?
1. зміні хімічного складу;
  2. зміні характеру мікроструктури;
  3. зміні мікроструктури та властивостей;
  4. зміні розміру зерна;
33. На чому ґрунтується сучасна класифікація видів термічної обробки?
1. швидкості нагрівання;
  2. швидкості охолодження;
  3. температурі нагрівання;
  4. характері фазових перетворень.
34. Що не береться до уваги при проведенні відпалу I роду?
1. фазові перетворення;
  2. наявність ліквіації;
  3. наявність наклепу;
  4. вміст вуглецю.
35. У якому випадку буде ефективним використання термічної обробки по II та III групах (відпал II та гартування) в сталях?
1. при малому вмісті вуглецю;
  2. при наявності фазових перетворень в твердому стані;
  3. при відсутності фазових перетворень в твердому стані;
  4. при високому вмісті вуглецю.
36. Який вид охолоджувальних середовищ не використовується в ТО?
1. вода;
  2. мінеральне масло;
  3. водний розчин лугів.
  4. розплав солей;
  5. водний розчин кислот;
37. Який порядок розташування структур відповідає послідовному збільшенню твердості?
1. А – Т – С – П;
  2. А – С – Т – М;
  3. А – П – С – Т;
  4. А – Б – С – Т.



38. Для яких сталей гартування є неефективним і не призведе до помітного зміцнення?
- |                        |                      |
|------------------------|----------------------|
| 1. низьковуглецевих;   | 2. легованих;        |
| 3. середньовуглецевих; | 4. високовуглецевих. |
39. Яка структура утвориться у сталі з 0,45%С при температурі перетворення 650°C?
- |             |                    |
|-------------|--------------------|
| 1. тростит; | 2. ферит + перліт; |
| 3. перліт;  | 4. бейніт.         |
40. Пересичений розчин вуглецю в  $\alpha$ -залізі називається:
- |              |                 |
|--------------|-----------------|
| 1. перлітом; | 2. мартенситом; |
| 3. феритом;  | 4. аустенітом.  |

## ТЕМА 12. ХІМІКО-ТЕРМІЧНА ОБРОБКА СТАЛЕЙ

**Хіміко-термічною обробкою** (ХТО) називають процес, при якому під дією температури і хімічно-активного середовища (**карбюризатора**) відбувається зміна хімічного складу, структури і властивостей поверхневих шарів металу. Метою хіміко-термічної обробки є підвищення поверхневої твердості, зносо- і жаростійкості, корозійної стійкості тощо.

**Переваги** хіміко-термічної обробки порівняно з поверхневим гартуванням:

- більша різниця у властивостях поверхні і серцевини;
- хіміко-термічній обробці можна піддавати різні за формою і розмірами деталі;
- хіміко-термічна обробка змінює не лише структуру, але й хімічний склад поверхневих шарів.

**Недоліками** ХТО є тривалість процесу ( в окремих випадках до 200 год) та низька продуктивність праці.

Під час ХТО виділяють наступні стадії процесу:

- **дисоціація** – процес розпаду вихідних насичуючих середовищ з утворенням активних атомів насичуючих елементів;
- **абсорбція** – накопичення насичуючих елементів на поверхні виробів;
- **дифузія** – проникнення насичуючого елемента у глибину виробу.

До ХТО належать процеси насичення поверхневих шарів виробів вуглецем (цементация), азотом (азотування), вуглецем і азотом (ціанування і нітроцементация), алюмінієм (алітування), хромом (хромування), кремнієм (силікування), бором (борування) та ін.

### **Цементация сталей**

**Цементациєю** називають процес дифузійного насичення сталі вуглецем для одержання його необхідного розподілу, високої твердості поверхневого шару при високій в'язкості серцевини, що досягається наступною термічною обробкою цементованих виробів.

Цементации піддають зубчаті колеса, пальці, вали, осі, важелі, черв'яки, обручі тощо. Цементации піддають сталіні вироби з вмістом вуглецю 0,1...0,25 %, (конструкційні сталі – Сталі 10, 15, 20, сталі звичайної якості – Ст 3, Ст 4). За необхідності одержання після цементации і наступної термічної обробки більш міцної серцевини використовують леговані цементовані сталі з вмістом вуглецю 0,1...0,3 % (15Х, 20ХГ, 18ХГТ, 25ХГТ, 20ХНМ, 12ХН3А, 12Х2Н4А, 15ХР, 20ХГР та ін.).

#### **Технологічні параметри цементации:**

Температура нагрівання  $T_{\text{нагр.}} = 900 - 950$  °С, тривалість ізотермічного витримування при температурі нагрівання  $\tau = 8 - 12$  год, товщина цементованого шару  $h_{\text{цем.ш.}} = 0,5 - 2$  мм.

#### **Цементация у твердому карбюризаторі.**

Деталі запаковують в ящик разом з карбюризатором (суміш деревного вугілля з інтенсифікуючими добавками, наприклад,  $\text{BaCO}_3$ ), нагрівають до температури вище температури лінії  $A_{c3}$  і протягом тривалого часу витримують при цій температурі, потім охолоджують і піддають термічній обробці.

Насичення сталі вуглецем проходить внаслідок дифузії його атомів в  $\gamma$ -залізо. При температурах процесу (900 - 950°C) в цементацийному ящику кисень повітря реагує з вуглецем і утворює оксид вуглецю – CO:



Оксид вуглецю при температурах цементації нестійкий і при контакті із залізною поверхнею розкладається з утворенням атомарного вуглецю, який розчиняється в залізі за реакцією:



Якщо атомарний вуглець утворюється у великій кількості, то він перетворюється у молекулярний і відкладається на поверхні деталі у вигляді сажі.

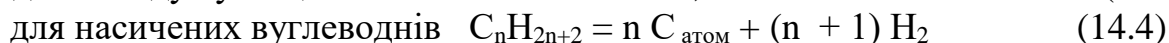
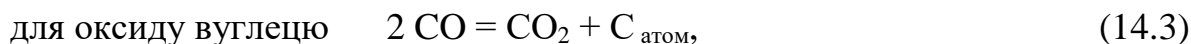
Для активування процесу цементації до складу карбюризатора додають вуглекислі солі (карбонати)  $CaCO_3$ ,  $Na_2CO_3$  (в кількості 10 - 15%), які при нагріванні розкладаються з утворенням  $CO_2$ .

Використовують карбюризатори такого складу:

- деревне вугілля (березове), 20...25%  $CaCO_3$ , 3,5...5%  $CaCO_3$ , 5% вода, 10% летючі,

- кам'яновугільний напівкокс, 10...15%  $CaCO_3$ , 3,5%  $CaCO_3$ , 6% вода. **Газова цементація.**

При газовій цементації деталі знаходяться у постійному контакті з газами, що містять вуглець. При високій температурі гази дисоціюють з виділенням атомарного вуглецю. До складу газу входять: оксид вуглецю (CO), вуглеводні ( $C_nH_{2n+2}$ ) або  $C_nH_{2n}$ , азот ( $N_2$ ), водень  $H_2$ , кисень  $O_2$  і водяна пара. Атомарний вуглець утворюється за реакціями:



Найбільш суттєвий вплив на процес газової цементації має метан, який розкладається при нагріванні вище 700 °C за реакцією:



Для газової цементації поширеним карбюризатором є природний газ, що має такі переваги, як активність, дешевизна, постійність хімічного складу. Проте природний газ не дозволяє регулювати ступінь насичення сталі за вуглецевим потенціалом і важко одержати задану концентрації вуглецю в цементованому шарі. Тому газову цементацію проводять з використанням ендогазу (оксид вуглецю, водень, азот).

При газовій цементації використовують і рідкий карбюризатор (бензол, піробензол), який подається в робочий простір печі краплями, а вентилятор

забезпечує рух газового потоку і забезпечує рівномірну цементацію. Газову цементацію рідким карбюризатором проводять у шахтних печах.

### **Термічна обробка цементованих деталей.**

В результаті тривалої витримки при високій температурі цементації відбувається перегрівання сталі, що приводить до росту зерна. З метою усунення крупнозернистої структури, одержання в поверхневому шарі структури мартенситу з високою твердістю (HRC 58 і більше) та досягнення високих механічних властивостей серцевини деталі після цементації піддають термічній обробці.

Після цементації в серцевині залишається 0,1...0,3 % С, а поверхневий шар деталей науглецьовується до 0,8...1 % С. Тому для одержання необхідної структури і властивостей поверхневого шару і серцевини таких сталей виробів необхідна **подвійна термічна обробка:**

- перше гартування (або нормалізація) від 850 - 900 °С;
- друге гартування від 780 - 800 °С; відпуск при 150 - 200 °С.

В результаті першого гартування утворюється дрібнозерниста структура низьковуглецевої серцевини і усувається цементитна сітка у поверхневому шарі. Але для науглецьованого поверхневого шару температура 850 - 900 °С є надто високою і тому не усуває наслідків перегрівання. Після другого гартування від 780-800 °С у науглецьованому шарі утворюються дрібноголковий мартенсит і глобулярні карбіди за рахунок яких досягається його висока твердість. Відпуск при 150 - 200 °С проводиться для зняття внутрішніх напружень.

Після такого режиму ТО структура поверхневого шару - дрібноголковий мартенсит з рівномірно розподіленими карбідами і невеликою кількістю залишкового аустеніту, а в серцевині - дрібнозернистий ферит і перліт (для вуглецевої сталі) або низьковуглецевий мартенсит і ферит (для легованої сталі) (рис. 14.1.).



Рис.14.1. Мікроструктура цементованого шару.

### **Азотування сталей**

**Азотуванням** називають процес насичення поверхневого шару виробів атомарним азотом. Мета азотування – одержання особливо високої твердості і зносостійкості поверхні, підвищення границі витривалості (міцнісне азотування) та стійкості проти корозії у воді, пароповітряній та вологій атмосфері (антикорозійне азотування).

**Технологічні параметри азотування:**

Температура нагрівання  $T_{\text{нагр.}} = 500 - 600 \text{ }^\circ\text{C}$ , тривалість ізотермічного витримування при температурі нагрівання  $\tau = 40 - 60 \text{ год}$ , товщина азотованого шару  $h_{\text{азот.ш.}} = 0,3 - 0,6 \text{ мм}$ .

Азотування проводять у сталених герметично закритих ретортах, що поміщають у нагрівальну піч. Як карбюризатор використовують аміак, який при нагріванні до температур азотування розкладається на атомарний азот і водень:



Активні атоми азоту дифундують у глибину виробу і проникають у ґратку  $\alpha$  – заліза. Утворені при цьому нітриди заліза є недостатньо твердими і не стійкими. Тому вуглецеві сталі азотуванню не піддають. При сумісному легуванні сталі хромом, молібденом, алюмінієм за рахунок утворення їх термостійких і твердих нітридів твердість азотованого шару за Віккерсом сягає 1200 HV.

Азотуванню піддають готові вироби із легованих сталей з вмістом вуглецю 0,3 – 0,5 % (38X2MЮА, 35ХМА, 38X2Ю6, 3X2В8, 5ХНМ), які пройшли попередню термічну обробку – гартування з високим відпуском при температурі вищій, ніж температура азотування – 600 - 675  $^\circ\text{C}$ . Після такої обробки сталі мають структуру сорбіту з високою міцністю і в'язкістю.

Мікроструктура азотованого шару формується у відповідності до діаграми фазового стану Fe – N (рис. 14.2) і визначається температурою та тривалістю азотування. Концентрація азоту зменшується в напрямку від поверхні до серцевини зразка.

Відповідно до діаграми стану в системі Fe-N існують наступні фази:

$\alpha$  - фаза – твердий розчин азоту в  $\alpha$  - залізі (азотистий ферит)  $\text{Fe}_\alpha(\text{N})$ . Максимальна розчинність азоту в  $\alpha$  - залізі складає 0,1 % при температурі 590  $^\circ\text{C}$ . Зі зниженням температури розчинність азоту в  $\alpha$  - залізі зменшується і при кімнатній температурі складає 0,04%;

$\gamma$  - фаза – твердий розчин азоту в  $\gamma$  - залізі (азотистий аустеніт), існує при температурах вище 590  $^\circ\text{C}$ , максимальна розчинність азоту в  $\gamma$  - залізі – 2,8 % при 650  $^\circ\text{C}$ . При 590  $^\circ\text{C}$  і вмісті азоту 2,35 %  $\gamma$  - фаза при повільному охолодженні розкладається з утворенням евтектоїду  $\alpha + \gamma'$ ;

$\gamma'$  - фаза – твердий розчин на основі нітриду заліза  $\text{Fe}_4 \text{N}$  (5,3 - 5,75 % N);

$\epsilon$  - фаза – твердий розчин азоту на базі нітриду заліза  $\text{Fe}_2\text{N}$  ( 8,25 – 11 % N).

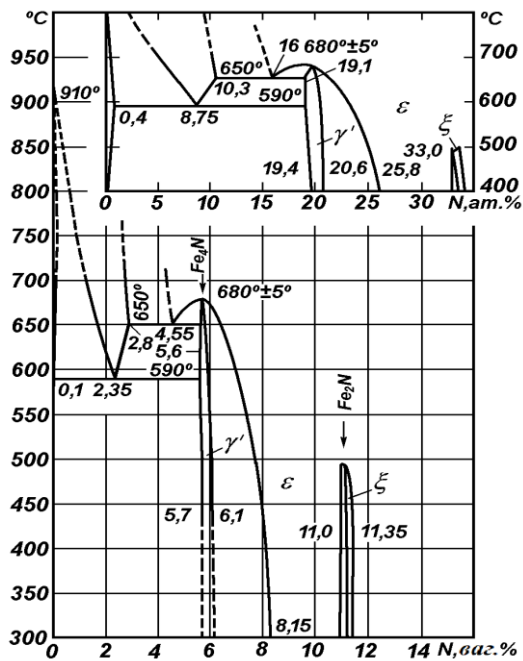


Рис. 14.2. Діаграма стану Fe-N.

Наявність в поверхневому шарі азотованої сталі високодисперсних спеціальних нітридів призводить до блокування площин ковзання, локального підвищення внутрішніх напруг і, відповідно, підвищення твердості і міцності азотованого шару.

Азотування застосовують для виготовлення вимірювальних інструментів, гільз, циліндрів, зубчастих коліс, втулок, колінчатих валів тощо.

### **Борування сталей**

**Борування** – це процес насичення поверхневого шару деталі бором. Мета борування – підвищення твердості, опору абразивному зношуванню та корозії в агресивних середовищах, а також теплостійкості та жаростійкості сталевих деталей.

#### **Технологічні параметри борування:**

Температура нагрівання  $T_{\text{нагр.}} = 920\text{--}950\text{ }^{\circ}\text{C}$ , тривалість ізотермічного витримування при температурі нагрівання  $\tau = 205$  год, товщина борованого шару  $h_{\text{бор.ш.}} = 0,1\text{--}0,2$  мм.

Існує два методи борування – рідинне електролізне та газове.

Більш поширеним є рідинне електролізне борування, яке полягає в тому, що в тигель з розплавленою бурою ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) поміщають оброблювану деталь (катод) і графітовий стержень (анод), через які пропускають постійний струм для проходження процесу електролізу. Перед боруванням поверхні деталі очищають дробоструменевою обробкою.

Боруванню піддають траки, деталі нафтового обладнання та інші деталі з вуглецевих та легованих сталей (Сталь 20, 45, 18ХГТ, 15Х11МФ, Х23Н18, 40Х, Х12, У10 та ін.). Основна властивість борованого шару – особливо висока твердість (до 1350 - 2000 НВ), що зберігається до високих температур внаслідок утворення на поверхні деталей боридів заліза  $\text{FeB}$  і  $\text{Fe}_2\text{B}$ .

### **Дифузійна металізація**

**Дифузійна металізація** - процес дифузійного насичення поверхневих шарів сталі різними металами (Cr, Al, Ti, V та ін.).

При насиченні хромом цей процес називається хромуванням, алюмінієм - алітуванням, кремнієм - силікуванням і т.п. Комбіновані процеси, що полягають в одночасному насиченні хромом та алюмінієм, або хромом і вольфрамом називають хромоалітуванням або хромовольфрамуванням і т.п.

Дифузійну металізацію проводять у твердих, рідких та газоподібних карбюраторах. При використанні рідкого карбюратора деталі занурюють у розплав металу. При газовій металізації насичення поверхневих шарів відбувається з допомогою летючих сполук хлору з металом ( $\text{AlCl}_3$ ,  $\text{CrCl}_3$ ,  $\text{SiCl}_4$ ), які при температурі 1000 – 1100 °С вступають у реакцію обміну із залізом з утворенням дифундуючого елементу в активному стані.

Дифузія хрому, алюмінію та інших металів відбувається значно повільніше, ніж вуглецю та азоту тому, що вуглець і азот утворюють із залізом тверді розчини впровадження, а метали – тверді розчини заміщення. Низька швидкість дифузії обмежує використання процесів дифузійної металізації в промисловості, оскільки потребує тривалих високотемпературних витримувань, що робить їх дорогими.

**Хромування** виробів забезпечує їх високу стійкість проти газової корозії до 800 °С, стійкість проти корозії у воді, морській воді, у кислотах. Товщина хромованого шару не перевищує 0,2 мм. Хромований шар на деталях із низьковуглецевої сталі є твердим розчином хрому в  $\alpha$ -залізі і містить 30 - 60% хрому. Хромований шар на деталях із середньо- і високовуглецевих сталей складається переважно із карбідів хрому  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  (на поверхні) і  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  (ближче до серцевини). В зоні, розташованій безпосередньо за хромованим шаром, вміст вуглецю дещо вищий порівняно із серцевиною.

Твердість поверхні деталей із хромованої низьковуглецевої сталі невисока – 180... 280 HV, а деталей із високовуглецевої – до 1350 HV і переважає твердість не тільки цементованих, але і деяких азотованих сталей.

При **алітуванні**, тобто насиченні алюмінієм, яке проводять у порошкоподібних сумішах або розплавленому алюмінії, завдяки утворенню щільної плівки  $\text{Al}_2\text{O}_3$  підвищується корозійна стійкість та стійкість проти окиснення. При мікроаналізі алітованих сталей поблизу серцевини деталі виявляється важко протравлюваний білий шар, який є твердим розчином алюмінію в  $\alpha$ -залізі. Всередині шару розташовуються голки і сітка хімічної сполуки  $\text{Fe}_3\text{Al}$ . Біля поверхні деталі локалізується інтерметалічна сполука алюмінію та заліза  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$ . Товщина алітованого шару складає 0,2...0,5 мм.

Алітуванню піддають деталі із низьковуглецевих сталей, спеціальних сталей та чавунів.

### Контрольні запитання

1. В чому суть хіміко - термічної обробки?
2. Які переваги ХТО порівняно з іншими методами поверхневого зміцнення?
3. Який механізм процесу ХТО?
4. В чому полягає процес цементації? Які технологічні параметри цементації?
5. Які деталі і з яких марок сталі піддають цементації?
6. Які є способи цементації?
7. В чому суть газової цементації з використанням рідкого карбюратора?

8. Що таке вуглецевий потенціал?
9. Обґрунтувати режими ТО після цементації.
10. Як змінюється мікроструктура сталі після цементації?
11. Як змінюється мікроструктура сталі після цементації і ТО?
12. В чому суть азотування? Які технологічні параметри азотування?
13. Суть і призначення борування.
14. Суть і призначення різновидів дифузійної металізації.

**Приклад тестових завдань для модульного контролю до розділу  
«Хіміко - термічна обробка сталей»**

1. В чому полягає суть ХТО:
  1. зміні хімічного складу в об'ємі деталі;
  2. зміні структури деталі по об'єму;
  3. зміні хімічного складу поверхневих шарів;
  4. зміні хімічного складу в серцевині деталі.
2. За рахунок дії яких факторів досягається ефект в ХТО?
  1. температури;
  2. температури і тиску;
  3. пластичної деформації;
  4. температури і хімічно-активного середовища.
3. За рахунок чого досягається зміцнення поверхневих шарів в ХТО?
  1. термічної обробки;
  2. наклепу;
  3. зміни хімічного складу;
  4. утворення нових дисперсних тугоплавких фаз.
4. Яка стадія відсутня в процесі ХТО?
 

1. дифузія;	2. адсорбція;
3. відновлення;	4. хімічна взаємодія.
5. Яка стадія процесу ХТО є лімітуючою?
  1. хімічна взаємодія;
  2. дифузія;
  3. адсорбція;
  4. хемосорбція.
6. Що не відноситься до основних параметрів процесу ХТО?
  1. концентрація вуглецю в шарі;
  2. температура;
  3. час;
  4. дисперсність структури.
7. Якого виду ХТО не існує?
  1. комплексного виділення домішок;
  2. обезводнення;
  3. комплексного виділення легуючих елементів;
  4. ціанування.
8. За рахунок чого досягається зміцнення поверхні при цементації?



1. за рахунок перерозподілу вуглецю;
  2. за рахунок зміцнюючої термообробки;
  3. за рахунок утворення твердих дисперсних фаз;
  4. за правильним вибором марки сталі.
9. Для яких сталей можливе гартування з температур цементації?
1. спадководрібнозернистих;
  2. схильних до перегріву;
  3. низьковуглецевих;
  4. високовуглецевих.
10. Яка правильна термічна обробка цементованих деталей відповідального призначення?
1. гартування з низьким відпуском;
  2. гартування з температур цементації;
  3. подвійне гартування з низьким відпуском;
  4. гартування з обробкою холодом та низьким відпуском.
11. За рахунок чого досягається зміцнення при азотуванні?
1. за рахунок мартенситного перетворення;
  2. внаслідок утворення дрібнозернистої структури;
  3. внаслідок утворення дисперсних нітридних фаз;
  4. за рахунок термічної обробки.
12. Яка із приведених нижче марок сталей є найкращою для азотування?
1. 38ХМЮА;
  2. 38ХГСА;
  3. 40Х
  4. 12ХН<sub>3</sub>А.
13. Який варіант термічної обробки застосовується при азотуванні сталі?
1. покращення перед азотуванням;
  2. гартування після азотування;
  3. відпал після азотування;
  4. покращення після азотування.
14. На дії яких факторів ґрунтується термомеханічна обробка?
1. теплового;
  2. хімічного;
  3. теплового та хімічного;
  4. теплового та пластичної деформації.
15. Якого виду термомеханічної обробки не існує?
1. попередньої;
  2. остаточної;
  3. високотемпературної;
  4. низькотемпературної.
16. На чому ґрунтується ХТО ІІІ групи (диф. виділення домішок)?
1. на дифузії елементів в поверхню;
  2. дифузії елементів з поверхі;
  3. хімічної взаємодії та середовища;
  4. адгезії на границі поверхня-середовище.

17. До якої із груп ХТО вноситься ціанування?

1. I;
2. II;
3. III.

18. Який із приведених видів ХТО найкраще підвищує корозійну стійкість сталльної поверхні?

1. цементация;
2. ціанування;
3. борування;
4. азотування.

19. Який із видів ХТО відноситься до групи дифузійного виділення домішок:

1. цементация;
2. азотування;
3. обезвуглецьовування;
4. алітування.

20. Яка із стадій процесу ХТО є лімітуючою стадією процесу:

1. утворення атомарного насичуючого елемента в карбюризаторі;
2. адсорбція атомарного елемента поверхнею деталі;
3. хемосорбція
4. дифузія атомарного елемента в глибину деталі.

## ТЕМА 13. МІКРОСТРУКТУРА І ВЛАСТИВОСТІ ЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ

**Легованою** називається сталь, в яку вводять певні хімічні елементи для зміни її фізико-механічних властивостей.

Леговані сталі класифікують за такими ознаками:

- а) за хімічним складом,
- б) за структурою,
- в) за способом виробництва,
- г) за якістю,
- д) за призначенням,
- е) за кількістю легуючих елементів.

За **хімічним складом** сталі класифікують в залежності від легуючих елементів: нікелеві, марганцеві, хромонікелеві і т. п.

В залежності від положення критичних точок діаграми «залізо – цементит» леговані сталі **за структурою у відпаленому стані** поділяють на:

- доевтектоїдні – із структурою легований ферит і перліт,
- евтектоїдні – із структурою перліт,
- заевтектоїдні – із структурою перліт і вторинні карбіди,
- ледебуритні – із структурою перліт, вторинні карбіди і ледебурит.

При високому вмісті легуючих елементів, які розширюють  $\gamma$  – область (Ni, Mn, Cu), отримують сталі аустенітного класу, а при високому вмісті елементів, які розширюють  $\alpha$  - область (Cr, W, Mo, V, Ti), отримують сталі феритного класу.

Враховуючи вплив легуючих елементів на діаграму ізотермічного розпаду аустеніту, температури початку (M<sub>p</sub>) і кінця (M<sub>k</sub>) мартенситного перетворення та в залежності від кількості цих елементів, **за структурою у нормалізованому стані** (після охолодження на спокійному повітрі) розрізняють три основні класи сталей:

- перлітний – при малому вмісті легуючих елементів (до 5%),
- мартенситний – при значному вмісті легуючих елементів (5 - 13%),
- аустенітний – при високому вмісті легуючих елементів (13 - 30%).

**За способом виробництва** сталі поділяються на мартенівські, киснево-конвертерні, електросталі та ін.

**За якістю** леговані сталі можуть бути якісними, високоякісними і особливо високоякісними.

**За призначенням** леговані сталі ділять на:

- конструкційні;
- інструментальні (для ріжучого, штампового та вимірювального інструментів);
- спеціального призначення (нержавіючі, жаростійкі, жароміцні, зносостійкі і т. п.).

**За кількістю легуючих елементів** сталі поділяють на:

- низьколеговані – з вмістом легуючих елементів до 5%;
- середньо леговані – з вмістом 5 - 10% легуючих елементів;
- високолеговані, що містять більше 10% легуючих елементів.

Легуючі елементи в сталі можуть знаходитися:

- у вільному стані;

- у вигляді інтерметалевих сполук із залізом або між собою;
- у вигляді оксидів;
- в карбідній фазі – у вигляді розчину в цементиті або в сполуках із вуглецем у вигляді спеціальних карбідів;
- у вигляді твердого розчину в залізі.

Відповідно, легуючі елементи переважно розчиняються в основних фазах (Ф, А, Ц) або утворюють спеціальні карбіди.

Знаходячись в сталі в тому або іншому вигляді, легуючі елементи впливають на:

- **поліморфізм заліза** – деякі елементи, розчиняючись у залізі, підвищують точки  $A_1$  і знижують точки  $A_3$ , стабілізуючи ферит (рис. 13.1.).

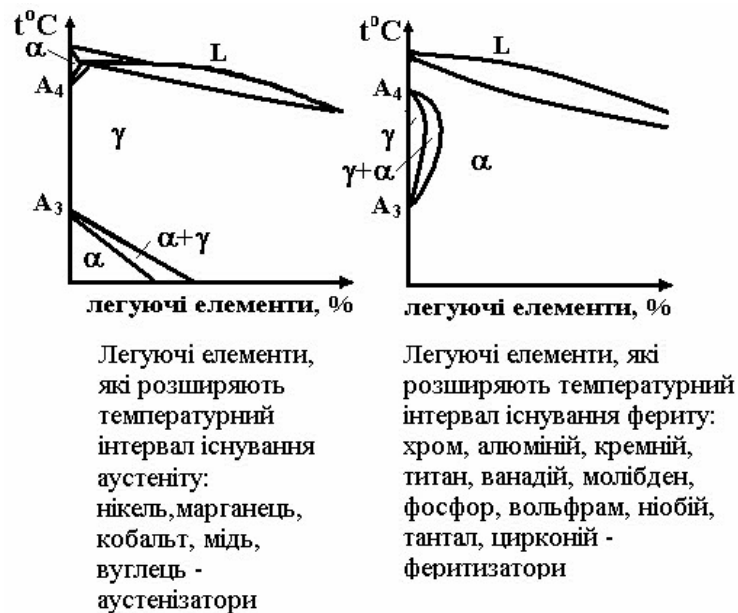


Рис. 13.1. Вплив легуючих елементів на поліморфізм заліза.

- **властивості фериту** – розчиняючись у фериті, легуючі елементи змінюють розміри його ґратки і викликають зміну його властивостей, підвищують твердість та ударну в'язкість ( $a_H$ ). Елементи, які мають великі атомні розміри, зміцнюють ферит незалежно від швидкості охолодження сплаву.

- **утворення карбідної фази** – карбіди утворюють елементи з недобудованою електронною d - смугою. Вони розташовані лівіше заліза.

I група, карбіди із складною ґраткою ( $M_3C$ ,  $M_{23}C_6$ ,  $M_7C_3$ ,  $M_6C$ ),

II група, карбіди з простою ґраткою (фази впровадження  $MC$ ,  $M_2C$ ), де  $M$  - залізо та інші карбідоутворюючі елементи.

- **ізотермічний розпад переохолодженого аустеніту**, затримуючи або прискорюючи перетворення аустеніту, дозволяють отримати бейніт (голковий троостит) у двох інтервалах температур.

- **прогартуваність сталі** – зсуваючи вправо криві початку і кінця ізотермічного розпаду переохолодженого аустеніту. Легуючі елементи зменшують критичну швидкість гартування ( $v_{кр}$ ) і, відповідно, збільшують прогартуваність сталі.

- **мартенситне перетворення** – на кінетику мартенситного перетворення легуючі елементи не впливають. Деякі елементи (Al, Co) підвищують температури початку (M<sub>p</sub>) і кінця (M<sub>k</sub>) мартенситного перетворення, а деякі (Mo) - знижують і, відповідно, зменшують або збільшують кількість залишкового аустеніту.

- **ріст зерна аустеніту** – всі легуючі елементи зменшують схильність зерна до росту, крім Mn та В.

- **перетворення при відпуску** – легуючі елементи затримують процес розпаду мартенситу. Враховуючи затримуючу дію легуючих елементів, сталі при відпуску необхідно нагрівати до більш високої температури або збільшувати час витримування.

Властивості і переваги легованих сталей виявляються в повній мірі тільки після термічної обробки, тому використання легованих сталей без термічної обробки економічно не виправдано. Орієнтовні режими термічної обробки конструкційних, жароміцних та нержавіючих сталей приведені в таблиці 13.1.

Таблиця 13.1.

Термічна обробка сталей різного призначення

Сталь	Термічна обробка
Хромонікелева конструкційна	1. Відпал при T = 830°C. 2. Нормалізація T = 860°C. 3. Гартування при T = 830°C, охолодження в маслі і наступний відпуск при T = 550°C.
Хромонікелева жароміцна	Гартування при T = 1100°C, охолодження у воді
Хромонікелева нержавіюча	Гартування при T = 1100°C, охолодження у воді

### **Маркування легованих сталей.**

Згідно ДСТ леговані сталі маркуються буквеними і цифровими індексами.

Легуючі елементи позначаються буквами:

Н - нікель	М - молібден	Р - бор	С - кремній
Х - хром	Г - марганець	Б - ніобій	В - вольфрам
К - кобальт	Д - мідь	Ц - цирконій	Ф - ванадій
П - фосфор	Т - титан	Ю - алюміній	А - азот
Ч – рідкоземельні елементи			

Індекс "А" в кінці марки вказує на високу якість сталі. Цифри перед буквами означають вміст вуглецю в сотих долях відсотка для конструкційних і в десятих долях відсотка для інструментальних сталей, а цифри після букв – вміст легуючого елемента у відсотках, наприклад: 40ХН3А (0,4% С, ~ 1% Cr, ~ 3% Ni, сталь конструкційна, високоякісна). Буквений індекс на початку марки означає призначення сталі: Р - швидкорізальна інструментальна, Ш - шарикопідшипникова і т. д.

### **Контрольні запитання**

1. Як взаємодіють легуючі елементи з залізом і вуглецем?

2. Як впливають легуючі елементи на критичні точки сталі, на властивості сталі у відпаленому стані і на термічну обробку?
3. Як класифікують леговані сталі
  - за структурою у відпаленому і нормалізованому стані;
  - за призначенням;
  - за способом виробництва;
  - за хімічним складом;
  - за якістю;
  - за кількістю легуючих елементів.
4. Основні методи підвищення міцності сталі.
5. Пояснити вплив легуючих елементів на властивості конструкційних, жароміцних, жаростійких, нержавіючих сталей. Навести приклади маркування таких сталей.
6. Область використання сталей.
7. Маркування легованих сталей.
8. Термічна обробка легованих сталей.

## ТЕМА 14. МІКРОСТРУКТУРА І ВЛАСТИВОСТІ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ ЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ І ТВЕРДИХ СПЛАВІВ

Основними вимогами до сталей інструментального призначення є високі теплостійкість, твердість, в'язкість, зносостійкість, загартовуваність.

**Теплостійкість (червоностійкість)** – це здатність матеріалу зберігати твердість, міцність та зносостійкість ріжучого леза при підвищених температурах.

**Класифікацію** інструментальних сталей проводять за наступними ознаками:

### 1. *За теплостійкістю.*

- Нетеплостійкі. До цієї групи відносять вуглецеві інструментальні сталі зниженої прогартовуваності і леговані інструментальні сталі підвищеної прогартовуваності. Діапазон робочих температур ( $T_p$ ) до  $225^\circ\text{C}$ ;

- напівтеплостійкі (штампові сталі).  $T_p < 400^\circ\text{C}$ ;

- теплостійкі (швидкорізальні сталі).  $T_p < 650^\circ\text{C}$ .

### 2. *За призначенням.*

- Для різальних інструментів;

- для штампових інструментів;

- для вимірювальних інструментів.

**Леговані інструментальні сталі.** До цієї групи відносять сталі, які містять легуючі елементи в кількості 1...3 % і мають підвищену прогартовуваність. Інструменти із цих сталей гартують у маслі (при ступінчатому гартуванні – у солі) і прогартовують наскрізь. Невелика швидкість охолодження при гартуванні знижує небезпеку появи тріщин, деформації і короблення.

Приклади марок легованих інструментальних сталей: X, 9XC, XГCBФ, XBГ, B1, XB5. Типова зміцнююча термічна обробка цих сталей полягає у гартуванні при температурах  $800 - 830^\circ\text{C}$  та низькому відпуску при температурах  $140 - 160^\circ\text{C}$ . Твердість після відпуску складає 61... 63 HRC.

Карбідною фазою таких сталей є легований цементит ( $\text{Me}_3\text{C}$ ). Ці сталі пом'якшуються повільніше при підвищенні температури відпуску, ніж вуглецеві інструментальні сталі і тому температура відпуску інструменту є вищою.

**Штампові сталі.** Штампові сталі ділять на дві групи: для штампів холодного деформування і для штампів гарячого деформування.

Для штампів **холодного деформування** (накатні плашки, ролики, фільтри для волочіння) використовують високохромисті сталі (6–12 % Cr при вмісті вуглецю 1–1,5 %), які мають високу зносостійкість, підвищені теплопровідність, твердість і в'язкість.

До сталей цієї групи відносять сталі марок: X12, X12M, X12Ф1, X6BФ. Їх типова термічна обробка полягає у гартуванні при температурах  $1060 - 1080^\circ\text{C}$  та низькому відпуску при температурах  $160 - 200^\circ\text{C}$ . Після відпуску їх твердість складає 58...64 HRC. У зв'язку з високим вмістом хрому в цих сталях утворюється значна кількість карбідів хрому ( $\text{Cr}_7\text{C}_3$ ), розчинність яких зростає з підвищенням температури гартування. Мікроструктура після гартування складається з великої кількості залишкового аустеніту, розпаду якого досягають обробкою холодом.

Для цих сталей характерна карбідна ліквіація, тобто стрічковий розподіл карбідів, що знижує їх міцність. Її можна знизити шляхом кування або застосування порошкових сталей.

Для штамів *гарячого деформування* (матриці, пуансони) використовують сталі з вмістом вуглецю 0,55 – 0,6 %, леговані Cr, Ni, Mo, W в кількості близько 1 % кожного. Ці сталі відзначаються теплостійкістю, жароміцністю, термостійкістю, в'язкістю, прогартовуваністю, вони мінімально чутливі до відпускнуї крихкості та мають низьку адгезійну взаємодію з металом, який штампується.

Приклади марок штампових сталей для гарячого деформування: 5ХНМ, 5ХГМ, 5ХНСВ. Типова термічна обробка сталей цієї групи полягає у гартуванні при температурах 870 – 890°C та відпуску при температурах близько 600 °С. Механічні властивості сталі 5ХНМ після термообробки:  $\sigma_b = 1200\text{--}1300$  МПа,  $\delta = 10\text{--}13\%$ ,  $\psi = 40\text{--}45\%$ ,  $KCU = 0,4\text{--}0,5$  МДж/м<sup>2</sup>.

### **Швидкорізальні сталі.**

Швидкорізальні сталі призначені для виготовлення різальних інструментів, які працюють при високих швидкостях різання.

Теплостійкість швидкорізальних сталей забезпечується їх легуванням карбідоутворюючими елементами (W, Mo, Cr, V) в кількості, при якій вони зв'язують практично весь вуглець у спеціальні карбіди. Вміст вуглецю – 0,7- 1,05%. До групи швидкорізальних сталей відносять сталі марок: P18, P9, P6M5, P6M5K5, P3M3Ф2, P0M2Ф3.

Після кристалізації литої швидкорізальної сталі утворюється евтектика, що нагадує ледебурит (аустеніт і крупні первинні карбіди), яка розташовується по границях зерен (рис. 15.1 а). Після кування або прокатування сітка евтектики розбивається з подрібненням карбідів, які більш рівномірно розподілені в основній матриці (рис. 15.1 б).



Рис. 15.1. Мікроструктура швидкорізальної сталі P18, х 500:  
а – в литому стані; б – після кування і відпалу.

Для зниження твердості і полегшення механічної обробки сталі піддають ізотермічному відпалу, в результаті якого утворюється перліто-сорбітна структура.

Типова термічна обробка швидкорізальних сталей полягає у гартуванні при температурах 1220 – 1280 °С та трьохкратному відпуску при температурах близько 560 °С з метою зменшення кількості залишкового аустеніту (рис.15.2 а). Твердість після термообробки 63...65 HRC.



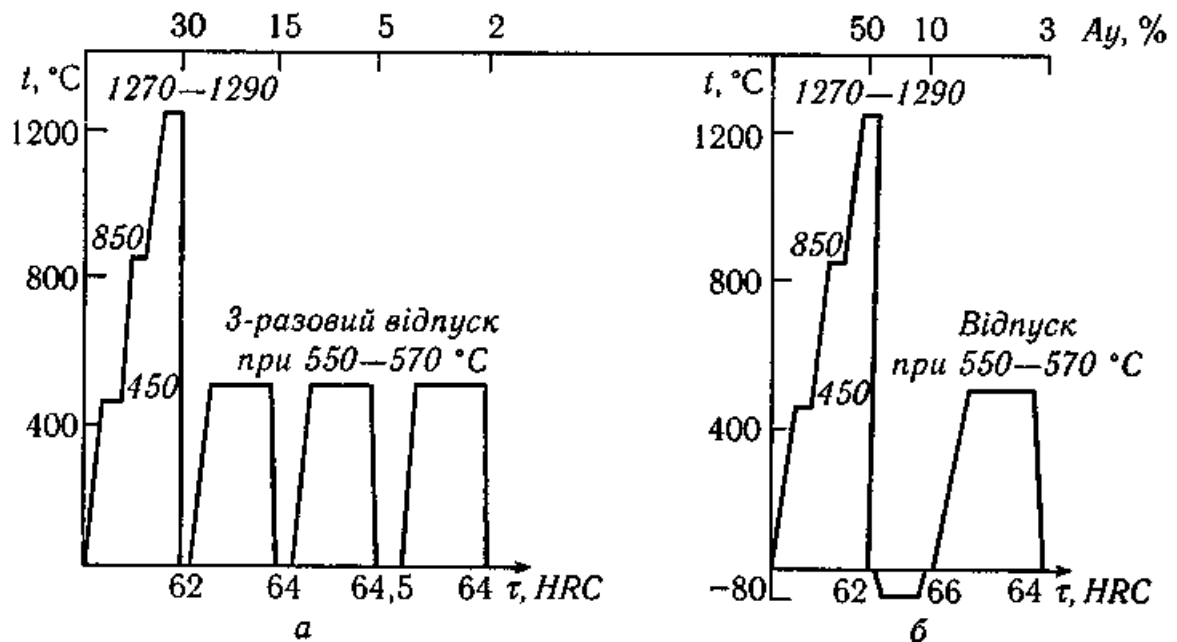


Рис. 15.2. Режими типової термічної обробки швидкорізальної сталі P18: а – гартування і трьохкратний відпуск; б – гартування, обробка холодом, відпуск.

Один із варіантів термообробки полягає у гартуванні, обробці холодом при температурах  $-70... -80\text{ }^\circ\text{C}$  та відпуску при  $560\text{ }^\circ\text{C}$  (рис.15.2 а). Крім того, для швидкорізальних сталей застосовують низькотемпературне ціанування, яке покращує різальні властивості. В цьому випадку інструмент після термообробки додатково витримують у рідких ціанистих солях при  $520\text{--}580\text{ }^\circ\text{C}$ . Як наслідок, на поверхні утворюється насичений азотом і вуглецем шар, що підвищує зносостійкість інструменту.

Використання високих температур нагрівання при гартуванні пояснюється необхідністю максимального розчинення карбідної фази в аустеніті. Для уникнення появи термічних тріщин і деформації інструмента через низьку теплопровідність сталей нагрівання проводять у розплавлених солях з двома ізотермічними зупинками – при  $450$  та  $850\text{ }^\circ\text{C}$ , а охолодження – в маслі. Після гартування такі сталі мають структуру, що складається з легованого мартенситу, карбідної фази і значної кількості (до 30 %) залишкового аустеніту. Подальша термічна обробка спрямована на суттєве зменшення кількості залишкового аустеніту, який є небажаним у структурі швидкорізальних сталей. Трьохкратний відпуск загартованої сталі при температурі  $560\text{ }^\circ\text{C}$  протягом 45–60 хвилин знижує кількість залишкового аустеніту до допустимих меж – менше 2 % (рис. 15.3 а,б).

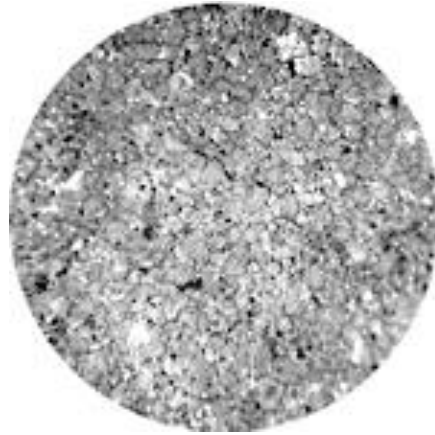


Рис. 15.3. Мікроструктура швидкорізальної сталі Р18 після термічної обробки (гартування і відпуску), х 500.

### ***Тверді сплави.***

Тверді сплави є композиційними інструментальними матеріалами, які отримують методом порошкової металургії. Вони складаються з твердих тугоплавких частинок карбіду вольфраму і цементуючої зв'язки з кобальту або карбідів вольфраму, титану, танталу і кобальту. Вони значно переважають швидкорізальні сталі за теплостійкістю, твердістю та зносостійкістю. Їх твердість 88...92 НРА зберігається при нагріванні до 900 – 1000 °С. Внаслідок високої твердості їх піддають лише токарній обробці ельборовими різцями або шліфуванню. Крім того, тверді сплави мають підвищену крихкість порівняно із швидкорізальними сталями, тобто поступаються їм за ударною в'язкістю. Тому з твердих сплавів виготовляють не весь інструмент, а лише його різальну частину (багатогранні різальні пластини), яку кріплять до державки із конструкційної або інструментальної сталі.

### ***Класифікація твердих сплавів.***

За хімічним складом тверді сплави поділяють на три групи – ВК, ТК і ТТК, за класифікацією Міжнародної організації стандартів ISO їм відповідають групи Р, К та М.

1. Вольфрамкобальтові тверді сплави (WC–Co) відрізняються вмістом кобальту і маркуються наступним чином: ВК 3, ВК 6, ВК 8, ВК10, де цифра означає вміст кобальту. Чим вищий вміст кобальту, тим міцніший твердий сплав, але менш твердий, тобто він може застосовуватись при менших швидкостях різання. Сплави групи ВК застосовують для обробки крихких матеріалів (чавунів, полімерів, скла, які дають стружку сколу). За класифікацією ISO – група Р 01 – Р 50.

2. Вольфрамотитанокобальтові тверді сплави (WC–TiC–Co) застосовують для обробки сталей, які дають зливну стружку. Марки сплавів групи ТК: Т15К6, Т5К10. Цифра після букви Т означає вміст карбіду титану, після букви К – вміст кобальту, решта – карбід вольфраму. За класифікацією ISO – група К 01 – К 40.

3. Вольфрамотитанотанталокобальтові тверді сплави (WC–TiC–TaC–Co) застосовують для обробки гірських порід, точіння, стругання при великих навантаженнях, при бурінні нафтових свердловин. Приклад марки твердого сплаву групи ТТК – ТТ7К12. Цифра після букви Т означає сумарний вміст карбідів титану

і танталу, після букви К – вміст кобальту, решта – карбід вольфраму. За класифікацією ISO – група М 01 – М 40.

Мікроструктура твердих сплавів складається із зерен карбідів WC, (Ti,W)C, (Ti, Ta, W) C, оточених кобальтовою зв'язкою (рис. 15.4).

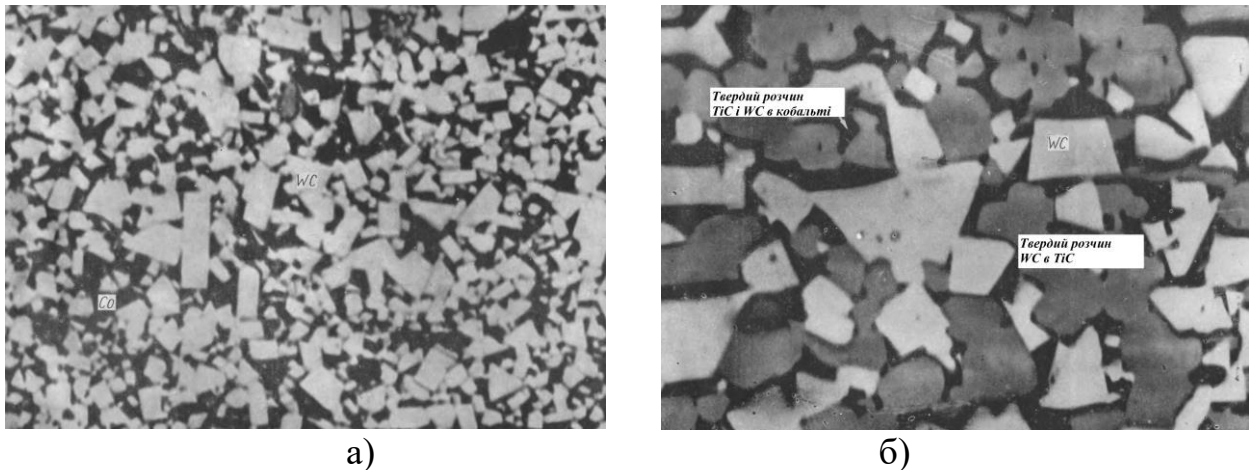


Рис. 15.4. Мікроструктура твердих сплавів, х 3000: а) ВК15; б) Т15К6.

### Контрольні запитання

1. Основні вимоги, що ставляться до сталей інструментального призначення.
2. Класифікація інструментальних сталей.
3. Леговані інструментальні сталі, їх термообробка, маркування, області застосування.
4. Штампові сталі, їх термообробка, маркування, область застосування.
5. Швидкорізальні сталі, маркування, області застосування.
6. Термічна обробка швидкорізальних сталей.
7. Класифікація твердих сплавів.
8. Мікроструктура і властивості твердих сплавів.

### Приклад тестових завдань для модульного контролю до розділу «Інструментальні та конструкційні сталі і тверді сплави»

1. Яка із приведених марок сталей відноситься до інструментальних:
  1. Сталь 08Ю.
  2. А20Г.
  3. Х.
  4. 20Х.
2. Що є основною технологічною характеристикою інструментальних сталей?
  1. Теплопровідність.
  2. Теплостійкість.
  3. Жаростійкість.
  4. Жароміцність.
3. Що взято за основу в класифікації інструментальних сталей за Геллером?
  1. Твердість.
  2. Міцність.

3. Теплопровідність.
4. Теплостійкість.
4. Яка із приведених марок сталей належить до групи теплостійких?
  1. У10А.
  2. 9ХС.
  3. Х12М.
  4. Р18.
5. Який легуючий елемент є основним в швидкорізальних сталях:
  1. Вольфрам.
  2. Хром.
  3. Молібден.
  4. Ванадій.
6. Як пояснити високі температури нагрівання під гартування швидкорізальних сталей?
  1. Великою кількістю карбідної фази.
  2. Великою кількістю легуючих елементів.
  3. Наявністю в сталі ванадію.
  4. Наявністю хрому.
7. Яка типова термічна обробка швидкорізальних сталей?
  1. Гартування з потрійним високим відпуском.
  2. Гартування з низьким відпуском.
  3. Гартування з середнім відпуском.
  4. Гартування, обробка холодом і високий відпуск.
8. З якою метою проводять операцію обробки холодом швидкорізальних сталей?
  1. Зменшення крихкості.
  2. Підвищення міцності.
  3. Розпаду залишкового аустеніту.
  4. Подрібнення зерна структури.
9. Якою є робоча структура швидкорізальних сталей?
  1. Легований мартенсит + карбіди.
  2. Мартенсит + феррит.
  3. Мартенсит + аустеніт.
  4. Мартенсит, ферит і карбіди.
10. Яка із приведених інструментальних сталей використовується для виготовлення вимірювального інструменту?
  1. 4ХНМ.
  2. Х12М.
  3. Р6К5Ф2.
  4. ХВГ.
11. Що є основною вимогою до матеріалу вимірювальних інструментів?
  1. Висока в'язкість.
  2. Дрібнозернистість.
  3. Стабільність лінійних розмірів.
  4. Твердість.
12. Який із легуючих елементів підвищує поріг холодноламкості сталі?

1. Ni.
  2. Ti.
  3. Si.
  4. Mn.
13. Яка із нижчеприведених марок сталі є особливо високоякісною?
1. Ст3кпГ.
  2. У12А.
  3. Сталь75.
  4. У10Ш.
14. Який із приведених легуючих елементів не відносяться до групи основних?
1. Al.
  2. Cr.
  3. Ni.
  4. Mn.
15. Який із проведених легуючих елементів не утворює в сталі карбідів?
1. Cr.
  2. Ni.
  3. Ti.
  4. Mn.
16. Які легуючі елементи розширюють область існування аустеніту?
1. Ni.
  2. Cr.
  3. Mn.
  4. Ti.
17. Яким чином впливають легуючі елементи карбідоутворюючої групи на положення основних ліній діаграми Fe-Fe<sub>3</sub>C?
1. Понижують лінію PSK.
  2. Понижують лінію солідус.
  3. Розширюють область існування аустеніту.
  4. Звужують область існування аустеніту.
18. Який вплив на властивості сталі мають мікродобавки бору?
1. Збільшують твердість.
  2. Збільшують корозійну стійкість.
  3. Розширюють інтервал робочих температур.
  4. Підвищують міцність і твердість.
19. Який з легуючих металів підвищує корозійну стійкість сталі?
1. Si.
  2. Mn.
  3. Ti.
  4. Cr.
20. Що характеризує конструктивна міцність матеріалу?
1. Комплекс фізико-механічних характеристик.
  2. Показники міцності.
  3. Показники пластичності.
  4. Напружений стан матеріалу.
21. Що є перевагою методу порошкової металургії?
1. низький коефіцієнт використання матеріалу;
  2. одержання виробів складної конфігурації;
  3. високий коефіцієнт використання матеріалу;
  4. простота технологічного процесу.
22. Особливістю методу ПМ є:
1. використання металу у вигляді розплаву;
  2. використання вихідних компонентів у вигляді дисперсних порошоків;

- 3. використання металу у вигляді відливки;
  - 4. використання металу у вигляді суспензії
23. Яка із операцій технологічного процесу в ПМ не використовується?
- 1. усереднення;                      2. фільтрація;
  - 3. формування;                      4. введення пластифікатору.
24. Що розуміють під процесом класифікації порошків?
- 1. визначення хімічного складу;    2. присвоєння торгової марки;
  - 3. розсіювання за фракціями;       4. розподіл за формою частинок.
25. Яка із приведених нижче речовин не використовується в якості пластифікатору?
- 1. вода;                                      2. полівиниловий спирт;
  - 3. скипідар;                                4. розчин каучуку в бензині.
26. Які процеси не відбуваються під час спікання заготовок?
- 1. дифузія;                                 2. перекристалізація через рідку фазу;
  - 3. розчинення;                             4. ліквідація.
27. Що є метою процесу спікання?
- 1. максимальне ущільнення заготовки; 2. збільшення об'єму заготовки;
  - 3. зміна форми без зміни об'єму;       4. зміна форми і об'єму;
28. Що обов'язково враховують при формуванні заготовок?
- 1. коефіцієнт лінійного розширення;    2. коефіцієнт усадки;
  - 3. коефіцієнт тертя;                        4. коефіцієнт теплопровідності.
29. Яка послідовність операцій технологічного процесу є правильною?
- 1. усереднення – класифікація – формування – спікання;
  - 2. усереднення – дистиляція – формування – спікання;
  - 3. шихтування – гомогенізація – формування – спікання;
  - 4. шихтування – усереднення - дистиляція – спікання;
30. Що відноситься до браку в ПМ ?
- 1. утворення дрібнозернистої структури;
  - 2. одержання компактного стану металу;
  - 3. утворення конгломерату компонентів суміші;
  - 4. усадка матеріалу в процесі спікання.

## ТЕМА 15. МІКРОСТРУКТУРА І ВЛАСТИВОСТІ АЛЮМІНІЮ ТА СПЛАВІВ НА ЙОГО ОСНОВІ

Широке застосування в якості конструкційних та електротехнічних матеріалів мають алюміній та сплави на його основі.

Алюміній — метал сріблясто-білого кольору, немає поліморфних модифікацій, температура плавлення 658 °С. Алюміній має невелику густину ( $2,73 \times 10^3$  кг/м<sup>3</sup>), міцність (до 100 МПа), твердість (до 25 МПа), високі тепло- і електропровідність, корозійну стійкість і пластичність (до 45%), легко окислюється на повітрі, утворюючи на поверхні щільну захисну плівку  $Al_2O_3$ .

Алюміній володіє високою відбивною здатністю, має малий ефективний поперечний переріз захоплення теплових нейтронів. Він добре обробляється тиском, зварюється газовим і контактним зварюванням, але погано обробляється різанням. Ливарні властивості алюмінію не високі (усадка затвердіння 6%).

Залежно від вмісту домішок алюміній виготовляють особливої чистоти А999 (0,001% домішок), високої чистоти А995, А99, А97, А95 (0,005—0,05% домішок) і технічної чистоти А85, А8 і ін. (0,15—1,0% домішок). Технічний алюміній, що випускається у вигляді деформованого напівфабрикату (аркуші, профілі, прутки й ін.) маркується АД0 і АД1. Домішки знижують тепло- і електропровідність, корозійну стійкість і пластичність алюмінію.

З алюмінію виготовляють рами, двері, трубопроводи, фольгу, цистерни для перевезення нафти і нафтопродуктів, посуд і ін. Завдяки високій теплопровідності він використовується в якості теплообмінників, у промислових і побутових холодильниках. Висока електропровідність алюмінію сприяє його широкому застосуванню в електротехніці (для конденсаторів, проводів, кабелів, шин та ін.)

### **Сплави на основі алюмінію.**

Всі алюмінієві сплави ділять на три групи:

1. **Деформівні**, призначені для отримання поковок, штамповок, прокату, труб.
2. **Ливарні** сплави.
3. Сплави, отримані методом порошкової металургії – **спечені** алюмінієві порошки (САП) і сплави (САС).

**Деформівні** алюмінієві сплави за властивостями та областями використання ділять на дві групи:

1. Сплави, що **не зміцнюють термічною обробкою** – АМц, АМг, АМгЗ, АМг5п і АМг6 (ГОСТ 4784–74) використовують у трьох станах: відпаленому, напівнагартованому та нагартованому. Сплави цієї групи мають високу корозійну стійкість та добру зварюваність, проте низьку міцність. Їх використовують у вигляді листів для виготовлення зварних виробів (бензо- та маслбаків) і деталей, що виготовляють холодним штампуванням.

2. Сплави, що **зміцнюють термічною обробкою**:

- алюмінієві сплави для листів, профілів і труб марок Д1, Д6, Д16 і В95;
- алюмінієві сплави для заклепок марок Д18 і В65.
- алюмінієві сплави для штамповок марок Д1, АК6, АК8.

Сплави цієї групи мають більш високі механічні властивості, проте знижену корозійну стійкість на вологому повітрі, у річковій та морській воді. При

експлуатації у вологому середовищі їх захищають від корозії плакуванням або анодною поляризацією.

На механічні властивості алюмінієвих сплавів впливають хімічний склад та вид термічної обробки. Дуралюмін марки Д1 (ГОСТ 4784–74) є класичним, відноситься до системи Al-Cu-Mg-Mn і має такий хімічний склад: 3,8 - 4,8 % Cu, 0,4 - 0,8 % Mg, 0,4 - 0,8 % Mn, Al – решта.

Режим термічної обробки залежить від марки сплаву. Для підвищення пластичності та усунення наклепу дуралюмін після холодної обробки тиском піддають рекристалізаційному відпалу при температурі 340 - 370 °С з охолодженням на повітрі. Механічні властивості дуралюміну марки Д1 після відпалу:  $\sigma_b = 210$  МПа,  $\delta = 18$  %, НВ = 450 МПа.

Структура сплаву Д1 після відпалу складається, в основному, із кристалів твердого розчину Al(Cu, Si, Mg) і вторинних виділень кристалів  $\text{CuAl}_2$ ,  $\text{Mg}_2\text{Si}$  та  $\text{Al}_2\text{CuMg}$ .

**Гартування** дуралюміну полягає у нагріванні сплаву вище лінії граничної розчинності, витримуванні при цій температурі та швидкому охолодженні. У сплаві Д1 при нагріванні та витримуванні при температурі 490 - 505 °С відбувається розчинення дисперсних фаз ( $\text{CuAl}_2$ ,  $\text{Mg}_2\text{Si}$  та S - фази). При гартуванні дуралюміну з охолодженням у воді фіксується структура пересиченого твердого розчину Al(Cu, Mg, Si), яка існувала при температурі нагрівання. Після гартування дуралюмін має наступні властивості:  $\sigma_b = 400$  МПа,  $\delta = 20$  %, НВ = 750 МПа. Цей перенасичений твердий розчин алюмінію є нестійким. Його самочинний розпад починається при кімнатній температурі через 2 - 3 години після гартування і завершується через 5 - 7 діб.

Такий процес зміцнення загартованого дуралюміну при кімнатній температурі називається **природним старінням**.

Зміцнення дуралюміну можливе і в результаті **штучного старіння**, тобто нагрівання загартованого сплаву до температури 150 °С протягом 10-24 годин. Однак, більш ефективним є природне старіння, оскільки в цьому випадку сплави мають вищу пластичність і менш чутливі до концентраторів напружень.

Процес старіння, тобто розпаду перенасиченого твердого розчину можна пояснити на прикладі простої системи Al – Cu (рис. 10.1).

На початковій стадії старіння утворюються зони з підвищеною концентрацією міді, близькою до концентрації її в хімічній сполуці  $\text{CuAl}_2$  – зони Гінье-Престона (ГП). В цих зонах кристалічна гратка викривлена, виникають значні внутрішні напруження, що призводить до підвищення твердості і міцності. Ці зони мають малу товщину (3-5 атомних шарів), а діаметр їх дорівнює декільком сотням ангстрем (ГП 1). В подальшому у цих зонах відбувається впорядкування в розташуванні атомів алюмінію та міді.

В подальшому ці зони збільшуються (ГП 2), відбувається виділення дрібних часток інтерметалідів, які пізніше коагулюють.



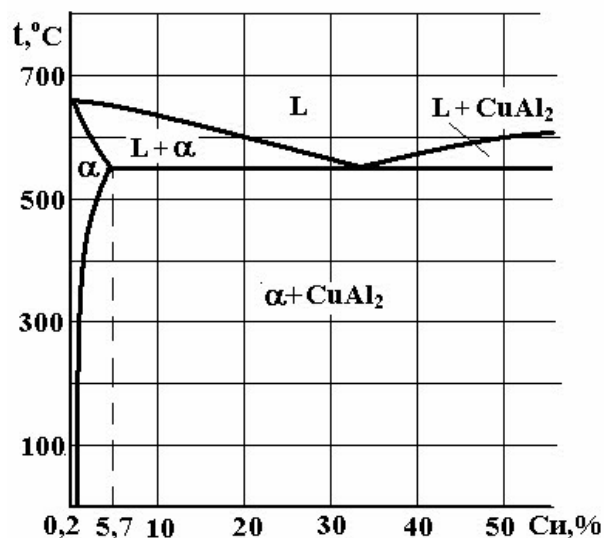


Рис. 10.1. Діаграма стану Al – Cu.

Структура сплаву Д1 після гартування та природного старіння складається із зерен твердого розчину алюмінію і темних включень інтерметалідних сполук (рис.10.2).

Після гартування та природного старіння дуралюмін марки Д1 має такі механічні властивості:  $\sigma_b = 420$  МПа,  $\delta = 15$  %,  $HV = 1000$  МПа і широко використовується для виготовлення деталей машин та конструкцій середньої міцності. Напівфабрикати із сплаву Д1 виготовляють у вигляді листів, плит, профілів, прутків, труб, штамповок та поковок.

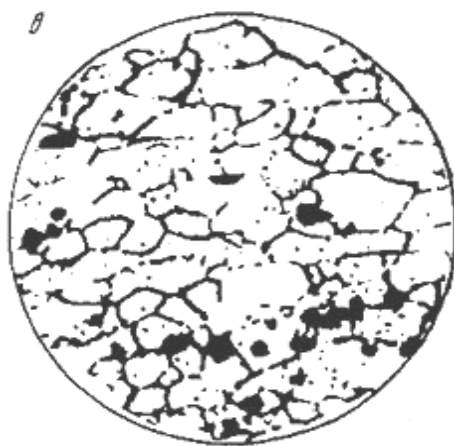


Рис. 10.2 Мікроструктура дуралюміну Д1, х 200.

### Силуміни

Типовими *ливарними* алюмінієвими сплавами є сплави системи Al-Si – *силуміни* (6...13% Si). Діаграма стану системи Al - Si евтектичного типу (рис.10.3). Легування Cu, Mg, Zn сприяє підвищенню міцності, особливо після гартування та старіння; Ti, Zr, В подрібнюють зерно та підвищують дисперсність евтектичних складових; Mn підвищує корозійну стійкість; Ni, Fe підвищують жароміцність ливарних алюмінієвих сплавів.

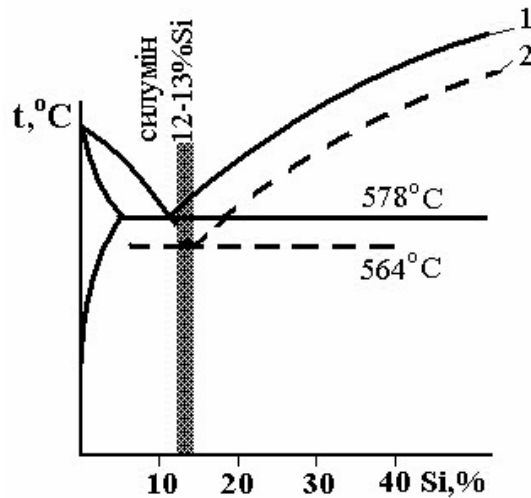


Рис. 10.3. Діаграма стану Al-Si. 1- без солей Na, 2 – із солями Na.

Суттєвого підвищення міцності силумінів досягають модифікуванням рідкого металу сумішшю солей  $2/3 \text{ NaF}$  і  $1/3 \text{ NaCl}$  або  $2/3 \text{ KF}$  і  $1/3 \text{ KCl}$  або введенням  $0,05\%$  Sr. Структура сплаву без модифікування складається з первинних кристалів кремнію та евтектики з голковою формою кристалів евтектичного кремнію (рис.10.4 а). Введення мікродомішок K, Na, Sr приводить до збільшення переохолодження, подрібнення та округлення евтектичного кремнію (рис.10.4 б), підвищення механічних властивостей сплавів системи Al-Si. Введення Na в сплав призводить до зміщення ліній діаграми стану в сторону підвищення концентрації кремнію у евтектиці (до значення  $\sim 14\%$  Si).

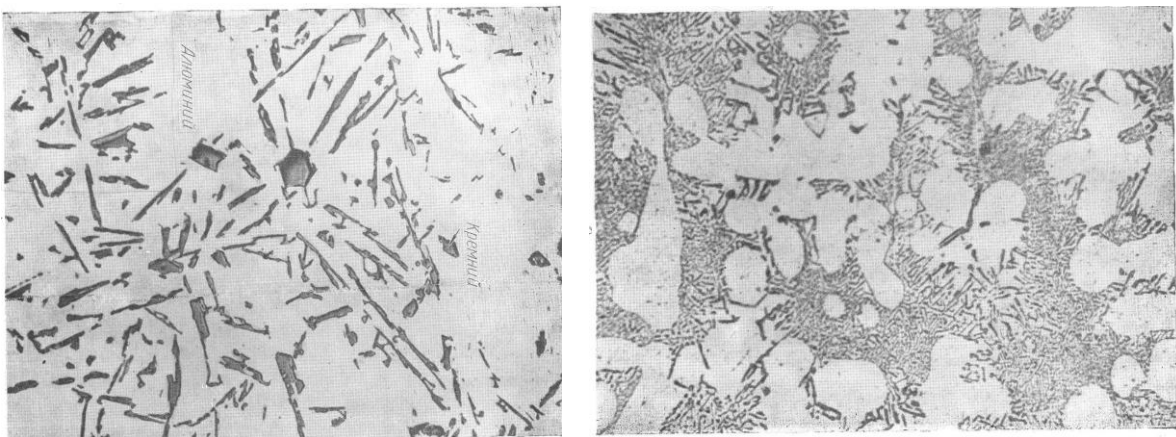


Рис. 10.4. Структура немодифікованого (а) і модифікованого (б) силуміну.

Такий процес модифікації переводить сплав у доевтектичний стан за рахунок зниження температури кристалізації евтектики з  $578$  до  $564\text{ }^\circ\text{C}$ , з отриманням дрібних зерен  $\alpha$ -твердого розчину та евтектики.

Маркують ливарні сплави згідно ГОСТ 2685 –75 літерами АК, далі йде цифра, що вказує вміст кремнію у сплаві, наприклад, АК12.

#### **Спечені алюмінієві порошки.**

Спечений порошковий сплав САП-1 — тепломіцний матеріал, виготовлений з алюмінієвої пудри марки АПС-1 шляхом брикетування, спікання і потім гарячого пресування при питомому тиску  $350\text{--}650\text{ МПа}$  і температурі  $450\text{--}550\text{ }^\circ\text{C}$ . САП-1

виготовляють у вигляді прутків, смуг, профілів, труб, дроту, листів, фольги, штамповок і широко застосовують у різних галузях промисловості.

Хімічний склад САП-1: 6—9%  $Al_2O_3$ ;  $Fe < 0,25\%$ ; решта – Al. Фізичні і механічні властивості САП-1 приведені в табл. 15.1 і 15.2.

Таблиця 10.1

Фізичні властивості САП-1

Густина, г/см <sup>3</sup> ( $\times 10^3$ кг/м <sup>3</sup> )	Коефіцієнт теплопровідності при 25-500°C, кал/см·с·°C ( $\times 418,68$ Вт/м·°C)	Коефіцієнт лінійного розширення 20-100°C $\times 10^6$ , 1/°C
2,73	0,4–0,36	21,2

Таблиця 10.2

Механічні властивості САП-1

Температура випробування, °C	E	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_B$	$\delta$ , %	НВ, МПа
	МПа				
20	66000	230	330	6	950-1000
500	37000	80	100	1	—

САП-1 має таку ж корозійну стійкість, як і алюміній А00. Матеріал задовільно деформується в гарячому стані – температура гарячої деформації 450—570°C, добре обробляється різанням, характеризується стабільністю властивостей після нагрівання до 500°C. При перегріві до 600°C на деталях зі сплаву САП-1 з'являються тріщини. Структура сплаву складається з механічної суміші алюмінію з оксидами алюмінію. Його застосовують для виготовлення деталей, що тривалий час працюють при температурах 350—500°C.

**Алюмінієві сплави, що використовують в мікроелектроніці.**

Для мікроелектроніки важливою є діаграма стану Al – Au (рис. 10.5.), оскільки, як правило, золоті дроти з'єднуються з алюмінієвим шаром металізації на кремнії.

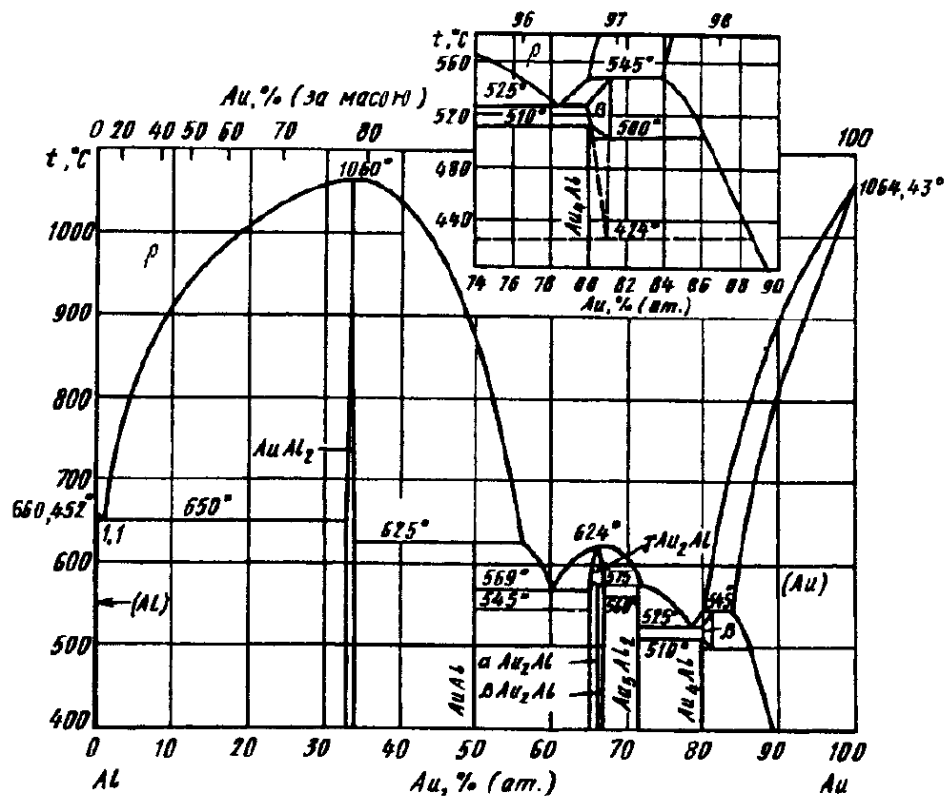


Рис.10.5. Діаграма стану Al – Au.

В системі утворюються інтерметалідні сполуки  $AuAl_2$ ,  $Au_2Al$ ,  $Au_5Al_2$  і  $Au_4Al$ , які можуть бути присутні в провідниках зв'язку Au – Al.

### Контрольні запитання

1. Властивості і область застосування алюмінію
2. Класифікація сплавів на основі алюмінію.
3. Методи захисту алюмінієвих сплавів від корозії.
4. Характеристика деформівних алюмінієвих сплавів, що не зміцнюються ТО.
5. Характеристика деформівних сплавів алюмінію, що зміцнюються ТО.
6. ТО дуралюмінію.
7. В чому суть природного та штучного старіння дуралюмінію?
8. Характеристика силумінів.
9. В чому суть модифікування силумінів?
10. Спечені алюмінієві порошки і сплави.

## ТЕМА 16. МІКРОСТРУКТУРА І ВЛАСТИВОСТІ МІДІ ТА СПЛАВІВ НА ЇЇ ОСНОВІ

Мідь відзначається відносно високою температурою плавлення (1083 °С) й високою густиною ( $8,93 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$ ). Високі електро- і теплопровідність, пластичність і корозійна стійкість міді є основними властивостями, завдяки яким вона знайшла широке застосування в електротехнічній, машинобудівній та приладобудівній промисловості.

Мідь у відпаленому стані має низьку міцність ( $\sigma_{\text{в}} = 250 \text{ МПа}$ ) і високу пластичність ( $\delta = 45 \%$ ). Шляхом легування (0,9 % Cd) і наступною холодною пластичною деформацією можна значно зміцнити мідь  $\sigma_{\text{в}} = 700 \text{ МПа}$ , відносне видовження при цьому знижується до 4 %, а електропровідність – на 10%.

Мікроструктура деформованої та відпаленої міді зерниста, з наявністю двійників. В недостатньо розкисленій при виплавці міді зберігаються включення закису міді  $\text{Cu}_2\text{O}$ .

Внаслідок невисокої міцності чиста мідь як конструкційний матеріал не знаходить широкого використання. Підвищення механічних та технологічних характеристик досягають сплавленням міді з іншими металами – цинком, оловом, алюмінієм, берилієм та ін.

Сплави міді поділяють на *латуні* (сплави міді з цинком), *бронзи* (сплави міді з усіма іншими легуючими елементами) та *спеціальні сплави* (мельхіори, нейзильбери та ін.).

### *Мікроструктура і властивості латуней.*

Діаграму стану системи мідь-цинк, що описує структури латуней, та залежність її механічних властивостей від вмісту цинку показано на рис. 11.1.

За *хімічним* складом латуні поділяють на прості (Cu – Zn) та складні (леговані), що додатково містять легуючі елементи.

За *структурою* їх поділяють на дві групи:

- латуні з умістом до 39% Zn є однофазними і мають структуру  $\alpha$  твердого розчину, під мікроскопом зерна цього твердого розчину містять значну кількість двійників аналогічно до інших металів та сплавів, що мають гранецентровану кубічну ґратку;

- сплави, що містять понад 39 % Zn, мають двофазну структуру  $\alpha + \beta'$ . Фаза  $\beta'$  має більший уміст цинку і після травлення набуває темнішого забарвлення, ніж  $\alpha$  - фаза.

При підвищенні вмісту цинку в  $\alpha$ -латуні до 39 % зростають її міцність і пластичність. А при підвищенні вмісту цинку від 39 до 45 % міцність продовжує зростати, а пластичність зменшується, особливо з появою  $\beta'$ - фази.

Внаслідок малої відстані між лініями ліквідус і солідус на діаграмі Cu-Zn, дендритна ліквіація у латуней проявляється слабо, але ці сплави схильні до утворення концентрованих усадочних раковин. Тому латуні використовують, в основному, як деформівні, а не ливарні сплави.

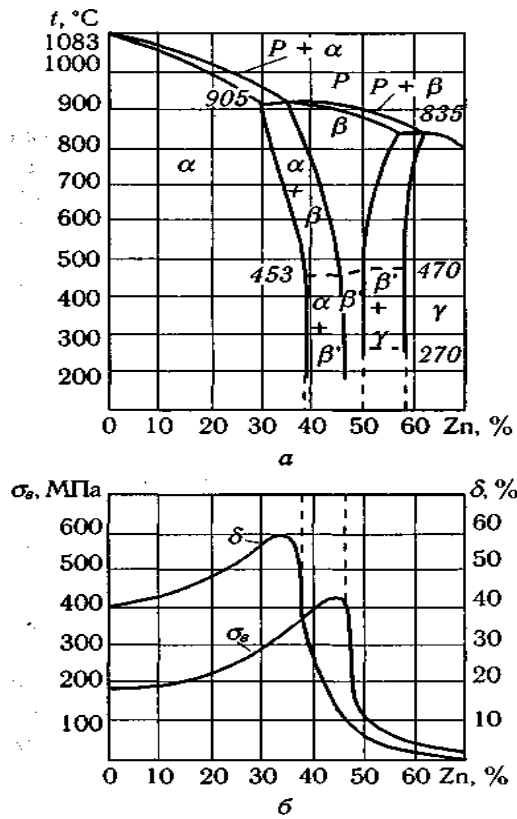


Рис. 11.1. Діаграма стану системи Cu – Zn (а) і залежність механічних властивостей литої латуні від вмісту Zn (б).

Мікроструктури литої, деформованої та відпаленої  $\alpha$ -латуні зображена на рис. 11.2. Внаслідок різної орієнтації зерен (анізотропії) вони протравлюються з різною інтенсивністю і тому набувають різного забарвлення.

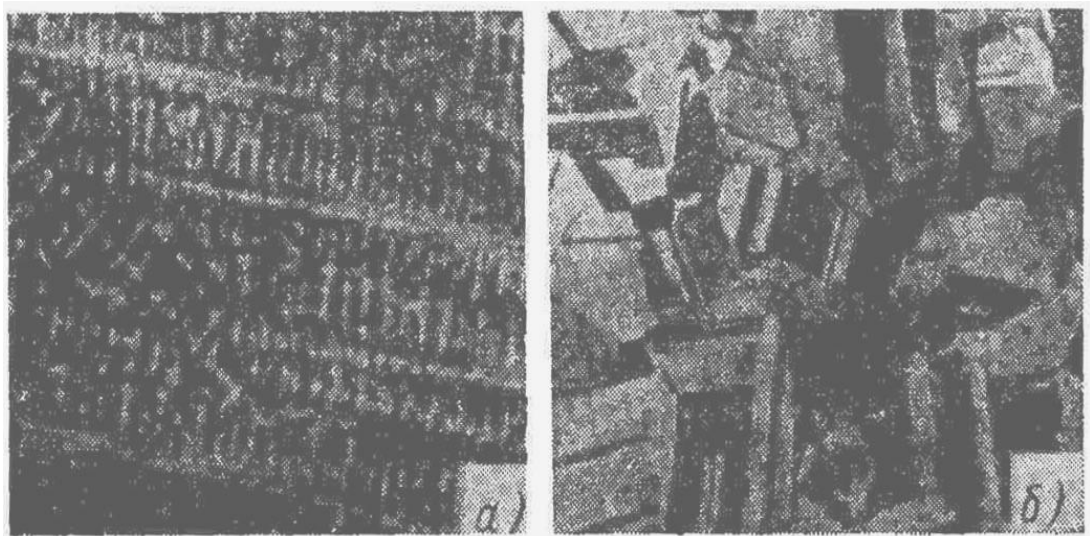


Рис. 11.2. Мікроструктура  $\alpha$ -латуні: а) литої; б) деформованої  $\times 250$ .

На рис. 11.3 зображено мікроструктуру литої  $\alpha + \beta'$ -латуні з умістом цинку 40%.

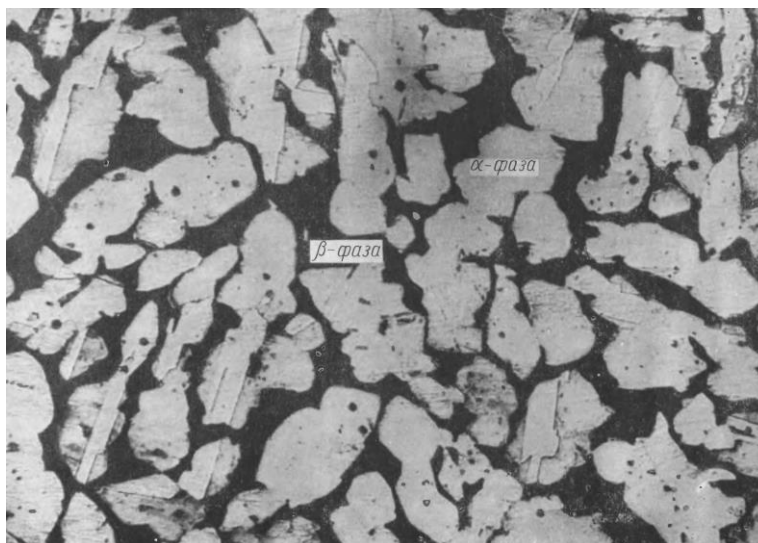


Рис. 11.3. Мікроструктура литої  $\alpha + \beta'$  - латуні,  $\times 250$ .

Окрім простих латуней, тобто сплавів міді з цинком, у техніці широко використовують спеціальні леговані латуні з більш високими механічними та експлуатаційними властивостями.

Латуні згідно ГОСТ 15527–70 і ГОСТ 17711-93 маркують літерою Л і цифрою, що відповідає середньому вмісту міді. Наприклад, Л80 — латунь, що містить 80 % Cu і 20 % Zn. У марках деформівних латуней складнішого складу після літери Л вказують скорочену назву легуючих елементів (О — олово, С — свинець, З — залізо, Мц — марганець, К — кремній, А — алюміній і т. д.), а після цього — цифри, що вказують на вміст Cu та інших компонентів, Так, хімічний склад латуні ЛМцС58-2-2 наступний: 58 % Cu, 2 % Mn і 2 % Pb (решта Zn).

### ***Мікроструктура і властивості бронз***

**Бронзами** називають сплави міді з оловом та іншими елементами (алюмінієм, кремнієм, берилієм).

Практичне застосування в машино- та приладобудуванні мають сплави міді з оловом, що містять до 12 % олова. Тому при дослідженні структури олов'янистих бронз користуються не всією діаграмою Cu-Sn (рис. 11.4), а лише її лівою частиною.

Особливістю олов'янистих бронз є їх значна схильність до ліквіації (велика відстань між лініями ліквідус та солідус) і сповільненість процесів дифузії.

Фаза  $\alpha$  є твердим розчином, утвореним на базі міді, фаза  $\beta$  — утворена на основі сполуки  $\text{Cu}_5\text{Sn}$ , а фаза  $\delta$  — на основі електронної сполуки  $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$ , яка відрізняється складною кристалічною решіткою в якій відношення числа валентних електронів до числа атомів дорівнює 21/13. При 350 °С  $\delta$  — фаза зазнає евтектоїдного перетворення  $\delta \rightarrow \alpha + \epsilon$ , де  $\epsilon$  є фазою, що утворюється на основі  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  при електронній концентрації 7/4.

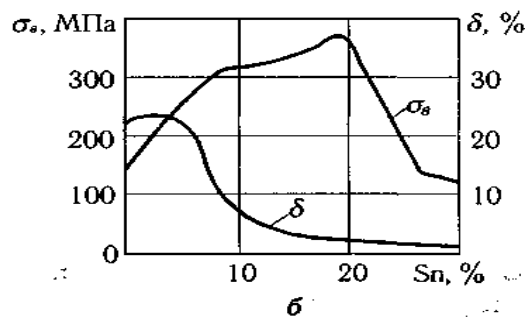
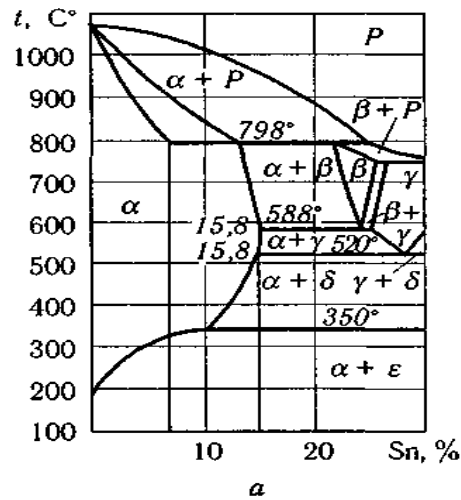


Рис. 11.4. Діаграма стану Cu – Sn (а) і залежність механічних властивостей бронз від вмісту Sn (б).

Твердий розчин  $\alpha$  має вигляд дендритів із значною хімічною неоднорідністю (дендритна ліквация). Якщо литий сплав з дендритною структурою відпалити, то утворюються однорідні зерна  $\alpha$  твердого розчину (рис. 11.5).

Олов'яниста лита бронза використовується в промисловості як антифрикційний матеріал.

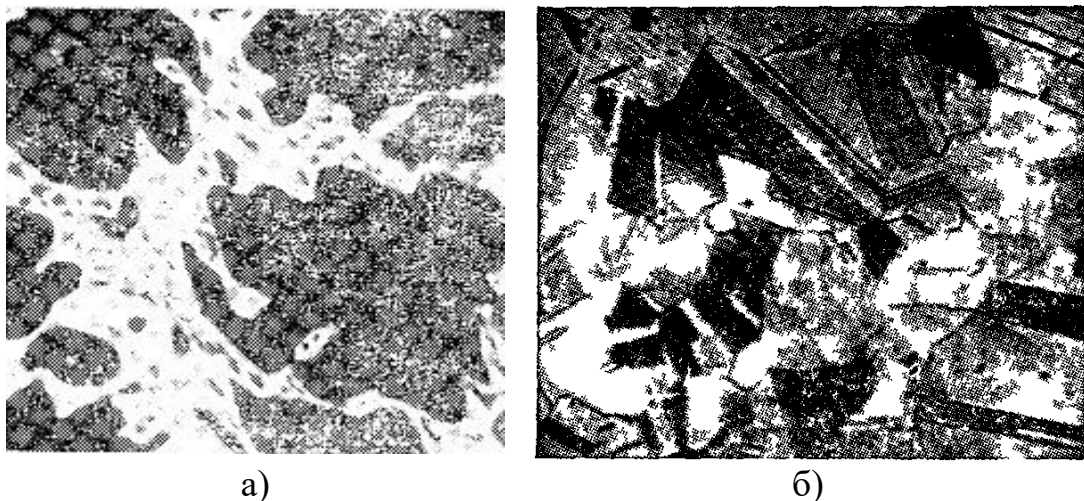


Рис. 11.5. Мікроструктура олов'янистої бронзи з 6 % олова: а) після литва, б) відпаленої  $\times 200$



На рис. 11.5 а зображено структуру литої  $\alpha$ -бронзи із умістом 6% олова. Її структура містить дендрити твердого розчину  $\alpha$ . Осі дендритів (темні ділянки на фото) збагачені міддю, оскільки вона, як більш тугоплавка, кристалізувалась першою, міжосеві простори (світлі ділянки) збагачені оловом, вони кристалізувались останніми. Така неоднорідна структура забезпечує невисокий коефіцієнт тертя. Бронза є антифрикційним матеріалом.

На рис. 11.5 б зображено структуру тієї ж бронзи після кування та відпалу при температурі 720°C. Її структура складається з однорідних за хімічним складом зерен твердого розчину  $\alpha$  і кристалів-двійників. Така структура не забезпечує антифрикційних властивостей.

Двофазна структура олов'янистої бронзи відрізняється від однофазної тим, що вона містить евтектоїд ( $\alpha + \delta$ ), а дендритність твердого розчину  $\alpha$  зберігається.

Вона складається із дендритів твердого розчину  $\alpha$  і евтектоїду ( $\alpha + \delta$ ), який розташований у вигляді звивистих включень у міждендритних прошарках. Евтектоїд при травленні шліфа 8%-ним аміачним розчином  $\text{CuCl}_2$  виявляється нечітко, проте чітко проявляється дендритність твердого розчину  $\alpha$ .

При травленні іншим реактивом – 3%-ним розчином  $\text{FeCl}_3$  в 10%-ній  $\text{HCl}$ , евтектоїд ( $\alpha + \delta$ ) виявляється досить чітко у вигляді сіро-голубих кристалів  $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$ , всередині яких залягають темні включення  $\alpha$  розчину.

Найпоширенішими марками олов'янистих бронз є бронзи з умістом олова 5 і 10 %, які часто замінюють дешевшими алюмінієвими бронзами (з 5 %Al), що мають вищі механічні властивості.

### Алюмінієві бронзи.

Сплави міді з алюмінієм називають алюмінієвими бронзами. Ліва, практична частина діаграми фазового стану  $\text{Cu} - \text{Al}$  зображена на рис. 11.6.

Практичне застосування мають сплави міді з алюмінієм, що містять 10 – 11 % Al і мають структуру  $\alpha$  або  $\alpha + \gamma'$ .

Сплави, що відповідають за складом області  $\alpha$  – однофазні, термічно не зміцнюювані, досить пластичні, їх структура складається з однорідних зерен твердого розчину  $\alpha$ .

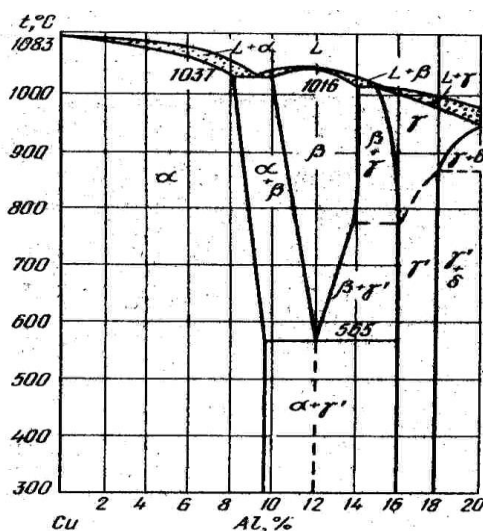


Рис.11.6. Діаграма фазового стану  $\text{Cu} - \text{Al}$

Сплави, що відповідають за складом області  $\alpha + \gamma'$  – двофазні сплави, термічно зміцнювані, менш пластичні, ніж сплави області  $\alpha$ , а в структурі містять евтектоїд  $\alpha + \gamma'$ . Внаслідок підвищеної крихкості фази  $\gamma'$  використовуються тільки доевтектоїдні двофазні алюмінієві бронзи, тобто з умістом Al менше 11,8 %.

Алюмінієві бронзи використовуються як в деформованому стані, так і литому. На рис. 11.7 зображено структуру литої алюмінієвої бронзи з 10 % Al. Структура складається із зерен твердого розчину  $\alpha$  (світлий фон) та евтектоїду  $\alpha + \gamma'$  (темний фон). При великих збільшеннях структура евтектоїду нагадує структуру перліту, тобто являє собою суміш  $\alpha + \gamma'$  -фаз.

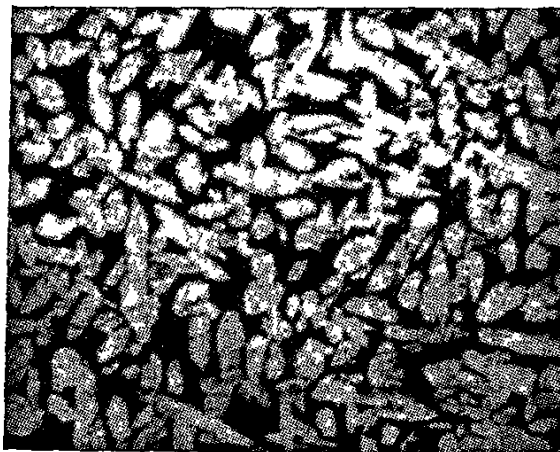


Рис. 11.7. Мікроструктура литої алюмінієвої бронзи з 10 % алюмінію  $\times 100$

Наявність евтектоїдного перетворення дозволяє піддавати двофазну алюмінієву бронзу термічній обробці, зокрема, гартуванню і відпуску. При нагріванні доевтектоїдної бронзи до області  $\beta$ -фази з наступним гартуванням у воді утворюється мартенситоподібна голкова структура.

Бронзи згідно ГОСТ 5017–74 маркують літерами Бр, після яких, як і в латуней, вказують інші компоненти (крім міді), а в кінці — цифрами вміст компонентів у відсотках. Скорочені назви легуючих елементів вказують аналогічно до латуней: О — олово, А — алюміній, Ф — фосфор, Т — титан, Ц — цинк і т. д. Наприклад, марка БрОЦ4-3 означає, що в бронзі є в середньому 4 % Sn, 3 % Zn, а решта — Cu.

### Контрольні запитання

1. Фізичні та механічні властивості міді.
2. Класифікація сплавів на основі міді.
3. Латуні, хімічний склад, мікроструктура (з використанням діаграми стану Cu-Zn).
4. Прості та складні латуні, їх маркування.
5. Олов'яні бронзи, їх хімічний склад, мікроструктура (пояснити з використанням діаграми Cu – Sn), області застосування.
6. Алюмінієві бронзи, особливості мікроструктури (пояснити з використанням діаграми Cu – Al), області застосування.

### Приклад тестових завдань для модульного контролю до розділу

## «Сплави кольорових металів алюмінію та міді»

1. Яку кристалічну решітку має Al?
  1. Кубічну гранецентровану.
  2. Гексагональну щільноупаковану.
  3. Тетрагональну об'ємноцентровану.
  4. Кубічну об'ємноцентровану.
2. Сплави системи Al-Cu-Mn-Mg називаються:
  1. Силумінами.
  2. Авіалями.
  3. Дуралюмінами.
3. До якої групи належить сплав марки САС-1?
  1. Ливарних Al-сплавів (силумін).
  2. Термічно незміцнюваних сплавів.
  3. Спечених деформівних.
4. Яким чином можна підвищити міцність сплавів АМ<sub>Г</sub>М-АМцМ?
  1. Гартуванням.
  2. Гартуванням, старінням.
  3. Нагартовкою.
  4. Відпалом.
5. Які з нижченаведених сплавів мають найкращі ливарні властивості?
  1. АМц-1, АМ<sub>Г</sub>-3Н, Д16, САП-1.
  2. АЛ6, АЛ8.
  3. Д16, АК6.
  4. САП-1, САС-2.
6. Яким із нижченаведених способів можна зміцнити та подрібнити структуру сплавів групи силумінів?
  1. Гартуванням.
  2. Гартуванням та старінням.
  3. Модифікуванням.
  4. Прискорення охолодженням рідкого сплаву.
7. Що лежить в основі процесу тах зміцнення дуралюмінів?
  1. Утворення мартенситу.
  2. Розпад мартенситу з утворенням Q-фази (CuAl<sub>2</sub>).
  3. Розпад твердого розчину Cu в Al з утворенням фаз ГП-1 – ГП-2.
  4. Утворення дрібнозернистої структури.
8. Які із наведених марок алюмінієвих сплавів мають найвищу міцність:
  1. Д1, Д16.
  2. АЛ9, АЛ19.
  3. В95, В96.
  4. САС1, САП2.
9. Порівнюючи діаграми стану Al-Cu та Al-Si скажіть які за складом сплави мають оптимальні ливарні властивості.
  1. З мінімальною температурою плавлення і мінімальним інтервалом кристалізації.

2. З мінімальною та сталою температурою кристалізації.
  3. Близькі за складом до евтектичних.
  4. Віддалені за складом від евтектичних.
10. Який із металів, приведених нижче, має питому міцність  $\sigma_B/\sigma \approx 70$ , що рівноцінно сталям з  $\sigma_B \approx 300 \text{ кгс/мм}^2$ .
1. Al.
  2. Ti.
  3. Mg.
  4. Be.
11. До якої з нижченазваних груп не належить мідь?
1. Важких металів.
  2. Кольорових металів.
  3. Корозійностійких металів (благородних).
  4. Легкоплавких металів.
12. Яких сплавів міді не існує?
1. Сплави міді з берилієм.
  2. Сплави міді з свинцем.
  3. Сплавів міді з цинком.
  4. Сплавів міді з хромом.
13. Сплави міді з цинком називають.
1. Бронзи.
  2. Мельхіори.
  3. Латуні.
  4. Нейзильбери.
14. Яке основне ізотермічне перетворення в латунях формує їх структуру?
1. Евтектичне.
  2. Перитектичне.
  3. Перитектоїдне.
  4. Евтектоїдне.
15. Яким способом можна усунути ефект ліквідації в бронзах?
1. Відпуском.
  2. Рекристалізаційним відпалом.
  3. Дифузійним відпалом.
  4. Гартуванням з відпуском.
16. Яка із наведених нижче марок мідних сплавів не відноситься до групи бронз?
1. БрАЖ9-4.
  2. Б83.
  3. БрС30.
  4. БрКМц3-1.
17. Латунь якої марки називають «томпак»?
1. Л96.
  2. Л80.
  3. ЛС59Л.
  4. ЛКС80-33.
18. Який основний вид термічної обробки латуней?

1. Гартування з відпуском.
  2. Нормалізація.
  3. Рекристалізаційний відпал.
  4. Старіння.
19. До якої групи металів відноситься берилій:
1. Чорних.
  2. Кольорових.
  3. Тугоплавких.
  4. Рідкісних.
20. Який із перерахованих нижче металів має найменшу густину і схильний до самозагоряння?
- |        |        |
|--------|--------|
| 1. Ti. | 2. Mg. |
| 3. Al. | 4. Be. |

## ТЕМА 17. БУДОВА І ВЛАСТИВОСТІ ПЛАСТМАС

**Пластмаси** - це матеріали на основі природних або синтетичних високомолекулярних сполук (полімерів), які можуть під впливом температури і тиску набувати заданої форми і зберігати цю форму після охолодження та зняття навантаження.

Високі фізико-хімічні, механічні і технологічні властивості роблять пластмаси перспективними конструкційними матеріалами в машино- і приладобудуванні, електро- і радіотехніці, легкій, харчовій та хімічній промисловості, будівництві, медицині і т.п. Зокрема, завдяки малій густині їх використовують в авіа-, авто- і ракетобудуванні. Низька теплопровідність (у 20...70 разів нижча, ніж у сталі) дає можливість використовувати пластмаси як теплоізолятор. Деякі пластмаси мають високу морозо- і теплостійкість і можуть витримувати температуру від -260 до +260 °С.

Основним недоліком пластмас є відносно низька твердість, а також швидке старіння.

### **Класифікація пластмас.**

1. За **складом** пластмаси поділяють на **однокомпонентні**, які складаються з одного компонента — високомолекулярної сполуки (поліетилену, поліпропілену, полівінілхлориду, полістиролу тощо) і **композитні**, які крім високомолекулярної сполуки, містять ще й інші компоненти (наповнювачі, пластифікатори, зміцнювальні та мастильні речовини, каталізатори, барвники, стабілізатори, антипірени, антистатиками, пороутворювачі) сумарною кількістю 20...80 % за об'ємом.

**Наповнювачі** — органічні й неорганічні речовини у вигляді порошків, волокон або листів, що додаються для підвищення міцності, жорсткості, теплостійкості, зменшення усадки, а також зниження вартості пластмаси.

**Пластифікатори** підвищують пластичність й полегшують переробку пластмас у виробі. Водночас пластифікатори зменшують міцність і жорсткість пластмаси. До них належать малолеткі органічні речовини типу гліцерину та касторової олії, які проникають у пластмасу, зменшуючи взаємодію між молекулами.

**Мастильні** речовини (стеарин, олеїнова кислота та ін.) усувають прилипання матеріалу до прес-форми та збільшують його текучість, зменшуючи тертя між частинками композиції.

**Каталізатори** (уротропін, оксиди металів) прискорюють твердіння пластмаси.

**Барвники** (пігменти, природні лаки) надають пластмасовим виробам естетичного вигляду.

**Стабілізатори** (нафталін, сажа, антрацен) — речовини, що сповільнюють атмосферне старіння пластмас під дією світла, теплоти, кисню та озону. Старіння супроводжується поступовою зміною структури і погіршенням властивостей матеріалу.

**Антипірени** (ізоціаніти, сполуки стибію) зменшують горючість полімерів.

**Антистатиками** перешкоджають виникненню й нагромадженню статичного електричного заряду у виробі з полімерних матеріалів.

**Пороутворювачі** — речовини, які розпадаються під час нагрівання, виділяючи газ, що спінюють смолу, внаслідок чого утворюється пориста структура в поро- та пінопластах.

2. За **реакцією утворення** полімерів пластмаси поділяють на **полімеризаційні** та **поліконденсаційні**.

**Полімеризаційні пластмаси.**

Їх отримують **полімеризацією**, тобто утворенням високомолекулярної сполуки (полімера) із низькомолекулярних сполук (мономерів), під час якого не виділяються побічні продукти реакції. Найчастіше застосовують поліетилен, полістирол, фторопласт.

**Поліетилен** отримують полімеризацією етилену  $\text{CH}_2 = \text{CH}_2$  під високим тиском (100 МПа) у газовій фазі і при низькому тиску в розчині:



Область застосування поліетилену: кабельна ізоляція, деталі радіо- і телеустановок, деталі електронних та хімічних апаратів, плівки для зберігання харчових продуктів тощо. Поліетилен біологічно нешкідливий, тому він широко застосовується у медицині, у житловому будівництві. Завдяки високій хімічній стійкості поліетилен широко застосовується в хімічній промисловості для виробництва пластикових труб, частин різних апаратів, внутрішньої футеровки місткостей для зберігання кислот. Поліетилен застосовується також в електротехнічній, електрокабельній і радіотехнічній промисловості як високоякісний і високочастотний провідник. Значна частина поліетилену йде на виготовлення водопровідних труб, а також різних побутових предметів — поліетиленових плівок, бутелів, пробок.

**Полістирол** одержують полімеризацією стиролу:



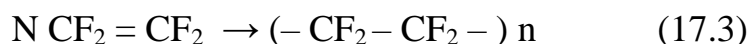
Полістирол — твердий, жорсткий, прозорий, хімічнотривкий у розчинах багатьох лугів і кислот. Витримує температуру від  $-20$  до  $80$  °С, має добрі діелектричні показники, набуває забарвлення різного кольору. Полістирол використовують для виготовлення корпусів телевізорів, деталей холодильників, меблевої фурнітури, підносів, футлярів, канцелярських товарів, гудзиків, електроізоляційних плівок і багатьох деталей в електро- і радіотехнічній промисловості. Недоліки полістиролу — низька теплостійкість і швидке старіння.

**Політетрафторетилен.** Високотривкий до будь-яких розчинників, добрий теплоізолятор й діелектрик, має низький коефіцієнт тертя (0,04). Його діапазон робочих температур від  $-26$  до  $260$  °С. З політетрафторетилену виготовляють прокладки, манжети, радіотехнічні вироби, хімічно тривкі деталі, підшипники, що не потребують змащування, пористі вироби, а також протези людських органів.

**Поліметилметакрилат** або органічне скло. Він оптично прозорий, доволі міцний, добрий електроізолятор. Від силікатного скла відрізняється низькою

густиною й підвищеною пластичністю. Недоліки органічного скла — невисока твердість і теплостійкість (при температурі 90 °С воно починає розм'якати). Використовується як листове скло (в т.ч. для літаків), для виготовлення лінз, призм, шкал, футлярів тощо.

**Фторопласти** – похідні етилену  $\text{CH}_2 = \text{CH}_2$ , де всі атоми водню заміщені фтором.



Область застосування: деталі електро- та радіотехніки, крани, труби, як діелектрик використовується у техніці високих та ультрависоких частот, зокрема, для ізоляції високочастотних кабелів, які працюють при підвищеній температурі. Прокатана фторопластова плівка використовується при виготовленні кабелів, проводів, конденсаторів, для ізоляції котушок. Завдяки хамічній інертності, гідрофобності і текучості матеріал використовують для ущільнення різьбових і фланцевих з'єднань (лента ФУМ).

#### **Поліконденсаційні пластмаси.**

Їх отримують **поліконденсацією**, суть якої полягає утворенні високомолекулярної сполуки (полімера) із низькомолекулярних сполук (мономерів), яке супроводжується виділенням побічних речовин ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{NH}_3$  та ін.). Тому склад елементарної нитки полімеру не відповідає складу вихідних мономерів.

Важливим представником поліконденсаційних пластмас є фенопласти, амінопласти, поліаміди, а також пластмаси на основі поліефірних, епоксидних і кремнійорганічних смол.

3. За **поведінкою під впливом температури** пластмаси поділять на **термопласти** і **терморектопласти**.

**Термопласти** (поліетилен, полістирол та ін.) не втрачають здатності розплавлятися і розчинятися під час багаторазового нагрівання і охолодження, зберігаючи при цьому свої властивості.

**Терморектопласти** (фенолформальдегід, амінопласти, текстоліт, склотекстоліт) при формуванні під дією температури і тиску спочатку стають пластичними, потім при певній температурі переходять в твердий, неплавкий, нерозчинний стан і тому не можуть повторно перероблятися.

4. За **призначенням** пластмаси ділять на конструкційні, електрохімічні, корозійностійкі.

5. За **видом наповнювача**:

Пошарові – гетінакс (шари паперу і фенолформальдегідних смол); текстоліт (шари тканини і фенолформальдегідних смол); дерев'яно-пошарові (шари дерев'яного шпону і фенолформальдегідні смоли); азботекстоніт (шари азбестової тканини і різних терморективних смол); склотекстоліт (шари склотканини і фенолформальдегідних смол) і т.п.

Преспорошки – порошкоподібні наповнювачі (деревна мука, порошок кварцу) і полімери на основі формальдегідних смол, карбомідних, епоксидних смол.

Газонаповнюючі пластмаси – пінопласти і поропласти.



Полімери можуть знаходитися у двох агрегатних станах: твердому – аморфному або кристалічному і рідкому – в'язкотекучому.

Із термомеханічної кривої аморфного полімеру (рис. 17.1) видно, що аморфні полімери при температурі скловання переходять із склоподібного стану у високоеластичний стан, а потім при температурі початку в'язкої течії – у в'язкотекучий.

Кристалічні полімери практично не мають зони високоеластичного стану.

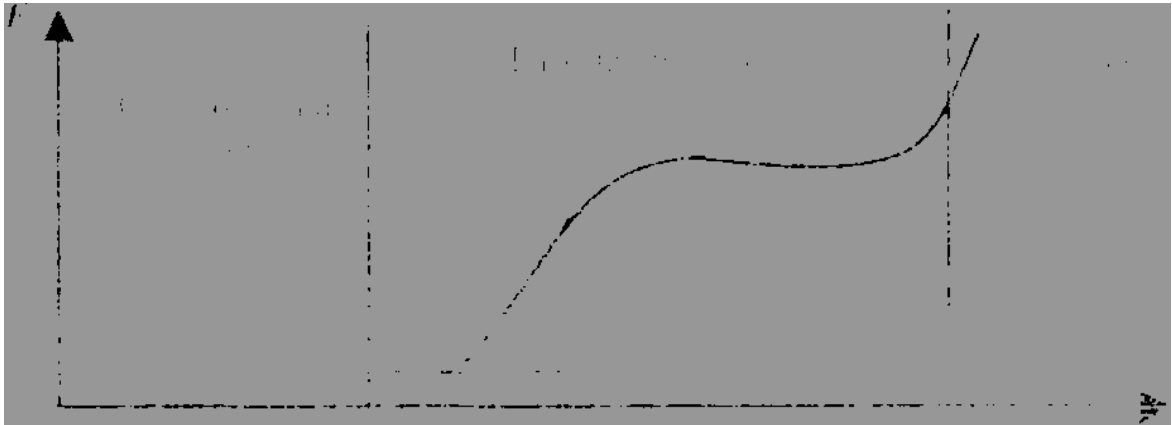


Рис. 17.1. Термомеханічна крива аморфного полімера.

Залежно від деформації і фізичного стану полімерів від температури, пластмаси переробляють у вироби різними способами у в'язкотекучому, високопластичному, рідкому і твердому стані, а також проводять зварювання і склеювання.

Механічні випробування пластмас полягають у статичних випробуваннях на розтяг, стиск і згин; динамічних випробуваннях на удар; визначенні твердості.

Метод визначення ударної в'язкості за Шарпі ґрунтується на вимірюванні роботи в кДж, необхідної для руйнування стандартного зразка, який вільно лежить на двох опорах. Показником ударної в'язкості є робота в кДж, що приходить на 1 м<sup>2</sup> площі поперечного січення.

$$КС = A / F \quad (\text{кДж/м}^2), \quad (17.4)$$

де А – робота, витрачена на руйнування зразка (кДж);

F – площа поперечного січення зразка, м<sup>2</sup>.

$$F = b \cdot h, \quad (17.5)$$

де b- ширина зразка, м; h- товщина зразка, м.

**Твердість** – це здатність матеріалу протистояти проникненню в поверхневі шари сторонніх тіл. Ця здатність залежить від властивостей матеріалу і від форми і властивостей індикатора.

Твердість пластмас визначають проникненням в матеріал сталюї кульки під заданим навантаженням (прилад Брінелля). Твердість за Брінеллем вимірюють в Н/мм<sup>2</sup>:

$$H = P / \pi \cdot D \cdot h \text{ (Н/мм}^2\text{)}, \quad (17.6)$$

де P - навантаження, яке діє на кульку, Н;

D - діаметр кульки, мм;

h - глибина проникнення, мм.

### **Контрольні запитання**

1. Що таке пластмаси? Їх переваги та недоліки.
2. Властивості та область застосування пластмас.
3. З якою метою у пластмаси додають наповнювачі, пластифікатори, барвники та спеціальні добавки?
4. Класифікація пластмас:
  - за складом;
  - за реакцією утворення полімерів;
  - за поведінкою при нагріванні;
  - за призначенням;
  - за видом наповнювача.
5. Термомеханічна крива аморфного полімера.

## ГЛОСАРІЙ

**АЛОТРОПІЧНА МОДИФІКАЦІЯ** — одна із кристалічних форм речовини.

**АЛОТРОПІЯ** — існування одного і того ж хімічного елемента у вигляді двох чи кількох простих речовин, різних за кристалічними формами і властивостями.

**АНІЗОТРОПІЯ** — векторіальність властивостей матеріалу в різних напрямках.

**БІЛИЙ ЧАВУН** — чавун з матово-білою поверхністю зламу, в якому весь вуглець знаходиться в зв'язному стані – у вигляді карбїду заліза  $\text{Fe}_3\text{C}$ .

**БЛИЖНІЙ ПОРЯДОК** — певнапорядкованість в розташуванні сусідніх атомів на відстанях, співрозмірних з міжатомними, в рідких металах при температурах близьких до температури кристалізації.

**БЛОКИ МОЗАЇКИ** — ділянки монокристалу чи зерен полікристалу, що відрізняються незмінною кристалічною ґраткою і розорієнтовані на долі градуса.

**БОРУВАННЯ** — насичення поверхні виробів зі сталі і деяких інших металів бором для підвищення твердості, зносостійкості і корозійної стійкості.

**БРОНЗА** — сплав міді з різними хімічними елементами (оловом, алюмінієм, берилієм, кремнієм і ін.), за винятком цинку і нікелю.

**ВАКАНСІЇ** — точкові дефекти кристалічної ґратки, які являють собою вільні від атомів вузли кристалічної ґратки.

**ВИСОКОМІЦНИЙ ЧАВУН** — чавун, в якому графіт має кулясту форму.

**ВИСОКОЧАСТОТНЕ ГАРТУВАННЯ** — поверхнєве гартування сталі з застосуванням нагрівання струмами високої частоти.

**ВІДПУСКНА КРИХКІСТЬ I РОДУ** — зниження ударної в'язкості легованої сталі після відпуску при температурі близько 300 °С. Не залежить швидкості охолодження після відпуску. Усувають повторним відпуском при більш високій температурі.

**ВІДПУСКНА КРИХКІСТЬ II РОДУ** — зниження ударної в'язкості легованої сталі при відпуску в інтервалі температур 400— 600 °С. Проявляється в результаті повільного охолодження після відпуску. Усувають шляхом легування сталі молібденом чи вольфрамом, а також прискореним охолодженням після відпуску.

**ГЕТЕРОГЕННА СТРУКТУРА** — неоднорідна структура, певні частини якої відрізняються за фізичними і хімічними властивостями і відділені одні від одних поверхнею розділу.

**ГАЗОВЕ ЦІАНУВАННЯ** — дифузійне насичення поверхні сталевих деталей одночасно вуглецем і азотом в газовому середовищі для підвищення поверхневої твердості, зносостійкості і витривалості сталі.

**ГАЗОВІ РАКОВИНИ** — порожнини (пустоти) у виливках чи зливках, які виникають при кристалізації і заповнені газом, що виділяється з нього.

**ГІСТЕРЕЗИС** — різна реакція фізичного тіла на певні внутрішні впливи в залежності від того, чи піддавалось це тіло раніше тим же впливам чи піддається їм вперше.

**ГОМОГЕНІЗАЦІЯ** — вирівнювання хімічного складу металу за об'ємом зливка, виливки, деталі, зерна.

**ГРАФІТИЗАЦІЯ** — утворення частинок графіту в структурі чавунів внаслідок розпаду термодинамічно нестійкого цементиту. Процес графітизації лежить в основі отримання ковкого чавуну.

**ДЕНДРИТИ** — кристали деревоподібної форми, які утворюються з розплавів, парів чи розчинів в процесі кристалізації речовини в умовах направленої теплопровідності.

**ДЕНДРИТНА ЛІКВАЦІЯ** — хімічна неоднорідність в межах дендриту.

**ДЕФЕКТИ КРИСТАЛІЧНОЇ РЕШІТКИ МЕТАЛІВ** — порушення правильного періодичного розміщення атомів (іонів) в вузлах кристалічної ґратки металів. Їх поділяють на точкові (вакансії і між вузлові атоми), лінійні (дислокації), поверхневі (границі зерен і субзерен, дефекти пакування) і об'ємні (пори, тріщини) .

**ДЕФЕКТИ МЕТАЛІВ** — порушення кристалічної структури металів; відхилення від передбаченої технічними умовами якості металів за хімічним складом, структурою, станом поверхні, механічними і іншими властивостями.

**ДИСПЕРСНА СТРУКТУРА** — структура речовини, що включає в себе найдрібніші частинки однієї чи кількох фаз (чим дрібніші частинки, тим вища дисперсність структури).

**ДИФУЗІЙНА МЕТАЛІЗАЦІЯ** — насичення поверхневих шарів металевих виробів іншими металами шляхом їх дифузії при високій температурі для підвищення зносо- і корозійної стійкості та в декоративних цілях.

**ДИФУЗІЙНИЙ ВІДПАЛ** — термічна обробка сплавів з метою усунення дендритної ліквідації, що полягає у нагріванні і тривалому витримуванні виливків при високій температурі.

**ДИФУЗІЙНИЙ ШАР** — поверхневий шар металу, в якому відбувається зміна складу при хімічно-термічній обробці.

**ДИФУЗІЯ** — теплове переміщення іонів, атомів в напрямку вирівнювання їх концентрації; в кристалічній речовині — переміщення атомів на віддалі, що перевищують міжатомні.

**ДІАГРАМА СТАНУ СПЛАВІВ** — графічна залежність між фазовим та структурним складом сплавів, температурою і концентрацією компонентів. Показує склад сплавів у рівноважних умовах. За допомогою діаграми стану визначають температуру плавлення сплавів, вибирають температури оброблення тиском, встановлюють режими термічної обробки сплавів.

**ДІАГРАМА СТАНУ ЗАЛІЗО-ЦЕМЕНТИТ** — діаграма, яка описує фазовий та структурний стан залізобуглецевих сплавів в залежності від складу і температури.

**ДОЕВТЕКТОЇДНА СТАЛЬ** — вуглецева чи низьколегована сталь, що містить менше, ніж 0,8% вуглецю, у рівноважному стані (після відпалу) має структуру фериту і перліту, за призначенням – конструкційна.

**ДУРАЛІУМІН** — сплав алюмінію з 2,2— 5,2% Cu, 0,2—2,7% Mg і 0,2—1,0% Mn.

**ЕВТЕКТОЇДНА СТАЛЬ** — сталь з вмістом вуглецю 0,8%, рівноважна структура якої складається з перліту.

**ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ** — властивість матеріалу проводити електричний струм під дією незмінного в часі електричного поля.

**ЕЛЕКТРОХІМІЧНА КОРОЗІЯ** — руйнування металів у водних розчинах електrolітів.

**ЖАРОМІЦНА СТАЛЬ** — сталь, здатна чинити опір деформації і руйнуванню при високих температурах. З них виготовляють клапани двигунів внутрішнього згоряння, лопатки турбін, деталі кріплення і т. д.

**ЖАРОМІЦНІСТЬ** — здатність матеріалів (переважно металевих сплавів) при високих температурах витримувати без руйнування механічні навантаження. Жароміцність сплаву характеризується опором повзучості.

**ЖАРОСТІЙКА СТАЛЬ** — сталь, стійка проти окиснення при високій температурі.

**ЖАРОСТІЙКІСТЬ** — здатність металів і сплавів чинити опір окисненню при високих температурах.

**ЗАГАРТОВУВАНІСТЬ** — здатність сталі набувати максимальної твердості в результаті гартування.

**ЗАЕВТЕКТОЇДНА СТАЛЬ** — вуглецева і легована сталь, що містить більше 0,8% С, у рівноважному стані (після відпалу) структура заевтектоїдної сталі складається з перліту і цементиту.

**ЗАРОДКИ КРИСТАЛІВ** — групи атомів або нерозчинні в розплаві частинки, навколо яких при переохолодженні виростають кристали.

**ЗЕРНИСТІСТЬ** — характеристика розміру абразивних зерен. Зернистість шліфувальних кругів характеризується розміром зерен і позначається відповідним номером. За зернистістю абразивний матеріал поділяється на шліфзерно, шліф-порошки, мікропорошки.

**ЗЕРНО (КРИСТАЛІЧНЕ)** — кристал певної форми в полікристалічному матеріалі.

**ЗЛАМ** — поверхня, яка утворюється після руйнування взірця чи виробу.

**ЗНЕВУГЛЕЦЬОВУВАННЯ** — зменшення вмісту вуглецю на поверхні сталевих деталей при нагріванні в окислювальному або водневому середовищі.

**ЗНОСОСТІЙКІСТЬ** — опір матеріалів, деталей машин і інших поверхонь тертя зношуванню, залежить від хімічного складу сплавів, структури, термічної обробки і твердості структурних складових.

**ЗОНАЛЬНА ЛІКВАЦІЯ** — хімічна неоднорідність по об'єму зливка, деталі чи зварного шва..

**ІЗОТЕРМІЧНЕ ГАРТУВАННЯ** — гартування, яке полягає в різкому охолодженні сталі до температури 300—400 °С, подальшому тривалому витримуванні при цій температурі до повного або часткового розпаду аустеніту і охолодженні на повітрі. Знижуються внутрішні напруження, утворюється структура бейніту або бейніту з мартенситом.

**ІЗОТРОПІЯ** — однаковість фізичних і механічних властивостей тіла (середовища) у всіх напрямках.

**ІНВАРНІ СПЛАВИ** — залізонікелеві сплави з низьким температурним коефіцієнтом лінійного розширення. З високим вмістом хрому мають хороші антикорозійні властивості. Використовують при виготовленні точних приладів і деталей до них.

**ІНСТРУМЕНТАЛЬНА СТАЛЬ** — вуглецева і легована сталь з високою твердістю, міцністю, зносостійкістю, яка використовується для виготовлення різального, штампового і вимірального інструменту.

**ІНТЕРКРИСТАЛІТНА КОРОЗІЯ** — теж, що й міжкристалітна корозія.

**КАРБІДНА ЛІКВАЦІЯ** — неоднорідність розподілу карбідів у високовуглецевій легованій сталі, погіршує властивості швидкорізальних сталей.

**КОАГУЛЯЦІЯ** — укрупнення частинок в дисперсних системах.

**КОБАЛЬТОВІ СПЛАВИ** — сплави на основі кобальту з добавками-домішками хрому, нікелю, молібдену, вольфраму і інших елементів, мають малий коефіцієнт термічного розширення в інтервалі температур 20—870 °С, високі жаро- і корозійну стійкість, особливі магнітні властивості. Їх застосовують для виготовлення деталей, які експлуатують при високих температурах, наприклад, лопаток турбореактивних двигунів.

**КОВКИЙ ЧАВУН** — сірий чавун підвищеної пластичності, в якому графіт має форму пластівців. З нього виготовляють колінчасті і розподільні вали, поршні дизельних двигунів, коромисла клапанів, деталі зчеплення та інші вироби.

**КОЕФІЦІЄНТ ДИФУЗІЇ** — кількість речовини, що дифундує через одиницю площі (1 см<sup>2</sup>) за одиницю часу (1 с) при перепаді концентрації, що дорівнює одиниці.

**КОНСТРУКЦІЙНА СТАЛЬ** — вуглецева або легована сталь, що містить менше, ніж 0,8% С, є доевтектоїдною і призначена для виготовлення деталей машин і будівельних конструкцій.

**КОРОЗІЯ** — процес руйнування металів і сплавів під дією навколишнього середовища. За механізмом корозійного процесу розрізняють хімічну і електрохімічну корозію.

**КРИСТАЛИ** — тверді тіла із закономірним розташуванням атомів (іонів), що утворюють кристалічну ґратку.

**КРИСТАЛІЗАЦІЯ** — перехід з рідкого чи газоподібного стану в твердий з утворенням кристалічної структури.

**КРИСТАЛІЧНА ГРАТКА** — геометрично правильне, закономірне розташування атомів (іонів) в просторі. Біль-шість технічно важливих металів утворюють складну кристалічну решітку: кубічну об'ємноцентровану, кубічну гранецентровану, чи гексагональну щільноупаковану.

**КРИТИЧНИЙ СТУПІНЬ ДЕФОРМАЦІЇ** — величина (ступінь) пластичної деформації металу чи сплаву, при якому після рекристалізаційного відпалу утворюються зерна максимального розміру:

**КРИТИЧНА ТОЧКА** — температура, при якій в металі чи сплаві відбувається фазове перетворення.

**КРИТИЧНА ШВИДКІСТЬ ГАРТУВАННЯ** — мінімальна швидкість охолодження сталі, при якій утворюється структура мартенситу без продуктів перлітного та бейнітного розпаду аустеніту. При гартуванні сталь потрібно охолоджувати зі швидкістю більшою, ніж критична швидкість гартування.

**КРИТИЧНИЙ ДІАМЕТР** — максимальний діаметр сталювого циліндру, який прогартується наскрізно в даному охолоджувальному середовищі.

**КРИХКІСТЬ** — властивість твердих матеріалів руйнуватися при механічних впливах без помітної пластичної деформації.

**ЛАТУНЬ** — сплав Cu з Zn (до 45%), з добавками Al, Fe, Mn, Ni, Pb і інших елементів. За способом обробки латуні поділяють на деформівні латуні, що піддаються обробці тиском, і ливарні латуні, що відрізняються хорошими ливарними властивостями. Латунь застосовують в машино- і приладобудуванні, в автомобільній і суднобудівній промисловості.

**ЛЕГОВАНА СТАЛЬ** — сталь, у склад якої вводять хімічні (легуючі) елементи для підвищення експлуатаційних і технологічних властивостей. Конструкційну леговану сталь застосовують в машинобудуванні для виробництва виробів, які витримують при експлуатації статичні і динамічні навантаження. Леговану сталь з особливими фізичними і хімічними властивостями використовують для виготовлення клапанів двигунів внутрішнього згоряння, лопаток парових і газових турбін, хімічної апаратури і інших виробів.

**ЛЕГУВАННЯ** — введення до складу металевих сплавів спеціальних хімічних елементів для зміни будови сплавів, надання їм певних фізичних, хімічних чи механічних властивостей. Легування, при якому елементи вводять в кількості 0,1% називається мікролегуванням.

**ЛЕГУЮЧІ ЕЛЕМЕНТИ** — хімічні елементи, переважно метали, що вводять до складу сплавів для надання їм певних властивостей (Ni, Cr, Mn, V, Ti та інші).

**ЛЕДЕБУРИТ** — евтектична механічна суміш аустеніту і цементиту, яка утворюється при температурі нижче 1147 °С; при температурі нижче 727 °С це суміш перліту і цементиту (ледебурит перетворений).

**ЛІКВАЦІЯ** — неоднорідність хімічного складу за об'ємом зливка, деталі, зерна, яка виникає при кристалізації металу:

**ЛІНІЯ ЛІКВІДУС** — лінія на діаграмі стану, яка показує температури початку кристалізації сплавів і є геометричним місцем точок ліквідус.

**ЛІНІЯ СОЛІДУС** — лінія на діаграмі стану, яка показує температури кінця кристалізації сплавів і є геометричним місцем точок солідус.

**МАГНІТОМ'ЯКІ МАТЕРІАЛИ** — матеріали, які легко намагнічуються в магнітному полі і легко розмагнічуються поза ним. Для них характерні низька коерцитивна сила і малі втрати на гістерезис. До магнітом'яких матеріалів відносяться пермалой, пермендюр, залізо армко, карбонільне і електролітичне залізо, електротехнічна сталь і ін.

**МАГНІТОТВЕРДІ МАТЕРІАЛИ** — матеріали, які важко намагнічуються в магнітному полі і важко розмагнічуються поза ним. З них виготовляють постійні магніти, що використовують в мікродвигунах і у вимірю-вальних приладах.

**МАКРОСКОПІЧНИЙ АНАЛІЗ** — вивчення будови металів і сплавів неозброєним оком чи при невеликому збільшенні (не більше 30 разів).

**МАКРОСТРУКТУРА** — будова металів і сплавів, яку видно неозброєним оком чи при невеликих збільшеннях (не більше 30 разів).

**МАКРОШЛІФ** — металевий зразок з плоскою шліфованою поверхнею, призначений для виявлення макро-структури.

**МАРТЕНСИТ** — пересичений твердий розчин вуглецю в  $\alpha$ -залізі.

**МАРТЕНСИТНЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ**—бездифузійне фазове перетворення аустеніту в мартенсит у залізобуглецевих сплавах, яке відбувається при різкому охолодженні з температури вище 727 °С.

**МІДНІ СПЛАВИ** — сплави на основі міді, їх поділяють на латуні, бронзи і міднонікелеві сплави.

**МІЖКРИСТАЛІТНА КОРОЗІЯ** — корозія металу по границях зерен, пов'язана зі зниженням в нержавіючій сталі корозійної стійкості границь зерен при утворенні карбідів хрому

**МІКРОСТРУКТУРА** — будова металів і сплавів, що вивчається при великих збільшеннях (більше, ніж в 30 разів).

**МІКРОШЛІФ** — взірець з плоскою полірованою поверхнею, підданий травленню розчином кислоти або лугу для виявлення мікроструктури.

**МІСЦЕВА КОРОЗІЯ** — корозія, яка вражає певні ділянки поверхні металів, може бути у вигляді корозії плямами, виразкової корозії, точкової і міжкристалітної.

**МОДИФІКАТОРИ** — речовини, що додають в невеликих кількостях в рідкі сплави з метою подрібнення або зміна форми структурних складових. Для алюмінієвих сплавів як модифікатори застосовують солі лужних металів, Ti, V, Nb, Zr, а також одночасно Ti і V. Магній застосовується в якості модифікатора при виплавці високоміцного чавуну.

**МОДИФІКОВАНИЙ ЧАВУН** — чавун з високими механічними властивостями, в якому графіт має кулясту форму. Його отримують введенням в розплав Mg, Ce, Ca, R3M, лігатур і комплексних модифікаторів.

**МОДИФІКУВАННЯ** — введення в рідкі метали і сплави спеціальних речовин (модифікаторів) для подрібнення структури і покращення властивостей.

**МОЗАЇЧНА СТРУКТУРА** — структура кристалу, що складається з дрібних ділянок (блоків) кристалічної ґратки різного орієнтування.

**МОНОКРИСТАЛ** — окремий кристал з однотипною кристалічною ґраткою, їх широко застосовують в радіо-техніці і радіоелектроніці.

**НАКЛЕП** — зміцнення металевих матеріалів під дією холодною пластичної деформації.

**НЕМЕТАЛІЧНІ ВКЛЮЧЕННЯ** — макро- і мікрочастинки в металах і сплавах (карбіди, оксиди, силікати, сульфідні, нітриди), які утворюються в металі в процесі виробництва. **НЕПОВНЕ ГАРТУВАННЯ** — гартування заевтектоїдних сталей, при якому нагрівання проводять вище температури  $A_{c1}$ , але нижче температури  $A_{c2}$ . Для отримання більш високої твердості за рахунок утворення надлишкового цементиту.

**НЕРЖАВІЮЧА СТАЛЬ** — сталь, стійка проти корозії в умовах впливу атмосфери і слабоагресивних середовищ.

**НІКЕЛЕВІ СПЛАВИ** — сплави на основі нікелю. Пластичні при високій температурі, піддаються прокатуванню, волочінню і штампуванню. В конструкційних, термоелектричних, магнітом'яких нікелевих сплавах поєднуються висока міцність і підвищена пластичність.



**НОРМАЛІЗАЦІЯ** — термічна обробка сталі або чавуну, яка полягає в нагріванні вище температури фазових перетворень, витримуванні і подальшому охолодженні на повітрі для отримання однорідної дрібнозернистої структури з вищими, порівняно з відпаленою сталлю міцністю і твердістю.

**ОКСИДУВАННЯ** — окиснення поверхневого шару металевих виробів з метою захисту від корозії. Для алюмінію застосовується електрохімічне оксидування (анодування).

**ПАРАМЕТР КРИСТАЛІЧНОЇ ГРАТКИ** — найменша відстань між атомами по ребру кристалічної решітки, вимірюється в ангстремах, нанометрах чи кілоіксах.

**ПЕРЕОХОЛОДЖЕННЯ** — охолодження речовини нижче температури її рівноважного переходу в інший фазовий стан (наприклад, нижче температури плавлення).

**ПЕРЛІТ** — евтектоїдна механічна суміш фериту і цементиту; одна зі структурних складових сплавів заліза з вуглецем.

**ПЛАКУВАННЯ** — покриття поверхні одного металу шаром іншого з подальшою прокаткою з метою зміни фізико-хімічних властивостей поверхні. Наприклад, плакування сплавів алюмінію застосовується для створення антикорозійного шару алюмінію на листах.

**ПЛАСТИЧНА ДЕФОРМАЦІЯ** — деформація, яка залишається в матеріалі після припинення дії сили.

**ПЛАСТИЧНІСТЬ** — здатність твердих тіл змінювати свою форму без руйнування під дією зовнішніх сил.

**ПОВЗУЧІСТЬ** — пластична деформація матеріалу з часом під дією постійних напружень, менших, ніж границя текучості.

**ПОВНЕ ГАРТУВАННЯ** — гартування доевтектоїдних сталей з нагріванням до температури вище критичних точок  $A_{c3}; A_{c3+}$  ( $30^{\circ}$ — $50^{\circ}$ ).

**ПРОГАРТОВУВАНІСТЬ** — здатність сталі сприймати гартування на певну глибину. Глибина прогартуваності – це зона з напівмартенситною структурою.

**ПРУЖНА ДЕФОРМАЦІЯ** — деформація, що зникає після зняття навантаження, яке її викликає.

**ПРУЖНІСТЬ** — властивість матеріалів відновлювати свою форму і об'єм після припинення дії внутрішніх сил.

**РАФІНУВАННЯ** — вилучення шкідливих домішок з металів і сплавів. Електрохімічне рафінування використовується для алюмінію, міді, нікелю, цинку, натрію, свинцю, золота, срібла і інших кольорових металів.

**РЕКРИСТАЛІЗАЦІЙНИЙ ВІДПАЛ** — нагрівання холоднодеформованого металу вище температури рекристалізації з метою виправлення структури і зняття наклепу.

**РЕКРИСТАЛІЗАЦІЯ** — відновлення структури і властивостей холоднодеформованого металу при нагріванні до температури рекристалізації.

**РІДКОТЕКУЧІСТЬ** — здатність розплавленого металу заповнювати ливарну форму.

**РОЗКИСНЕННЯ** — виведення з розплавлених металів (головним чином сталі, а також деяких інших сплавів) розчиненого в них кисню.

**РОЗЧИННІСТЬ** — властивість речовини утворювати розчини змінного складу з іншими речовинами (розчинниками).

**СІРИЙ ЧАВУН** — чавун, в якому вільний вуглець знаходиться у вигляді графіту пластинчастої форми. З нього виготовляють станини, шестерні, шківни, корпусні деталі середньої міцності, поршневі кільця і інші вироби.

**СПЕЦІАЛЬНІ КАРБІДИ** — карбіди, що утворилися карбідоутворюючими елементами (W, Cr, Ti, V), крім заліза.

**СПЛАВ** — речовина, отримана сплавленням, або іншими методами, двох або більше елементів.

**СТАЛЬ** — сплав заліза з вуглецем, що містить менше 2,14 % C з домішками інших елементів.

**СТАЛЬ З ОСОБЛИВИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ** — легована сталь зі спеціальними фізико-хімічними властивостями: кислотостійка, нержавіюча, жароміцна, електротехнічна і жаростійка сталі, а також сталь для постійних магнітів. Для цих сталей характерний низький вміст вуглецю і високий ступінь легування.

**СТАРІННЯ СПЛАВІВ** — процес розпаду перенасичених твердих розчинів, отриманих після гартування, який відбувається без нагрівання чи при невеликому нагріванні.

**СТРУКТУРА** — внутрішня будова матеріалу (металу, сплаву), що вивчається неозброєним оком чи за допомогою спеціальних приладів (оптичних, електронних, рентгенівських і ін.).

**СУЦІЛЬНА КОРОЗІЯ** — корозія, яка охопила всю поверхню металу. Суцільну корозію поділяють на рівномірну і нерівномірну залежно від глибини руйнування на різних ділянках.

**ТВЕРДІСТЬ** — опір матеріалу проникненню в нього іншого, більш твердого тіла. Твердість за Роквелом вимірюється в умовних одиницях, за Вікерсом і Брінелем в МПа.

**ТЕПЛОСТІЙКІСТЬ** — здатність інструментальної швидкорізальної сталі зберігати високу твердість (структуру мартенситу) при нагріванні до температури 550—600 °C.

**ТИТАНОВІ СПЛАВИ** — сплави на основі титану, що мають низьку питому густину, високі міцність і корозійну стійкість. Їх застосовують як конструкційні матеріали в авіації, машинобудуванні, медицині тощо.

**ТРАВЛЕННЯ** — хімічна і електрохімічна обробка поверхні металів, що застосовують для очищення від окалини, для отримання потрібного вигляду поверхні металевих напівфабрикатів, при лудінні і паянні, а також для мікроструктурних досліджень.

**ТРИВАЛА МІЦНІСТЬ** — здатність матеріалу чинити опір руйнуванню при тривалому впливі статичного навантаження і високої температури. Характеристикою тривалої міцності є напруження, що викликає руйнування при даній температурі за даний відрізок часу (границя тривалої міцності).

**ТРИЩИННИ** — порушення суцільності матеріалу або виробу в результаті часткового відриву однієї частини від іншої.

**УДАРНА В'ЯЗКІСТЬ** — властивість матеріалу чинити опір руйнуванню при ударному навантаженні (КС, вимірюють вМДж/м<sup>2</sup>). Для позначення ударної в'язкості додають третю букву, що вказує на вид надрізу на взірці: U, V, T (КСU означає ударну в'язкість взірця з (U -подібним надрізом, КСV з V-подібним, КСТ із тріщиною).

**УСАДКОВІ (УСАДОЧНІ) РАКОВИНИ** — дефекти (пустоти) в зливках і виливках, що утворюються в результаті зменшення об'єму металу при переході з рідкого стану в твердий.

**ФЕРИТ** — твердий розчин вуглецю і легуючих елементів в  $\alpha$ -залізі. Вміст вуглецю у низькотемпературному фериті не перевищує 0,02%.

**ХІМІЧНА КОРОЗІЯ** — самочинне руйнування металу внаслідок хімічної взаємодії з сухими газами або рідкими неелектролітами (нафтою, бензином, гасом, і ін.).

**ХОЛОДНОЛАМКІСТЬ** — різке зниження в'язкості і пластичності матеріалу з пониженням температури.

**ХРОМУВАННЯ** — дифузійне насичення поверхні металу хромом з метою підвищення поверхневої твердості, зносостійкості, корозійної стійкості і окалинотійкості. При хромуванні середньовуглецева сталь набуває високої твердості і зносостійкості.

**ЦЕМЕНТАЦІЯ** — насичення поверхневого шару сталі вуглецем з метою підвищення поверхневої твердості, зносостійкості і границі витривалості.

**ЦЕМЕНТИТ** — хімічна сполука заліза з вуглецем ( $Fe_3C$ ). Має високу твердість і низьку пластичність.

**ЦАНУВАННЯ** — одночасне насичення поверхневого шару сталі вуглецем і азотом з метою підвищення її поверхневої твердості, зносостійкості і границі витривалості. Його здійснюють у твердих, рідких і газоподібних середовищах.

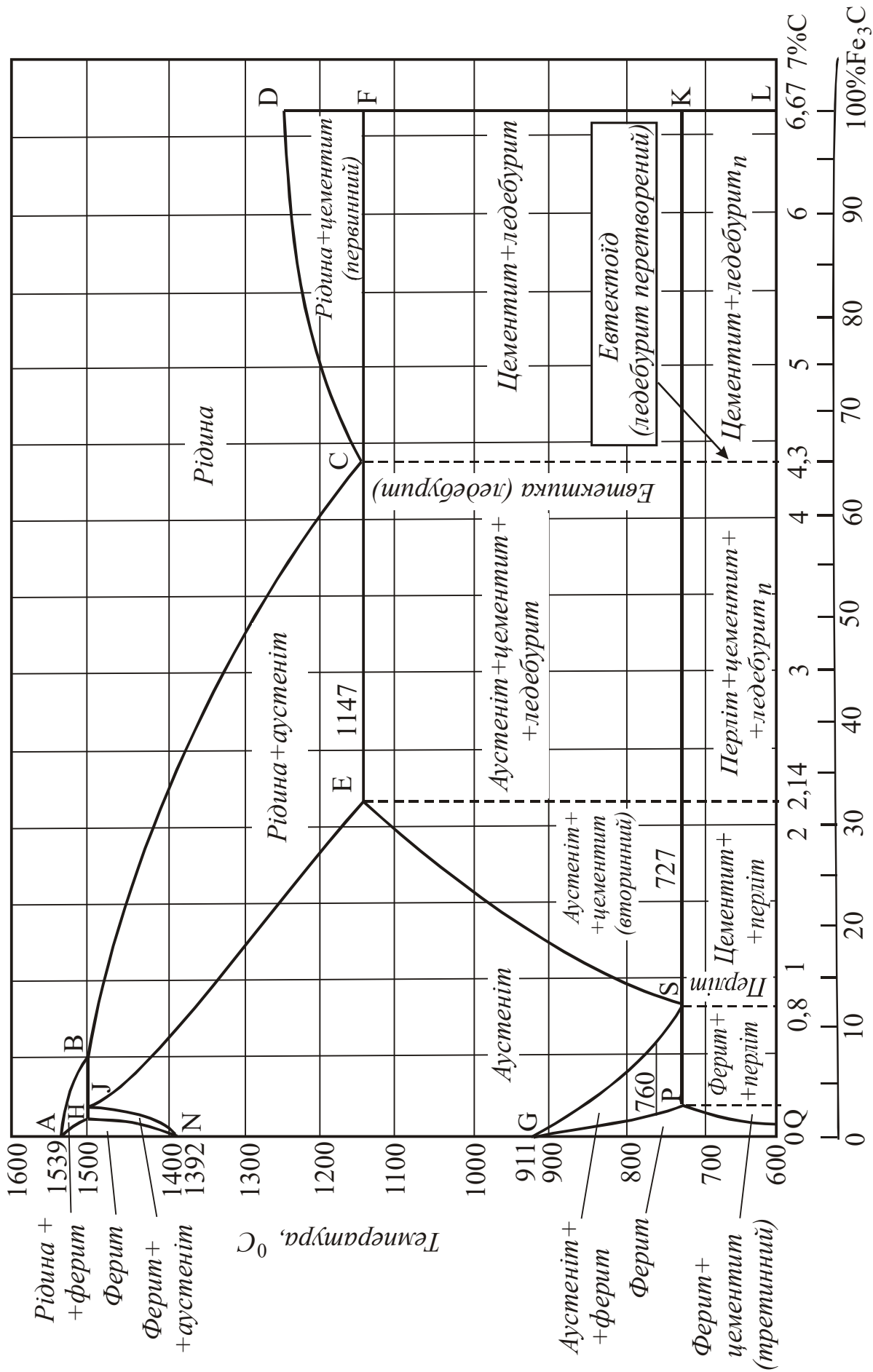
**ЧАВУН** — сплав заліза з вуглецем, що містить понад 2,14 % вуглецю і підвищену кількість домішок.

**ЧЕРВОНОЛАМКІСТЬ** — різке зниження пластичності сплавів при температурі гарячої обробки тиском у результаті оплавлення домішок.

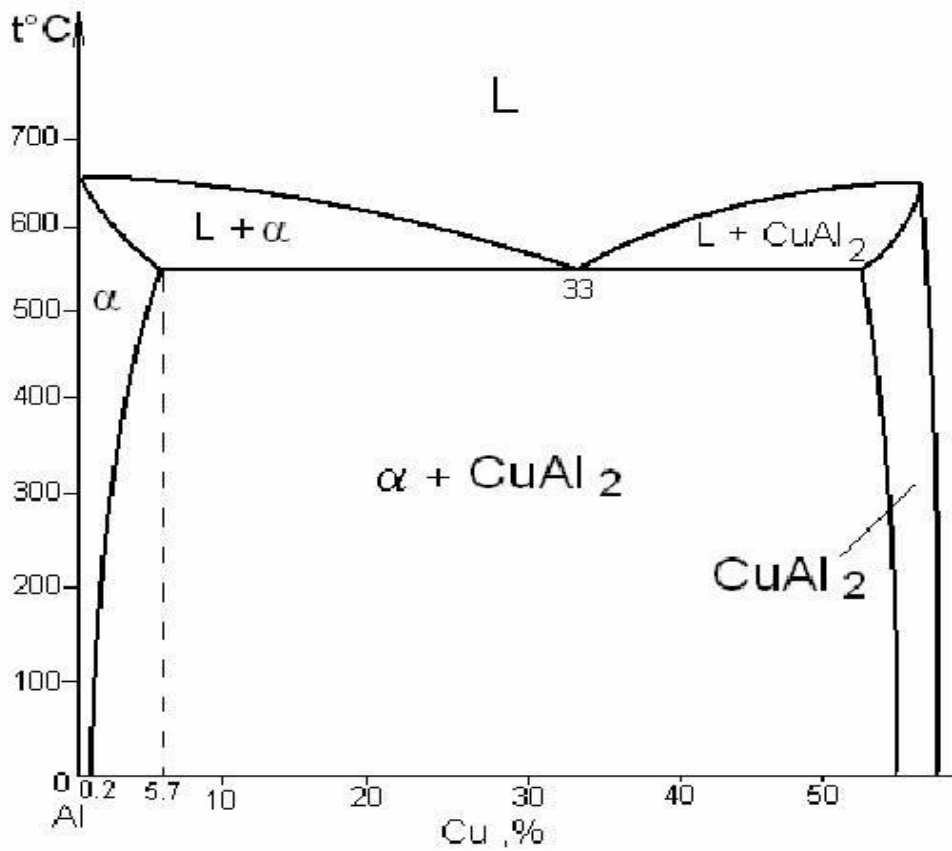
**ШВИДКОРІЗАЛЬНА СТАЛЬ** — високолегована вольфрамом, хромом, молібденом, ванадієм, кобальтом інструментальна сталь. Для отримання високої теплостійкості інструмент із швидкорізальної сталі піддають спеціальній термічній обробці: гартуванню від температури 1240—1280 °С і трьохкратному відпуску при температурі 560—600 °С.

## **ДОДАТКИ**

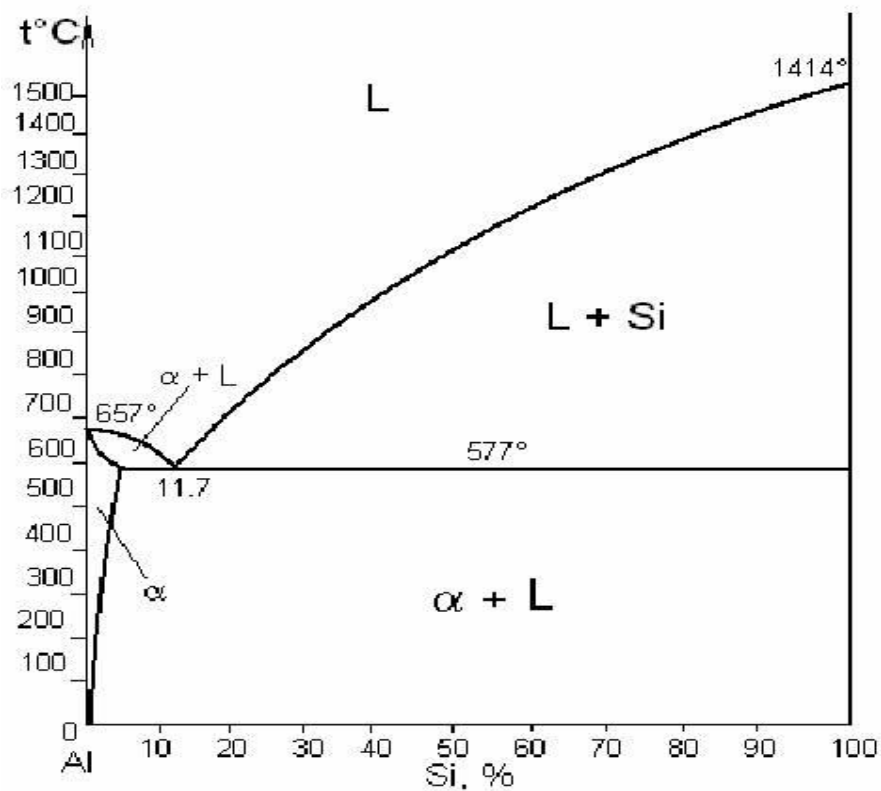
**Діаграми фазового стану найбільш  
використовуваних сплавів**



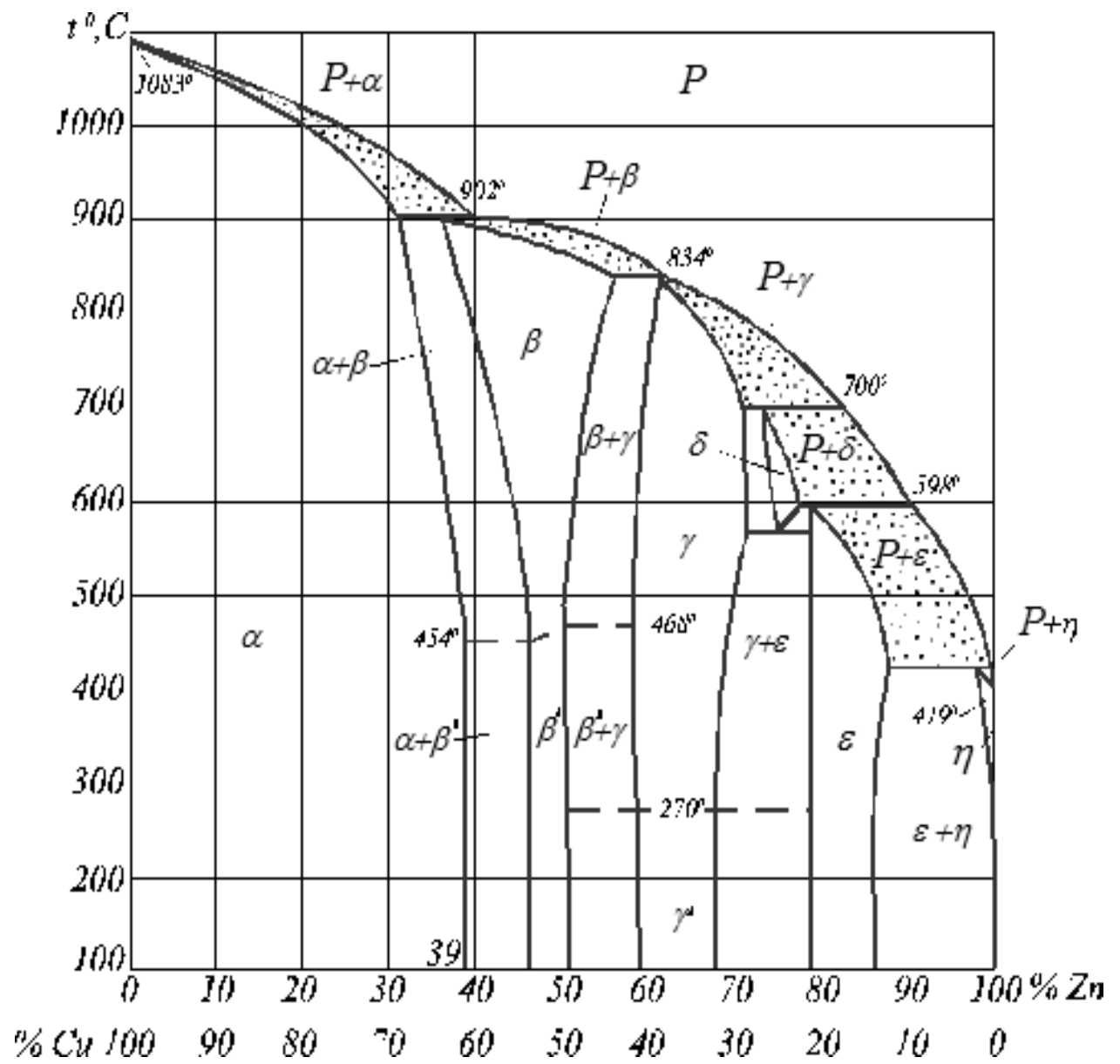
Діаграма фазового стану Fe-Fe<sub>3</sub>C



Діаграма фазового стану Al-Cu

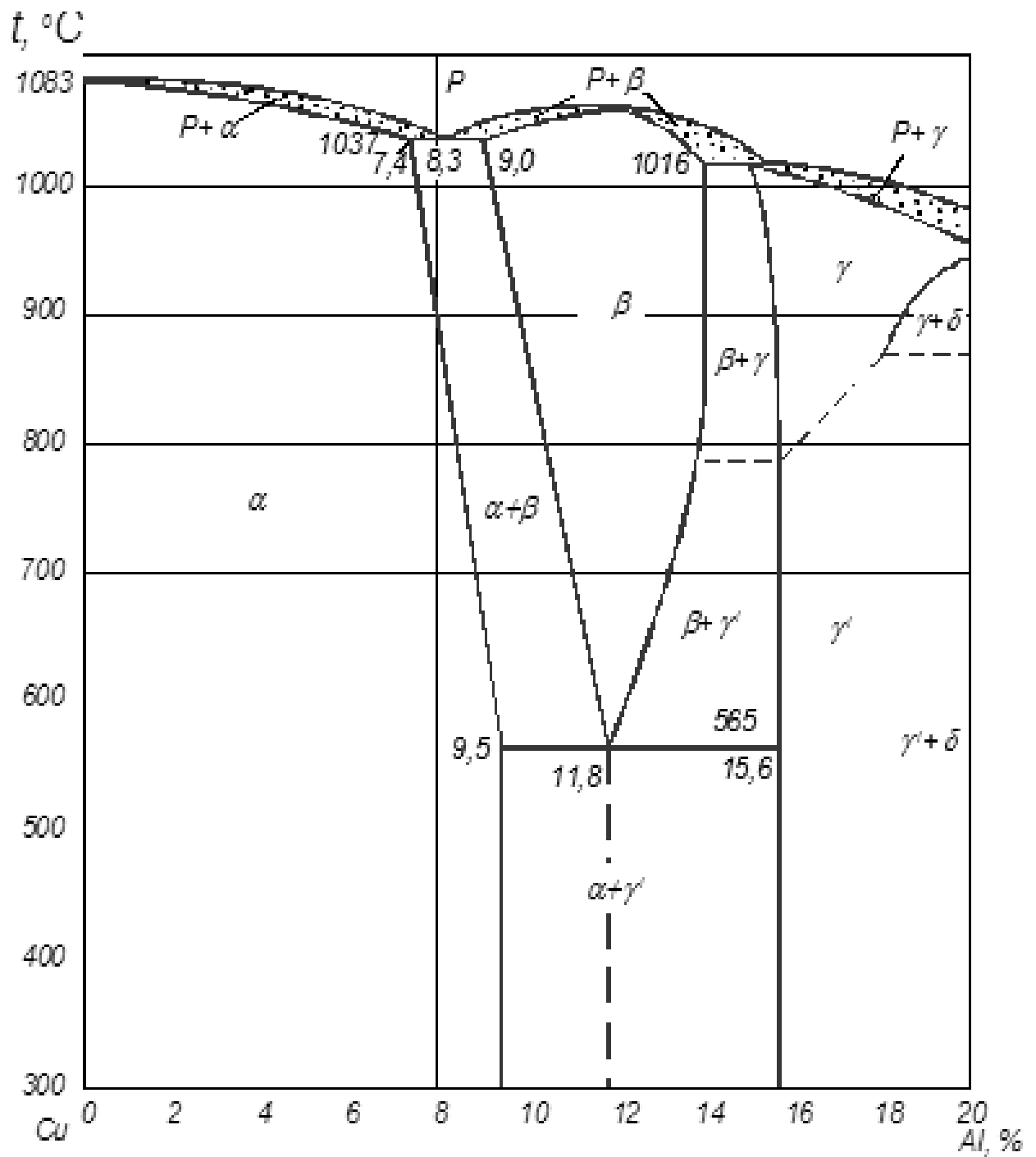


Діаграма фазового стану Al-Si

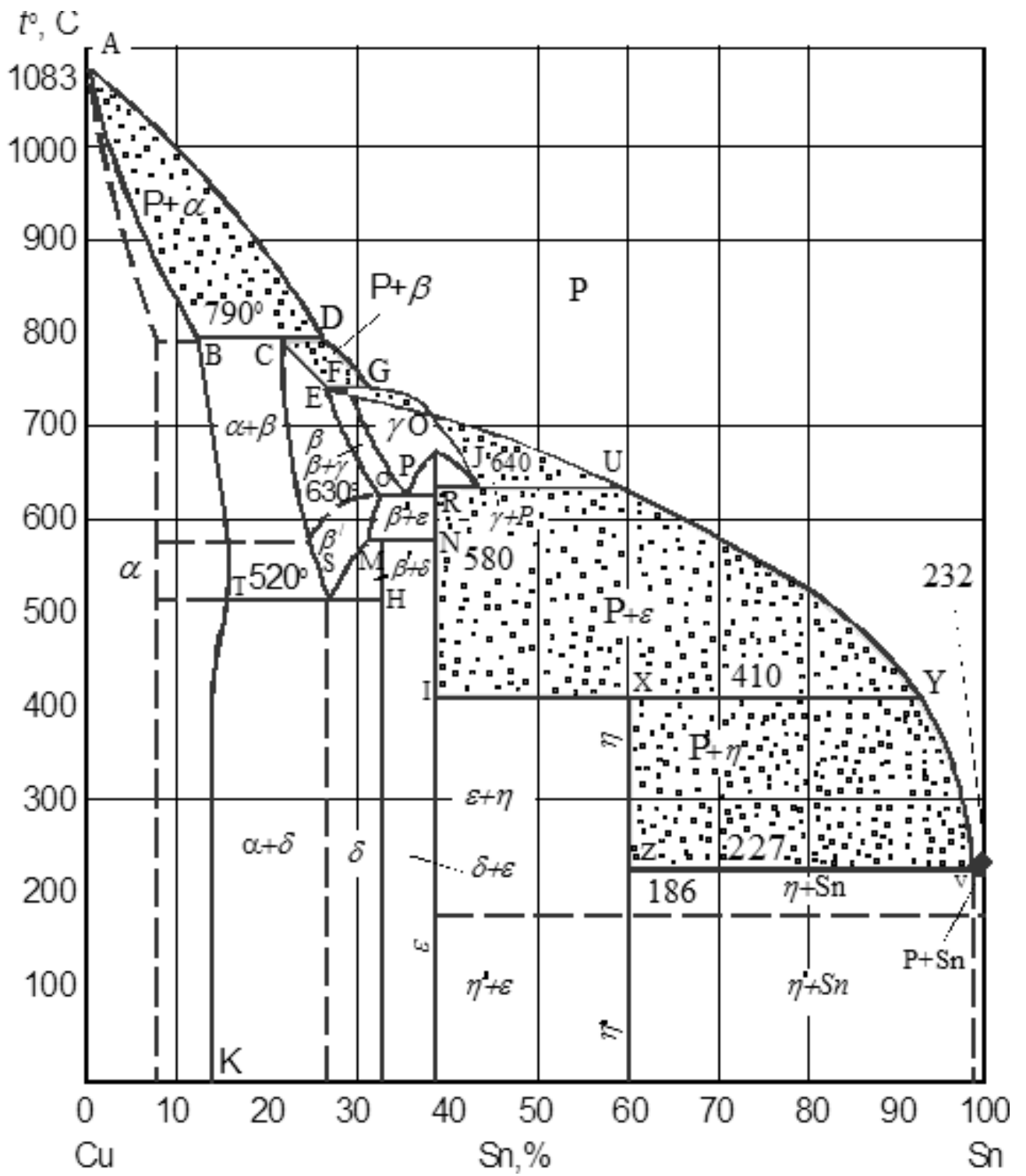


Діаграма фазового стану Cu-Zn

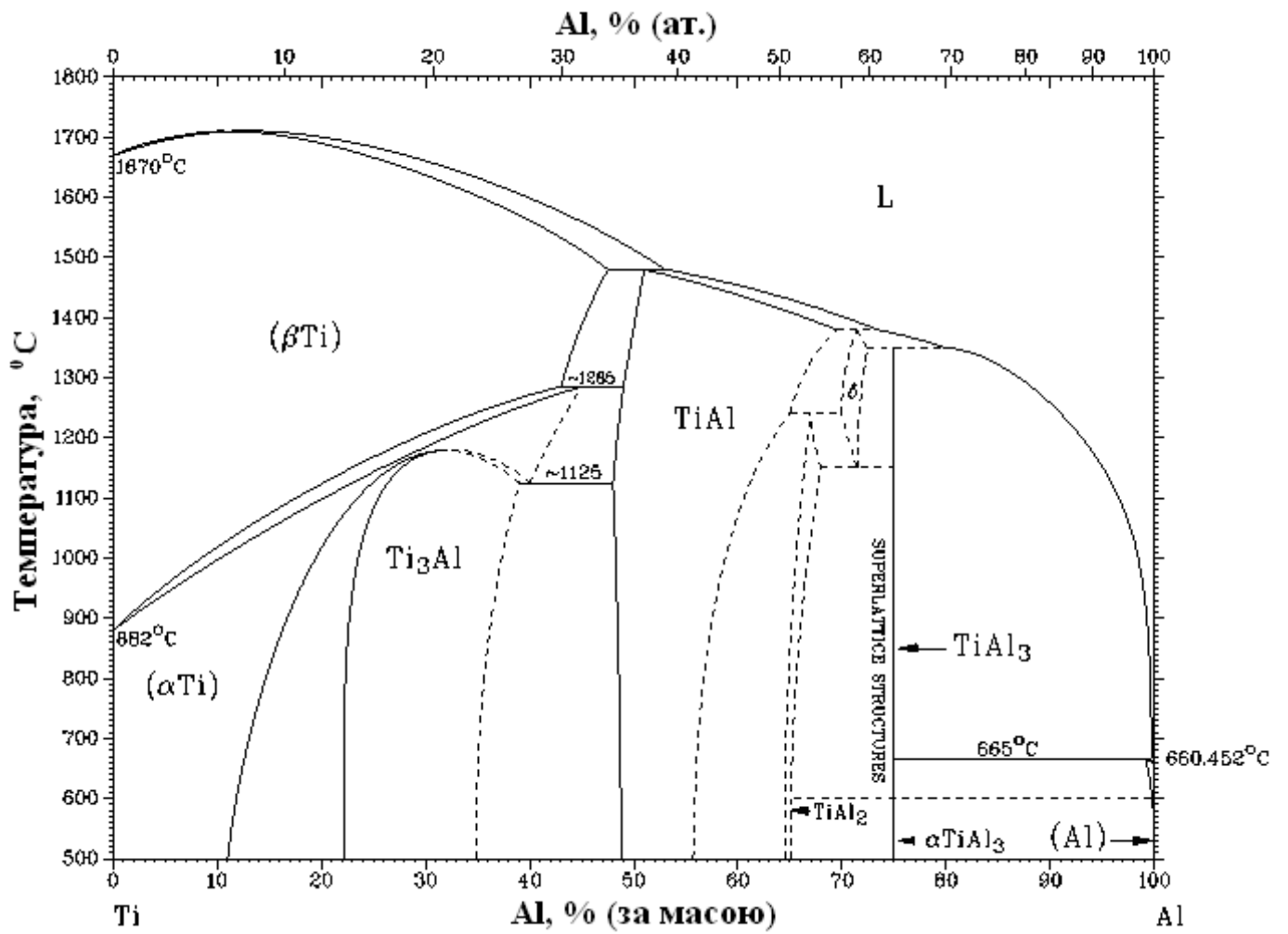




Діаграма фазового стану Cu-Al



Діаграма фазового стану Cu-Sn



Діаграма фазового стану Ti-Al

## **Властивості та характеристики сплавів**

**Механічні властивості та використання  
вуглецевої сталі звичайної якості групи А**

**Таблиця 1**

<b>Марка сталі</b>	<b><math>\sigma_{в'}</math> МПа</b>	<b><math>\sigma_{т'}</math> МПа</b>	<b><math>\delta</math>, %</b>	<b>Використання</b>
Ст0	Не менше 300	—	23	Невідповідальні будівельні конструкції, прокладки, шайби, кожухи. Зварюваність хороша.
Ст1кп	300-390	—	35	Малонавантажені деталі металоконструкцій - заклепки, шайби, шплінти, прокладки, кожухи. Зварюваність хороша.
Ст1пс, Ст1сп	310-410	—	34	
Ст2кп Ст2пс, Ст2сп	320-410 330-430	215 225	33 32	Деталі металоконструкцій - рами, осі, ключі, валики, цементовані деталі. Зварюваність хороша.
Ст3кп Ст3пс, Ст3сп Ст3Гпс Ст3Гсп	360-460 370-480 370-490 390-570	235 245 245 —	27 26 26 —	Рами візків, деталі для цементациі й ціанування, від яких вимагається висока твердість поверхні і невисока міцність серцевини, гаки кранів, кільця, циліндри, шатуни, кришки.
Ст4кп Ст4пс, Ст4сп	400-510 410-530	255 265	25 24	Вали, осі, тяги, пальці, крюки, болти, гайки, деталі при невисоких вимогах до міцності.
Ст5пс, Ст5сп Ст5Гпс	490-630 540-590	285 285	20 20	Вали, осі, зірки, зубчаті колеса, шатуни, деталі при підвищених вимогах до міцності.
Ст6пс Ст6сп	Не менше 590 (60)	315	15	Вали, осі, бойки молотів, шпинделі, муфти кулачкові й фрикційні, ланцюги, деталі з високою міцністю.

**Механічні, фізичні і технологічні властивості  
якісних вуглецевих конструкційних сталей**

**Таблиця 2**

Марка	Механічні властивості					Фізичні властивості			Технологічні властивості			
	$\sigma_T$	$\sigma_B$	$\delta$ , %	$a_H$ , Дж/ см <sup>2</sup>	НВ	$\nu$ ,	$\lambda$ ,	$\alpha \cdot 10^6$ ,	Оброблюваність різанням	Зварюваність	Інтервал температур кування, °С	Пластичність при холодній обробці
	МПа					г/см <sup>3</sup>	Вт/(м*°С)	1/°С				
08	196	324	33	-	126 <sup>*1</sup>	7,83	811	11,6	П	В	800-1300	В
10	206	321	31	-	140 <sup>*1</sup>	7,83	811	11,6	П	В	800-1300	В
15	225	373	27	-	145 <sup>*1</sup>	7,82	770	11,9	П	В	800-1250	В
20	245	412	25	-	159 <sup>*1</sup>	7,82	770	11,1	П	В	800-1280	П
25	274	451	23	88	166 <sup>*1</sup>	7,82	732	11,1	П	В	800-1280	П
30	294	490	21	78	175 <sup>*1</sup>	7,817	732	12,6	П	П	800-1250	П
35	314	529	20	69	203 <sup>*1</sup>	7,817	732	11,1	П	П	800-1250	П
40	321	568	19	59	183 <sup>*2</sup>	7,815	596	12,4	П	П	800-1250	П
45	363	598	16	49	193 <sup>*2</sup>	7,814	680	11,7	П	П	800-1250	П
50	373	627	14	38	203 <sup>*2</sup>	7,811	680	12,0	П	П	800-1250	П
55	382	647	13	-	212 <sup>*2</sup>	7,82	680	11,0	П	Н	800-1250	Н
60	402	676	12	-	224 <sup>*2</sup>	7,80	680	11,1	П	Н	800-1240	Н

**Примітки:** \*1 Для гарячовальцьованої сталі.

\*2 Для відпаленої сталі. В – висока; П – помірна; Н – низька.

**Рекомендації до використання вуглецевих якісних конструкційних сталей**  
**Таблиця 3**

<b>Марка</b>	<b>Призначення</b>
08кп, 10	Деталі, отримані холодною обробкою тиском, трубки, прокладки, ковпачки. Цементовані й ціановані деталі з невисокою міцністю серцевини (втулки, валики, копіри, зубчасті колеса, фрикційні диски)
15, 20	Малонавантажені деталі (валики, пальці, упори, копіри, осі, шестерні). Тонкі деталі, які працюють на стирання, важелі, гачки, траверси, вкладки, болти, стяжки й ін.
30, 35	Деталі, які зазнають невеликих напружень (осі, шпинделі, зірочки, тяги, траверси, важелі, диски, вали)
40, 45	Деталі, від яких вимагається підвищена міцність (колінчасті вали, шатуни, зубчасті вінці, розподільні вали, зубчасті колеса, шпильки, храповики, плунжери, шпинделі, фрикційні диски, осі, муфти)
50, 55	Зубчасті колеса, вальці, штоки, бандажі, вали, ексцентрики, малонавантажені пружини, ресори й ін. Застосовують після гартування з високим відпуском і в нормалізованому стані
60, 65	Деталі з високими міцністю і пружністю (вальці, шпинделі, пружинні кільця, пружини й диски зчеплення, пружини амортизаторів). Застосовують після гартування або після нормалізації (великі деталі)

Таблиця 4

Елемент	Символ	Позначення елементів у марках металів та сплавів		Елемент	Символ	Позначення елементів у марках металів та сплавів	
		чорних	кольорових			чорних	кольорових
Азот	N	А	—	Молибден	Mo	М	—
Алюміній	Al	Ю	А	Нікель	Ni	Н	Н
Берилій	Be	Л	—	Ніобій	Nb	Б	Нп
Бор	B	Р	—	Олово	Sn	—	О
Ванадій	V	Ф	Вам	Платина	Pt	—	Пл
Вольфрам	W	В	—	Ртуть	Hg	—	Р
Вуглець	C	У	—	Свинець	Pb	—	С
Германій	Ge	—	Г	Селен	Se	Е	СТ
Залізо	Fe	—	З	Срібло	Ag	—	Ср
Золото	Au	—	Зл	Сурма	Sb	—	Су
Індій	In	—	Ін	Талій	Tl	—	Тл
Кадмій	Cd	Кд	Кд	Тантал	Ta	—	ТТ
Кобальт	Co	К	К	Телур	Te	—	Т
Кремній	Si	С	Кр(К)	Титан	Ti	Т	ТПД
Літій	Li	—	Ле	Фосфор	P	П	Ф
Магній	Mg	Ш	Мг	Хром	Cr	Х	Х(Хр)
Марганець	Mn	Г	Мц	Цинк	Zn	—	Ц
Мідь	Cu	Д	М	Цирконій	Zr	Ц	ЦЕВ

**Рекомендоване використання легованих конструкційних сталей**



Таблиця 5

Марка	Призначення
15X	Пальці поршневі, вали розподільчі, штовхачі, хрестовини карданів, клапани, дрібні деталі, що працюють в умовах зношування тертям. Добре цементується
20X	Кулачкові муфти, втулки, шпинделі, направляючі планки, плунжери, оправки, копіри, шліцеві валики, та ін.
40X	Деталі, що працюють на середніх швидкостях при середніх тисках (зубчасті колеса, шпинделі і вали в підшипниках кочення, черв'ячні вали)
45X, 50X	Великі деталі, що працюють на середніх швидкостях при невеликих тисках (зубчаті колеса, шпинделі, вали в підшипниках кочення, черв'ячні і шліцеві вали). Мають високу міцність і в'язкість
38XA	Зубчасті колеса, що працюють на середніх швидкостях при середніх тисках
45Г2, 50Г2	Великі малонавантажені деталі (шпинделі, вали, зубчасті колеса важких верстатів)
18ХГТ	Деталі, що працюють на великих швидкостях при високих тисках і ударних навантаженнях (зубчаті колеса, шпинделі, кулачкові муфти, втулки і ін.)
20ХГР	Важко навантажені деталі, що працюють при великих швидкостях і ударних навантаженнях
15ХФ	Невеликі деталі, що піддаються цементациї й гартуванню з низьким відпуском (зубчасті колеса, поршневі пальці й ін.)
40ХС	Дрібні деталі високої міцності
40ХФА 30ХГС	Відповідальні високоміцні деталі, які гартують і виконують високий відпуск; для середніх і дрібних деталей складної конфігурації, що працюють в умовах зношування (важелі, штовхачі); для відповідальних зварних конструкцій, що працюють при знакозмінних навантаженнях
35ХМ	Вали, деталі турбін і кріпильні деталі, що працюють при підвищеній температурі
45ХН, 50ХН	Аналогічно застосуванню сталі 40Х, але для деталей більших розмірів

## Основні властивості сірих звичайних чавунів та їх застосування

**Таблиця 6**

<b>Марка</b>	<b><math>\sigma_{згин}</math>, МПа</b>	<b>НВ</b>	<b>Примітка</b>
СЧ 10	28	143-229	Маловідповідальні виливки з товщиною стінок до 15 мм (корпуси, кришки, кожухи та ін.)
СЧ 15	32	163-229	Маловідповідальні виливки з товщиною стінок 10-30 мм (труби, корпуси клапанів, вентилі при тиску до 20 МПа та ін.)
СЧ 18	36	170-229	Відповідальні виливки з товщиною стінок 10-20 мм (шків, зубчасті колеса, станини, супорти та ін.)
СЧ 20	40	170-241	Відповідальні виливки з товщиною стінок до 30мм (блоки циліндрів, поршні, гальмівні барабани, каретки та ін.)
СЧ 25	46	180-250	Відповідальні виливки з товщиною стінок до 40 мм (кокільні форми, поршневі кільця та ін.)
СЧ 30	50	181-255	Відповідальні виливки з товщиною стінок до 60 мм (поршні, гільзи дизелів, рами, штампи та ін.)
СЧ 35	55	197-269	Відповідальні високонавантажені виливки з товщиною стінок до 100 мм (малі колінчасті вали, деталі парових двигунів та ін.)
СЧ40 СЧ45	60 65	207-285 229-289	Найвідповідальніші важконавантажені виливки з масивними стінками (великогабаритні колінчасті вали, зубчасті колеса, клапани тощо)

## Твердість ковких чавунів і їх застосування

**Таблиця 7**

<b>Марка</b>	<b>НВ</b>	<b>Примітка</b>
КЧ 30-6	163	В основному для невеликих виливок, які працюватимуть за умов динамічних навантажень (деталі в автомобільній, тракторній і сільськогосподарській промисло-вості). Обмежене застосування зумовлене складністю виготовлення виливок, тривалістю термічної обробки, обмеженими допустимими розмірами перерізів (не більше 30...40 мм)
КЧ 33-8	163	
КЧ 35-10	163	
КЧ 45-7	207	
КЧ 50-5	230	
КЧ 55-4	241	
КЧ 60-3	269	
КЧ 65-3	269	
КЧ 70-2	280	

**Властивості й призначення латуней**

**Таблиця 8**

Марка	Властивості				Призначення
	$\sigma_B^{*1}$ , МПа	НВ <sup>*2</sup>	KCV, кДж/м <sup>2</sup>	$\lambda$ , Вт/(м <sup>2</sup> С)	
<b>Подвійні деформівні латуні</b>					
Л96	235	59,0	22	243	Радіаторні і капілярні труби
Л90	275	59,0	18	180	Деталі машин, приладів
Л85	295	60,8	-	151	теплотехнічної і хімічної
Л80	343	64,0	16	144	апаратури, змійовики, сильфони й ін.
Л70	343	64,0	16	124	Гільзи хімічної апаратури
Л63	441	67,0	-	108	Гайки, болти, деталі автомобілів, конденсаторні труби
<b>Багатокомпонентні деформівні латуні</b>					
ЛА77-2	441	54,0	20	116	Конденсаторні труби морських суден
ЛАЖ60-1-1	441	54,0	-	75	Деталі морських суден
ЛЖМц59-1-1	470	93,5	12,0	101	Вкладки підшипників, деталі літаків, морських суден
ЛН65-5	441	64,0	-	59	Манометричні і конденсаторні трубки
ЛМцА57-36- 1	490	93,5	13,5	67	Деталі морських і річкових суден
ЛО90-1	302	60,0	7,5	126	Конденсаторні труби теплотехніч- ної апаратури
ЛО60-1	441	80,4	7,5	108	Конденсаторні труби теплотехніч- ної апаратури
ЛС63-3	392	54,0	-	118	Деталі годинників, втулки
ЛЖС58-1-1	441	83,5	-	108	Деталі, виготовлені різанням
ЛК80-3	393	103,0	12-16	88	Корозійностійкі деталі
<b>Ливарні латуні</b>					
ЛЦ16К4	294	98,0	12,0	84	Деталі арматури
ЛЦ30А3	294	78,5	8-10	114	Корозійностійкі деталі
ЛЦ40МцЗЖ	441	89,1	3,5	101	Деталі відповідально-го призначення, що працюють при темпе-ратурі до 300°С
ЛЦ25С	146	58,8	-	114	Штуцери гідроси-стеми автомобілів
*1 Деформівні латуні в м'якому стані					
*2 Після деформації з обтисканням до 50% і старіння при 350°С					

**Властивості й призначення бронз**

**Таблиця 9**

Марка	НВ	$\delta$ , %	$\sigma_v$ , МПа	Призначення
<b>Олов'яні деформівні бронзи</b>				
БрОФ8,0-0,3 <sup>*1</sup>	88,4-98,0	55-65	392-490	Сітки папероробних машин
БрОФ6,5-0,4 <sup>*1</sup>	68,6-88,4	60-70	343-442	Пружини, деталі машин
БрОФ6,5-0,15 <sup>*1</sup>	54,0-68,6	45-50	295-372	Пружини, втулки, вкладки підшипників
БрОФ4-0,25 <sup>*1</sup>	54,0-68,6	45-58	295-372	Трубки манометрів
БрОЦС4-4-4	-	30-40	314-354	Втулки і прокладки автомобілів і тракторів
<b>Безолов'яні деформівні бронзи</b>				
БрА7 <sup>*1</sup>	63,8-73,5	65-75	432-490	Пружини, мембрани, сильфони
БрБ2 <sup>*1</sup>	127,6-147,0	40-50	392-588	Пружини, пружні елементи
БрБНТ1,9 <sup>*1</sup>	117,8-137,5	30-50	392-588	Те ж
БрКН1-3	78,6-98,0	25-30	392-442	Антифрикційні деталі баки, резервуари
БрКД1 <sup>*1</sup>	49,0-68,6	35-45	256-332	Колектори, тролейбусні провідники
<b>Ливарні олов'яні бронзи</b>				
БрОЗЦ12С5	58,8	5	206	Арматура загального призначення
БрОЗЦ6С5Н1	58,8	8	206	Деталі, що працюють в олії, парі й прісній воді
БрО4Ц7С5	58,8	5	176	Арматура, антифрикційні деталі
<b>Ливарні безолов'яні бронзи</b>				
БрА9Мц2Л <sup>*1</sup>	88,2	18-22	392	Алюмінієві бронзи
БрА10Мц2Л <sup>*1</sup>	117,8	10-14	490	застосовуються для виготовлення фасонних
БрА9ЖЗЛ <sup>*1</sup>	107,9	8-14	490	виливків підшипників, втулок
БрА10ЖЗМц2	127,6	10-14	490	Арматура, антифрикційні деталі
БрА10Ж4Н4Л <sup>*1</sup>	166,6	6	588	Деталі хімічної і харчової промисловості
БрС30	24,5	4	5,8	Антифрикційні деталі
* <sup>1</sup> Бронзи незадовільно оброблюються різанням.				
<b>Примітка.</b> Властивості деформівних бронз приведені для відпаленого стану.				

**Властивості й режими термічної обробки ресорно-пружинних сталей**

**Таблиця 10**

Марка сталі	Режим термічної обробки			Механічні властивості			
	Темпера - тура гартування °С	Гарту- вальне середо- вище	Темпера- тура відпуску °С	$\sigma_T$	$\sigma_B$	$\delta$	$\psi$
				МПа		%	
65	830	Масло	470	785	981	10	35
70	830	»	470	834	1030	9	30
80	820	»	470	932	1079	8	30
65Г	830	»	470	785	981	8	30
70Г	830	»	470	834	1030	7	25
55С2, 55С2А	870	Масло або вода	470	1177	1275	6	30
60С2	870	Масло	470	1177	1275	6	25
70С3А	850	»	470	1471	1668	6	25
55ХГР	850	»	470	1177	1275	7	35
60С2А	870	Масло	420	1373	1570	6	20

### Рекомендоване використання ресорно-пружинної сталі

Таблиця 11

Марка	Призначення
60С2, 60С2А	Для ресор із смугової сталі товщиною 3-16 мм і пружинної стрічки товщиною 0,08-3 мм; для накручених пружин з дроту діаметром 3-16 мм. Обробляються різанням погано. Максимальна температура експлуатації 250 °С.
50ХФА, 50ХГФА	Для відповідальних пружин і ресор, які працюють при підвищеній температурі (до 300 °С); для пружин, які піддаються циклічним змінним навантаженням.
60С2ХА	Для великих високонавантажених пружин і ресор відповідального призначення.

**Примітки:** 1. Хромонікелеві і кремнійнікелеві сталі менше схильні до обезвуглецьовування. Найкраще поєднання технологічних і експлуатаційних властивостей має сталь 60С2Н2А.

2. Корозійна стійкість всіх сталей низька.

### Механічні характеристики алюмінієвих сплавів

Таблиця 12

Матеріал	$\sigma_{\text{в}}$ , МПа	$\delta$ , %
АМц 2	130	20
АМг2	190	23
АМг6	340	20
Д1	400	20
Д16	440	18
АК6	360	7
В95	540	10
АЛ2	200	5
АЛ9	220	6
АЛ32	270	3

### Механічні властивості титанових сплавів

Таблиця 13

Марка	$\sigma_{\text{в}}$ , МПа	$\delta$ , %	$\alpha_{\text{т}}$ , кДж/м <sup>2</sup>	Марка	$\sigma_{\text{в}}$ , МПа	$\delta$ , %	$\alpha_{\text{т}}$ , кДж/м <sup>2</sup>
<b>Ливарні</b>				<b>Деформівні</b>			
ВТ1Л	343	10	4	ВТ1-0	373	20-25	—
ВТ5Л	686	6	3	ВТ3-1	1130	10-16	3-6
ВТ3-1Л	935	4	2.5	ВТ4	686	10-20	—
ВТ6Л	836	5	2.5	ВТ5	935	12-25	3-6
ВТ9Л	935	4	2	ВТ6С	980	8-13	—
ВТ14Л	884	5	2.5	ВТ14	1100	4-8	—

### Властивості конструкційних композиційних матеріалів

Таблиця 14

Матеріал	Густина, г/см <sup>3</sup>	$\sigma_{\text{в}}$	Е
		МПа	
Волокно бору на алюмінієвій зв'язці	2,6	1000...1200	240 000
Вуглецеве волокно на алюмінієвій зв'язці	2,35	750	150 000
Волокно бору на магнієвій зв'язці	2,0	1000	220 000
Волокно карбиду кремнію на титановій зв'язці	4,0	900	210 000
Вольфрам на нікелевій зв'язці	12,5	800	4 650 000
Волокно молібдену на нікелевій зв'язці	9,3	700	235 000
Дисперсні частинки двооксиду гафнію на нікелевій зв'язці	9,0	500 – 550	140 000

### Склад та властивості жаростійких сталей

Таблиця 15

Марка сталі	Окалиностійкість, °С	Вміст елементів, %					
		С	Si	Mn	Cr	Ni	інші
		не більше					
12X17	900	0,12	0,8	0,8	16-18	-	-
15X25Т	1050	0,15	1,0	0,8	24-27	-	Ti-5·С- 0,9
12X18Н9	850	0,12	0,8	2,0	17-19	8-10	-
10X23Н18	1050	0,10	1,0	2,0	22-25	17-20	-
ХН32Т	1100	0,05	0,7	0,7	19-22	30-34	0,25-0,6 Ti 0,5 Al
ХН45Ю	1400	0,10	1,0	1,0	15-17	44-46	2,9-3,9 Al
15X25ТЛ	1050	0,15	1,2	0,8	27-28	-	0,4-0,8 Ti
15X25Н19С2Л	1150	0,15	3,0	1,5	23-27	18-20	-
30X24Н12СЛ	1050	0,30	1,5	0,8	22-26	11-13	-

**Основні характеристики й призначення  
металокерамічних твердих сплавів**



Таблиця 16

Марка	$\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	HRA	$\sigma_{зг}$ МПа	Призначення і експлуатаційні властивості
ВК3 ВК3-М ВК6 ВК6-М	15-15,3 15,3 14,6-15,0 14,8-15,1	89,5 91,0 88,5 90	1176 1176 1590 1421	Чистове й напівчистове точіння, різання скла, обробка чавуну. Висока зносостійкість, помірна стійкість і опір ударам
ВК4 ВК4-В	14,9-15,2 14,9-15,2	89 88	1519 1470	Чорнове точіння. Чистове й чорнове фрезерування, свердління, зенкерування при обробці чавуну, сплавів, неметалевих матеріалів. Висока зносостійкість і експлуатаційна міцність.
ВК8	14,4-14,8	87,5	1616	Чорнова обробка різанням чавуну, кольорових металів, жаростійких сплавів. Волочіння і калібрування труб, дроту. Штамповий інструмент.
ВК8-В ВК8-ВК	14,4-14,8 14,5-14,8	86,5 87,5	1813 1764	Свердління, волочіння труб і прутків при підвищеному обтисканні. Зносостійкість нища, ніж у сплаву ВК8, а експлуатаційна міцність вища.
ВК10	14,2-14,6	87,0	1764	Волочіння труб і прутків з сталей, виготовлення швидкозношуваних деталей машин, пристосувань. Мала зносостійкість, вища експлуатаційна міцність, чим у сплаву ВК8
ВК15	13,9-14,1	86,0	1862	Ударне свердління гірських порід граніту. Обробка дерева різанням. Виготовлення швидкозношуваних деталей штампів. Висока ударна і експлуатаційна міцність
ВК20 ВТ25	13,4-13,7 12,9-13,2	84,0 82,0	2058 2156	Штамповий інструмент, швидкозношувані деталі машин. Експлуатаційна й ударна міцність вища, чим у сплаву ВК15, а зносостійкість нища
Т15К6 Т14К8	11,1-11,6 11,2-11,6	90 89,5	1176 1274	Чорнове й напівчистове точіння при неперервному різанні сталей. Експлуатаційна міцність вища, а зносостійкість нища, чим у сплаву Т30К4
Т5К10	12,4-13,1	88,5	1421	Чорнове точіння, стругання, чорнове фрезерування сталей.

Характеристика деяких олов'яно-свинцевих припоїв

Таблиця 17

Марка	Температура плавлення, °С	Питомий електричний опір, $\rho \cdot 10^6, \text{ Ом} \cdot \text{м}$	Теплопровідність, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$	$\delta, \%$
ПОС90	220	0,120	55	40
ПОС61	183	0,139	50	46
ПОС40	238	0,159	42	52
ПОС10	299	0,200	35	44
ПОС 61М	192	0,143	49	40
ПОССу 30–0,5	255	0,179	38	45
ПОССу 25–0,5	266	0,182	38	45
ПОССу 5–1	308	0,200	35	40

### Властивості срібних припоїв

Таблиця 18

Марка	Температура плавлення, °С	Питомий електричний опір, $\text{мкОм} \cdot \text{см}$	Густина, $\text{г}/\text{см}^3$	Марка	Температура плавлення, °С	Питомий електричний опір, $\text{мкОм} \cdot \text{см}$	Густина, $\text{г}/\text{см}^3$
ПСр 65	695	8,6	9,45	ПСр 62	650	25,5	9,6
ПСр 45	665	10	9,1	ПСр 23	304	20,4	11,4
ПСр 12М	793	7,4	8,3	ПСр 2	235	16,7	9,5
ПСр 10	822	7,3	8,4	ПСр 1,5	273	19,1	10,4

### Фізичні властивості термопластичних пластмас

Таблиця 19

Марка	Густина $\nu, \text{ г}/\text{см}^3$	Теплостійкість, °С	Робоча температура, °С	КТР $\alpha \cdot 10^{-5}, 1/^\circ\text{С}$	$\lambda, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$
Поліетилен:					
високого тиску	0,9 – 0,94	–	–50÷+70	22 – 55	–
низького тиску	0,95–0,96	–	–60÷+100	17 – 20	–
Полістирол:					
ПСМД, ПСМ,	1,05–1,08	78	–40÷+65	6 – 8	0,093–0,14
оптичний	1,05–1,08	–	–40÷+65	6 – 7	0,093–0,139
Фторопласт	2,09–2,16	–	–195÷+130	6 – 10	0,23
Фторопласт – 4	2,19–2,20	110	–269÷+260	8 – 21	0,24
Вініпласт	1,38	65 – 70	–	5 – 15	0,15 – 0,16
Поліметилметакрилат ЛПТ	1,18–1,20	88 – 95	–60÷+60	9	0,279
Скло органічне:					
конструкційне	1,18	–	–60÷+60	7,1 – 7,7	0,181–1,86
світлотехнічне	1,18–1,20	–	–60÷+60	7 – 8	0,172–1,184

### Фізичні властивості деяких термореактивних пластмас

Таблиця 19

Марка	Густина $\nu$ , г/см <sup>3</sup>	Тепло- стійкість, °C	Робоча темпера- тура, °C	КТР $\alpha \cdot 10^{-6}$ , 1/°C	Теплопро- відність $\lambda$ , Вт/(м·°C)
Гетинакс:					
- електротехнічний	1,35 – 1,45	150	–	–	–
- фольгований	1,44 – 1,98	–	–	–	–
Текстоліт:					
- електротехнічний	1,2 – 1,35	110	–60÷+65	–	–
- конструкційний	1,3 – 1,4	140	–	3,3 – 4,1	0,23 – 0,34
- графітований	1,3 – 1,4	120	–	–	–
Амінопласти:					
В2, В3, В4, В5	1,6 – 1,9	130 – 150	–60÷+60	3	0,29
Е1	1,7 – 2,0	180	–	–	–
Фольгований склотекстоліт	1,6 – 1,85	–	–	–	–

## ЛІТЕРАТУРА

1. Травин, О. В. Материаловедение [Текст] учебник для вузів / О. В. Травин, Н. Т. Травина. - М. Металлургия, 1989. - 383 с.
2. Матеріалознавство та конструкційні матеріали [Текст] : навч. посібник / Я. О. Ковальчук, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. – Тернопіль. : ТНТУ, 2003. – 172 с.
3. Матеріалознавство [Текст] : навч. посібник / А. І. Яцюк, Р. А. Яцюк; Ін-т змісту і методів навчання, Укр. держ. лісотехн. ун-т. - К. : [б.в.], 1996. - 168 с.
4. Металознавство та термічна обробка металів [Текст] : підручник для студ. вищ. навч. закладів / О. А. Кузін, Р. А. Яцюк ; Національний ун-т "Львівська політехніка". - Л. : Афіша, 2002. - 304 с.: рис. - Бібліогр.: с. 299-300. - ISBN 966-7760-36-7
5. Практикум з матеріалознавства для студентів спеціальності 7.091700 "Технологія зберігання, консервування та переробки плодів і овочів" [Текст] / А. Ф. Головчук, В. І. Левчук. - Умань : [б.в.], 2002. - 140 с.
6. Матеріалознавство [Текст] : лабораторний практикум / В. Попович [и др.] ; Український держ. лісотехнічний ун-т. - Львів : [б.в.], 1997. - 109 с.
7. Металознавство [Текст] : підручник для студ. вузів / О. М. Бялік [та ін]. - К. : Політехніка, 2001. - 374 с
8. Гуляев А. П. Металловедение [Текст] /А. П. Гуляев. – М.: Металлургия, 1977. – 678 с.
9. Матеріалознавство та конструкційні матеріали [Text] : курс лекцій / В. Д. Кузнецов [и др.]. - К. : НАУ, 2003. - 120 с.
10. Лахтин Ю. М. Материаловедение: учебник для высших технических учебных заведений. 3-е изд., перераб. и доп. // Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. – М.: Машиностроение, 1990. – 528 с.
11. Матеріалознавство [Текст] : лабораторний практикум / С. І. Бондаренко [та ін.] ; ред. С. С. Дяченко ; Харківський національний автомобільно-дорожній ун-т. - Х. : Видавництво ХНАДУ, 2006. - 168 с.: рис., табл. - Бібліогр.: с. 163-165. - ISBN 966-303-105-0.
12. Сидорин И. И. Руководство к лабораторным работам по материаловедению / И. И. Сидорин. – М.: Металлургия, 1978. – 254 с.
13. Самохоцкий А. И. / Технология термической обработки металлов // А.И. Самохоцкий., Н.Г. Парфеновская. – М.: Машиностроение, 1976. – 428 с.
14. Металознавство і термічна обробка із застосуванням комп'ютерних технологій навчання: навч. посібник / за ред. Ю.М.Тарана. – К.: ІСДО, 1983. – 208 с.
15. Матеріалознавство та конструкційні матеріали [Text] : курс лекцій / В. Д. Кузнецов [и др.]. - К. : НАУ, 2003. - 120 с.

**Бодрова Людмила Гордіївна**

**Технологія конструкційних матеріалів і  
матеріалознавство,  
Розділ “Матеріалознавство”**

*Навчальний посібник*

Друкується в авторській редакції