

Міністерство освіти і науки України  
ВІДОКРЕМЛЕНИЙ СТРУКТУРНИЙ ПІДРОЗДІЛ «БЕРДЯНСЬКИЙ  
МАШИНОБУДІВНИЙ ФАХОВИЙ КОЛЕДЖ  
Національного університету «Запорізька політехніка»

**МЕТОДИЧНИЙ ПОСІБНИК ДО ПРАКТИЧНИХ РОБІТ  
З НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ  
ТЕХНОЛОГІЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ**

**Галузі знань:** G Інженерія, виробництво та будівництво  
J Транспорт та послуги

**Спеціальності:** G11 Машинобудування (верстати та інструменти)  
G9 Прикладна механіка  
J8 Автомобільний транспорт

## Практична робота № 1

### Кристалічна структура металів

**Мета роботи:** вивчення основних типів кристалічних решіток металів, аналіз анізотропії властивостей кристалів, основні дефекти кристалічної будови.

#### Теоретичні відомості

У техніці під металами розуміють як технічно чисті метали, так і їхні сплави. Застосування металів потребує знання їхніх механічних, фізичних і технологічних властивостей. Вони залежать не тільки від складу металевих матеріалів, а й від їхньої будови (структури). Тому, змінюючи будову металів термічною чи механічною обробкою, можна значно змінити і їхні властивості. Вивчення зв'язків між складом, будовою, обробкою і властивостями металевих матеріалів є завдання металознавства. Знання цих залежностей необхідні при проектуванні металевих заготовок і їх обробки.

**1. Кристалічні решітки металів.** Усі метали в твердому стані мають кристалічну будову. Розташування атомів (іонів) у кристалічній речовині звичайно зображують у вигляді елементарних комірок, яка є найменшим комплексом атомів. Багаторазове повторювання її відображає розташування атомів в об'ємі всієї речовини, тобто її кристалічну решітку.

Найхарактернішими для металів є три типи кристалічних комірок:

- об'ємостронована кубічна (ОЦК) з розміщенням атомів у вершинах і одного атома у центрі об'єму куба (рис. 1,а);
- гранецентрована кубічна (ГЦК) з розміщенням атомів у вершинах і в центрі кожної грані куба (рис. 1,б);
- гексагональна щільноупакована (ГЦУ) з розміщенням атомів у вершинах і в центрі шестикутних основ призм і трьох атомів усередині призми (рис.1,в).

У системі ОЦК , наприклад, кристалізуються Fe, Nb, Cr, Mo, W; у системі ГЦК – Cu, Ni, Pd. Ag; у системі ГЦУ – Mg, Zn, Ti, Cd та ін.

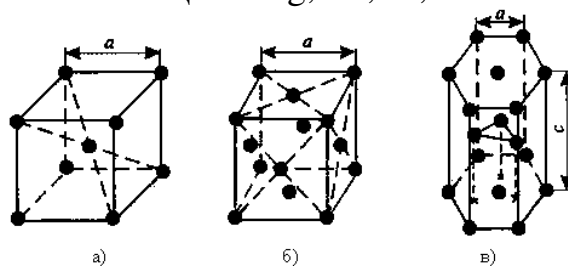


Рис. 1. Основні типи кристалічних комірок: а – об'ємостронована кубічна; б– гранецентрована кубічна; в – гексагональна щільноупакована.

**2. Поліморфізм металів.** У деяких металів (Fe, Sn, Ti) при зміні температури відбувається перебудова атомів у просторі, тобто змінюється форма кристалічної решітки. Існування однієї і тієї самої речовини в різних кристалічних формах (модифікаціях) називається *поліморфізмом*, а перехід з однієї модифікації в іншу – *поліморфним перетворенням*.

При поліморфних перетвореннях змінюється не тільки будова кристалічної решітки металу, а і його властивості – об'єм, пластичність, здатність розчиняти в собі різні домішки тощо.

Поліморфізм металів має велике практичне значення, оскільки він багато в чому визначає поведінку і властивості металів при механічній і термічній обробці, легуванні та роботі в умовах низьких і високих температур.

**3. Анізотропія властивостей кристалів.** У різних кристалографічних площинах, проведених через центри атомів у кристалічних решітках, число атомів і відстані між ними неоднакові. У зв'язку з цим властивості монокристалів у різних напрямках неоднакові. Таке явище називається *анізотропією*.

Анізотропія виявляється в неоднаковості опорів монокристала електричного струму і швидкості розчинення в хімічних реактивах, у відмінності механічних властивостей. Наприклад, міцність зразків, вирізаних у різних напрямках з монокристалу міді, відрізняється приблизно в 3 рази, а пластичність – більше ніж у 5 разів.

Реальні метали є тілами полікристалічними, тобто складаються з великої кількості по-різному орієнтованих у просторі кристалів (зерен). Тому властивості таких металів у будь-якому напрямі усереднені, однакові. Проте в тих випадках, коли обробка металів сприяє переважному орієнтуванню окремих кристалів (наприклад, при прокатуванні, куванні), полікристалічні метали стають також анізотропними. Так, міцність зразків, вирізаних з листа вздовж і впоперек напрямку прокатування, різні.

**4. Дефекти кристалічної будови.** Кристалічна будова, яку було описано вище, є ідеальною. Насправді ж вона має багато дефектів – точкових, лінійних і поверхневих.

**Точкові дефекти** (рис. 2,а) характеризуються малим розміром у всіх трьох вимірах. До цих дефектів належать вакансії – вільні вузли **1** у кристалічній решітці, атоми **2**, зміщені в простір між вузлами, і атоми **3** домішок.

**Лінійні дефекти** мають малий розмір в двох вимірах. Основний вид цих дефектів – це дислокації. На рис. 2,б подано так звану крайову дислокацію **4**, яка становить край “зайвої” кристалографічної півплощини. При іншому характері зміщенні атомів може утворитися складніша дислокація – гвинтова. Дислокації утворюються в процесі твердіння і особливо деформації металу.

Дефекти кристалічної будови, зокрема дислокації, відіграють велику роль у пластичній деформації, зумовлюючи значні зміни у властивостях металів. Точкові дефекти виявляються в процесах, пов'язаних із переміщенням (дифузією) атомів.

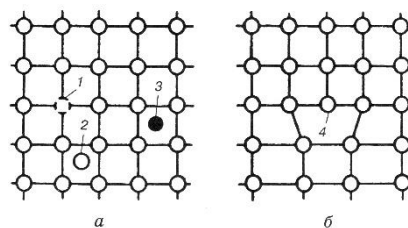


Рис. 2. Дефекти кристалічної будови металів

## Практична робота № 2

### Виробництво кольорових металів

**Мета роботи:** вивчення виробництва алюмінію, магнію та міді

#### Теоретичні відомості

Кольорові метали та їх сплави: мідь, латунь, бронза, алюміній, магній, цинк, свинець, олово, титан, нікель, кобальт, бабіт широко застосовують при виготовленні різних деталей. Способи виробництва кольорових металів складніші, ніж способи металургії чорних металів тому, що руди кольорових металів відрізняються великою різноманітністю сполук. Перед плавкою руди збагачують. Вони вимагають комплексної переробки для виділення компонентів.

#### *Виробництво алюмінію*

Алюміній - найпоширеніший метал у земній корі. Його масова частка 8,8 %. Алюмінієвими рудами є боксити, нефеліни, апатити, алуніти. Алюміній міститься в них у вигляді глинозему  $Al_2O_3$ , його гідратів та інших сполук.

Основною промисловою сировиною для одержання алюмінію є боксити. До їхнього складу може входити до 60 %  $Al_2O_3$ ; 13 %  $SiO_2$ ; 23 %  $Fe_2O_3$ ; 10 %  $TiO_2$ .

Виробництво алюмінію складається з двох процесів: виділення глинозему з руди і його електроліз.

Глинозем одержують з бокситів в основному лужним способом. Для цього подрібнений боксит піддають вилуговуванню в автоклавах при температурі 100...250 °C у концентрованому розчині лугу NaOH.

Добре розчинений алюмінат натрію залишається у розчині, а домішки (оксиди заліза, титану та ін.) випадають у осад. Відфільтрований розчин алюмінату натрію гідролізують і гідроксид алюмінію  $Al(OH)_3$  випадає в осад. Його прожарюють при температурі 1200 °C в трубчастих обертових печах і дістають глинозем.

Утворений глинозем розчиняють у кріоліті -фториді натрію та алюмінію і піддають електролізу в електролізерах.

Рафінування алюмінію полягає в продуванні рідкого металу хлором протягом 10...15 хв. Утворюваний при цьому пароподібний хлорид алюмінію  $AlCl_3$  адсорбується на поверхні неметалевих домішок, які спливають у вигляді шлаку. Хлор також сприяє видаленню розчинених газів ( $O_2$ ,  $CO_2$ ).

Після рафінування і відстоювання протягом 30...45 хв алюміній досягає чистоти 99,85 %. При більш високих вимогах до алюмінію щодо чистоти його піддають ще й електролітичному рафінуванню. Такий алюміній має чистоту до 99,99 %.

Первинний алюміній виготовляють особливої чистоти А999 (99,999 % Al); високої чистоти - А995 (99,995 % Al), А99 (99,99 % Al), А97 (99,97 % Al), А95 (99,95 % Al) і технічної чистоти - А85, А8, А7, А6, А5, А0 (99,0 % Al).

#### *Виробництво магнію*

Масова частка магнію в земній корі 2,4 %. Рудами магнію є карналіт, магнезит, доломіт, бішофіт.

Найпоширенішим способом виробництва магнію є електролітичний. Він складається з двох процесів - добування хлориду магнію  $MgCl_2$  і його електролізу.

Основною сировиною для виробництва магнію є карналіт. З метою збагачення карналіт обробляють гарячою водою.

Для видалення вологи штучний карналіт обпалюють в обертових або з "киплячим" шаром печак і плавлять в хлораторах, щоб зменшити вміст оксиду  $\text{MgO}$  в безводному карналіті. Магnezит і доломіт спочатку обпалюють, а потім піддають хлоруванню в присутності вуглецю і одержують хлорид магнію  $\text{MgCl}_2$ .

Електроліз хлориду магнію здійснюють у футерованих шамотом електролізерах. Електролітом для добування магнію є розплав солей  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{KCl}$  з добавкою  $\text{NaF}$  і  $\text{KF}$ . Електроліз ведуть при температурі  $720^\circ\text{C}$ , електричній напрузі близько 3 В і силі електричного струму 30...50 кА. Витрата електроенергії для добування 1 т магнію становить 15...17 кВт-год.

Чорновий магній містить до 2...5 % різних домішок, тому в більшості випадків його піддають рафінуванню - переплавці з флюсами, до складу яких входять хлориди магнію, барію, калію, натрію тощо.

Більш глибоке очищення магнію можна здійснити його сублімацією у вакуумі.

Магній можна одержати також термічним способом - відновленням його оксиду  $\text{MgO}$  вуглецем, силіцієм або феросиліцієм при високих температурах та відносно глибокому вакуумі.

Виплавляється первинний магній таких марок: Мг96 (99,96 % Mg), Мг95 (99,95 % Mg) і Мг90 (99,90 % Mg).

#### *Виробництво міді*

Масова частка міді в земній корі 0,01 %. Мідні руди містять 1...5 % міді. Мідь у них міститься у вигляді сірчистих сполук  $\text{CuS}$ ,  $\text{Cu}_2\text{S}$  або  $\text{CuFeS}_2$ , оксидів  $\text{CuO}$  і  $\text{Cu}_2\text{O}$ , карбонатів. Поряд з міддю ці руди часто містять нікель, цинк, свинець, золото, срібло та інші метали.

Добувають мідь з сульфідних руд пірометалургійним способом. У процес виплавлення міді входять: збагачення і випалення руди, виплавлення напівпродукту - штейну, з якого потім одержують чорнову мідь. Для очищення від домішок чорнову мідь рафінують.

Збагачують мідні руди методом флотації, заснованим на різному змочуванні водою сполук міді й пустої породи. Після фільтрації і сушіння зібраної піни утворюється концентрат з масовою часткою міді 15...35 %.

Випалюють концентрат при температурі  $750\text{...}850^\circ\text{C}$  в повітряній атмосфері з метою окислення сульфідів і зменшення вмісту сірки.

Останнім часом для плавлення концентратів застосовують електричні печі і плавлення в киплячому стані, що дає змогу підвищити продуктивність процесу майже втричі порівняно з полуменевою відбивною піччю і зменшити енергозатрати на 30 %.

Чорнова мідь утворюється при продуванні розплавленого штейну повітрям у конвертері.

Виплавлену мідь називають чорною тому, що вона містить до 1,5 % домішок. Для очищення домішок чорнову мідь піддають вогневому і електричному рафінуванню.

Вогневе рафінування полягає в окисленні домішок у відбивних печах при продуванні чорнової міді повітрям.

Після вогневого рафінування чистота міді досягає 99,7 %. Із неї відливають чушки для одержання сплавів або плити для електролітичного рафінування.

Електролітичне рафінування застосовують для одержання міді чистотою 99,95 %. Електроліз проводять у спеціальних ваннах.

Первинну мідь поставляють таких марок: М00 (99,99 % Cu), М0 (99,95 % Cu), МІ (99,9 % Cu), М2 (99,7 % Cu), М3 (99,5 % Cu).

### **Практична робота № 3** **Спеціальні способи лиття**

**Мета роботи:** ознайомитись з спеціальними способами лиття, їх перевагами та недоліками

#### **Теоретичні відомості**

##### *Виготовлення виливків у кокілях*

Суть способу полягає в тому, що замість разової піщаної форми використовують багаторазову металеву (кокіль). Для утворення у виливку внутрішніх порожнин або отворів стрижні часто роблять також металевими. У кокілях виготовляють виливки з кольорових сплавів, чавуну і рідко із сталі.

Порівняно з піщаними формами кокіль має ряд переваг:

- не потрібні формові суміші і модельно-опокова оснастка;
- підвищуються точність і чистота поверхні виливка;
- високі якість і щільність металу виливка;
- зменшується кількість пилю;
- значно підвищується продуктивність праці.

Недоліки:

- висока вартість кокілю, тому їх застосовують лише в серійному і масовому виробництві;
- невіддатливість кокілю, що збільшує небезпечність утворення тріщин у виливках;
- чавунні виливки, що виготовленні в кокілі, матимуть вибілену поверхню, що потребує відпалювання чавунних виливків.

За конструкцією кокілі можуть бути нерознімними витрушуваними або рознімними з горизонтальним чи вертикальним розняттям.

Особливості технології виготовлення виливків у кокілях полягає в тому, що перед заливанням внутрішню поверхню кокіля покривають вогнетривкою фарбою для ізолювання форми від стикання з рідким металом, щоб збільшити термін служби його або зменшити швидкість охолодження виливка.

##### *Виготовлення виливків виливанням під тиском*

Суть цього способу полягає в тому, що метал під тиском примусово заповнює металеву прес-форму. Це усуває можливість утворення усадочних раковин і, отже, дає змогу відмовитись від додатків. Завдяки тиску розчинені в металі гази залишаються в розчині, що знижує газову пористість, підвищує щільність і міцність виливків. При цьому способі виливки не потребують механічної обробки. Виливанням під тиском можна виготовити виливки з глибокими порожнинами, отворами малого діаметра (до 2 мм), готовою різьбою, тонкостінні (близько 0,5 мм). Перевагою цього способу є також висока продуктивність і взаємозамінність виготовлених деталей.

Металеві прес-форми дуже складні і дорого коштують, тому лиття під тиском застосовують лише в масовому виробництві тонкостінних невеликих виливків з кольорових сплавів, які мають невисоку температуру плавлення.

#### *Виготовлення виливків виливанням за витоплюваними моделями*

Суть цього способу полягає в тому, що за нерознімною легкоплавкою моделлю виготовляють нерознімну разову ливарну форму, моделі з якої потім витоплюють, а в утворену порожнину заливають метал.

У виготовлених виливків немає формувальних уклонів, оскільки форма нерознімна. Для формування використовують кварцову пудру (маршаліт), тому виливки мають точні розміри і високу чистоту поверхонь. Обсяг механічної обробки зменшується на 80...100 % і в 1,5...2 рази скорочуються витрати металу на ливникову систему, бо в одній формі виготовляють навіть десятки штук виливків. Цим способом можна виготовляти виливки із сплавів з будь-якою температурою плавлення, а також важкооброблюваних – різанням і тиском (жароміцні, жаростійкі, різальний інструмент із швидкорізальної сталі тощо).

Легкоплавкі моделі виготовляють з модельної маси, до складу якої входять різні легкоплавкі матеріали, наприклад, парафін, стеарин, віск, церезин, каніфоль.

Ливарну форму виготовляють нанесенням вогнетривкого покриття, занурюючи блок легкоплавких моделей у суміш з 60...70 % маршаліту і 30...40 % гідролізованого етилсилікату. На моделях утворюється тонкий шар вогнетривкої суміші. Для укріплення цього шару блок посипають кварцовим піском і дають покриттю висохнути; занурення у вогнетривку суміш повторюють ще 3...5 разів із сушінням після кожного разу. Наступна операція - витоплювання легкоплавких моделей з вогнетривкої оболонки (форми). Для цього блок моделей з оболонкою занурюють у гарячу воду (90 °С) або ставлять його в сушильну шафу.

#### *Лиття в оболонкові форми*

Суть способу полягає у використанні у формовій суміші термореактивної смоли з технічним уротропіном, яка при незначному нагріванні плавиться, а при подальшому нагріванні полімеризується і необоротно твердіє. За точністю розмірів і чистотою поверхні виливки, виготовлені в оболонкових формах, перевершують виготовлені в піщано-глинистих формах. Цей спосіб застосовують у серійному і масовому виробництві дрібних і середніх виливків з будь-яких сплавів.

Виготовлення оболонкових форм починається з нагрівання модельних металевих плит в електричній печі до температури 220...280 °С. Нагріту модельну плиту закріплюють моделлю вниз над бункером з формовою сумішшю, яка складається з піску і домішки 4...6 % смоли у вигляді порошку. Бункер разом з модельною плитою повертають на 180°, і формова суміш падає на модельну плиту. Смола суміші плавиться і зв'язує зерна піску в напівтверду кірку. Потім бункер повертається у вихідне положення, формова суміш, що не прореагувала, падає на дно бункера, а на модельній плиті залишається напівтверда оболонка завтовшки 6...8 мм. Далі модельну плиту подають у піч для остаточного затверднення оболонки при температурі близько 350...500 °С. Готову тверду оболонку знімають з модельної плити за допомогою виштовхувачів. Таким способом виготовляють обидві половинки оболонкової форми. Стрижні також

виготовляють з цієї суміші в металевих стрижневих ящиках за такою самою технологією. Заключною операцією є складання оболонкової форми з півформ.

#### *Виготовлення виливків відцентровим виливанням*

Суть способу полягає в тому, що метал заливають у кокіль, який обертається з певною швидкістю. Заповнення кокілю і кристалізація металу відбуваються під дією відцентрових сил, що забезпечує значну щільність металу, оскільки гази і неметалеві домішки важкий метал витискує до внутрішньої порожнини виливка, а потім їх видаляють при механічній обробці. Перевагою відцентрового виливання є високий вихід придатних виливків (до 90 %) завдяки майже повній відсутності витрати металу на ливникову систему і додатки.

## **Практична робота № 4**

### **Термомеханічне та механічне зварювання**

**Мета роботи:** ознайомитись з основними видами термомеханічного та механічного зварювання, переваги та недоліки.

#### **Теоретичні відомості**

*Контактне зварювання* (зварювання опором) ґрунтується на розігріванні зварюваних виробів джоулівською теплотою і механічному стисканні розігрітих виробів.

Сила зварювального струму при контактному зварюванні може досягати десятків і навіть сотень тисяч ампер. Такі струми дістають у знижувальних однофазних зварювальних трансформаторах, що мають у вторинній обмотці здебільшого всього один виток.

Найбільший опір має місце контакту зварюваних виробів, де виділяється найбільша кількість теплоти. Час зварювання залежно від товщини і роду зварюваного матеріалу змінюється від сотих і навіть тисячних часток секунди до кількох хвилин. Коли деталі нагріваються до пластичного стану або до оплавлення, до них прикладається зусилля осадки і деталі зварюються.

#### *Холодне зварювання*

Холодне зварювання тиском здійснюють без нагріву, тільки за рахунок зусиль стискання. Цим методом зварюють такі високопластичні метали, як свинець, алюміній, мідь, кадмій, срібло, нікель. Для виготовлення міцного з'єднання перед зварюванням слід старанно очистити вироби від оксидів і забруднень, а також застосувати великі зусилля стискання, внаслідок чого проявляться міжатомні сили зчеплення. Для холодного зварювання потрібна дуже інтенсивна пластична деформація, яка б змушувала метал текти вздовж поверхні поділу і сприяла б видаленню поверхневого шару адсорбованих газів. Оголені (ювенільні) поверхні між дією високого тиску з'єднуються в одне ціле.

Тепер холодне зварювання тиском застосовують переважно при з'єднанні у стик або внапусток деяких алюмінієвих і мідних проводів, шин, а також деталей з нікелю і свинцю завтовшки 0,2... 15 мм. Питомий тиск при зварюванні цих металів становить 150... 1000 МПа.

#### *Зварювання тертям*

Для зварювання тертям використовують перетворення механічної енергії в теплову, а здійснюють це відносним обертанням і взаємним тертям з'єднуваних торцевих поверхонь. Зварювані вироби нагріваються до пластичного стану, після

чого їх стискають осьовим зусиллям. Цим способом з'єднують у стик здебільшого вироби круглого перерізу, наприклад труби, стрижні, деякі різальні інструменти, які виготовляють з однорідних і різнорідних чорних і кольорових металів або їхніх сплавів і різних пластмас.

Для зварювання тертям використовують переобладнані токарні, свердлильні та інші металорізальні верстати, а також спеціалізовані зварювальні машини.

За продуктивністю зварювання тертям не поступається перед контактним зварюванням оплавленням, а в економічному відношенні воно навіть вигідніше, ніж контактне, оскільки в цьому разі споживана потужність приблизно в 10 разів менша. Спосіб зварювання тертям простий, легко піддається автоматизації і програмному керуванню.

#### *Зварювання вибухом*

Для зварювання вибухом лист, який треба приварити по всій площі до листа, встановлюють на відстані 2...3 мм і під кутом  $\alpha$  до нього. На поверхню листа укладають вибухову речовину (порох, гексоген тощо), яка займається від запальника. Під час спалахування вибухівки потужна вибухова хвиля поширюється по всій поверхні листа і створює на нього величезний тиск. При зіткненні зварювальних поверхонь у поверхневих шарах виникають пластична деформація і розплавлення мікроділянок, внаслідок чого і відбувається зварювання. Зварювання вибухом дає можливість з'єднати як однорідні (срібло, алюміній, титан, мідь, сталь тощо), так і різнорідні (титан і сталь, титан і мідь, алюміній і титан та ін.) метали.

#### *Зварювання ультразвуком*

Для зварювання ультразвуком використовують ультразвукові механічні коливання і невеликі стискальні зусилля. Ці коливання створюють за допомогою магнітострикційного ефекту, який полягає в здатності деяких металів і їхніх сплавів перетворювати електромагнітні коливання ультразвукової частоти (15... 100 кГц) у механічні коливання тієї самої частоти. Процес супроводжується підвищенням температури в місці з'єднання. Залежно від того, який метал зварюється і який використовується режим, температура нагрівання становить 200... 1200 °С.

На ультразвукових зварювальних установках виконують внапусток точкові і шовні з'єднання з різних однорідних і різнорідних металів та їхніх сплавів завтовшки 0,01... 1 мм. Ультразвуком успішно зварюють не тільки метали, а й різні неметалеві матеріали, наприклад, хлорвініл, поліетилен, капрон, нейлон, органічне скло тощо.

#### *Дифузійне зварювання*

Дифузійне зварювання ґрунтується на взаємній дифузії контактуючої пари металів, що перебувають у вакуумі  $133 \cdot 10^{-3} \dots 133 \cdot 10^{-5}$  Па або в атмосфері інертних захисних газів, нагрітих до 400... 1300 °С і стиснених до 10...20 МПа. Нагріваються вироби індукційними струмами високої частоти, електронним променем, контактним та іншими способами.

Дифузійним зварюванням можна з'єднувати як однорідні, так і різнорідні метали та їхні сплави, а також металокерамічні вироби з металами.

Основною перевагою цього способу зварювання є виготовлення міцного з'єднання без помітних змін фізико-механічних властивостей зварних з'єднань у

зоні зварювання. До недоліків дифузійного зварювання належать трудомісткість і тривалість процесу.

## **Практична робота № 5**

### **Електроерозійні та електрохімічні методи обробки**

**Мета роботи:** ознайомитись з основними методами електроерозійної та електрохімічної обробки

#### **Теоретичні відомості**

Методи **електрофізичної та електрохімічної обробки** ґрунтуються на різних фізико-механічних процесах енергетичної дії на тверде тіло, при яких від нього відокремлюються частинки і утворюється деталь з потрібними розмірами і формою.

Залежно від використовуваних фізико-хімічних процесів ці методи обробки можна поділити на чотири групи:

- 1. Електроерозійні методи обробки** струмопровідних матеріалів ґрунтуються на використанні енергії електричних розрядів, які збуджуються між інструментом і деталлю. Розрізняють чотири основних різновиди електроерозійної обробки: електроіскрову, електроімпульсну, електроконтактну та анодно-механічну.
- 2. Електрохімічна обробка** металів і сплавів, що ґрунтується на явищі анодного розчинення в електролітах.
- 3. Ультразвукова обробка.**
- 4. Променеві способи обробки** із застосуванням світлових, електронних або іонних променів.

Ці методи порівняно з іншими мають такі переваги:

- ними можна обробляти матеріали, які іншими методами обробляються важко або навіть зовсім не можуть оброблятися;
- завдяки простоті кінематики формоутворення цими методами можна обробляти деталі, які неможливо обробити іншими способами (наприклад, глухі фасонні отвори, порожнини складної форми, отвори з криволінійною віссю, отвори діаметром порядку сотих часток міліметра);
- можливість відтворення (копіювання) форми інструмента відразу по всій оброблюваній поверхні заготовки при звичайному поступальному русі інструмента; відсутність силової дії на заготовку;
- обробку цими методами легко автоматизувати.

До основних різновидів електроерозійної обробки належать:

- **електроіскрова обробка** ґрунтується на явищі руйнування металу в колі постійного струму під дією іскрового розряду. При наближенні металевих електродів у рідкому діелектричному середовищі (гасі, маслі) до відстані пробійного зазора виникає потужний короткочасний іскровий розряд, температура якого становить 6000... 11 000 °С. Це призводить до миттєвого розплавлення, випаровування, вибухів і викидання частинок, які, направляючись до катода, охолоджуються і осідають. Обробка йде без стикання заготовки з інструментом, що дає змогу обробляти струмопровідний матеріал будь-якої твердості інструментом з м'якого металу (латуні, графіту).

Електроіскрова обробка використовується для виготовлення штампів, прес-форм, кокілів, фільтрів з інструментальних сталей і твердих сплавів.

- **електроімпульсний метод обробки** значно продуктивніший за електроіскровий. На відміну від електроіскрового методу при цій обробці заготовка є катодом, а інструмент - анодом, між якими досягається послідовне збудження розрядів під дією імпульсів напруги, які виробляються спеціальним генератором. Температура в робочій зоні значно нижча ( $4000...5000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), ніж при електроіскровій обробці, отже, і спрацювання інструмента менше.

- **електроконтактна обробка** ґрунтується на електро механічному руйнуванні металу під впливом електродугових розрядів інструментом, що переміщується. Зняття металу з заготовки здійснюють у повітряному середовищі обертовим диском-електродом. Диск і заготовку сполучено із джерелом живлення - знижувальним трансформатором. При обертанні зі швидкістю до 30 м/с диска, до якого заготовка притискується тиском 20...50 кПа, відбувається періодичний розрив контактів, виникають дугові розряди, під дією яких і руйнується метал заготовки. Інтенсивність процесу досить висока і в ряді випадків може перевищувати продуктивність обробки різанням. Проте він не дає високої точності, тому цю обробку використовують в основному для грубих операцій, наприклад зачищення виливків і штамповок з важкооброблюваних сплавів.

**Електрохімічна обробка** ґрунтується на явищі анодного розчинення металів, яке полягає в тому, що при проходженні електричного струму крізь електроліт метал анода (заготовки) розчиняється і виноситься електролітом із робочої зони.

Великого поширення набуло **електролітичне полірування** для ретельної обробки деталей складної форми з високолегованих сталей (лопатки турбін, клапани двигунів, інструменти та ін.). На поверхні деталі-анода при проходженні струму в електроліті утворюється плівка, що захищає западини мікрошорсткостей від впливу струму. Однак вона не перешкоджає розчиненню мікровиступів, на які діє струм більшої густини, і поверхня деталі згладжується.

У практиці використовують також інші методи електрохімічної обробки металів. На рис.1 показано **електрохімічне прошивання отворів**. До заготовки 1, що є анодом, подається електроліт крізь трубку-катод 2. Сталий зазор між торцем трубки й оброблюваної поверхні утворюється протидією пружини 3 і тиску електроліту. Продукти розчинення виносяться електролітом крізь отвір у ванночці 4.

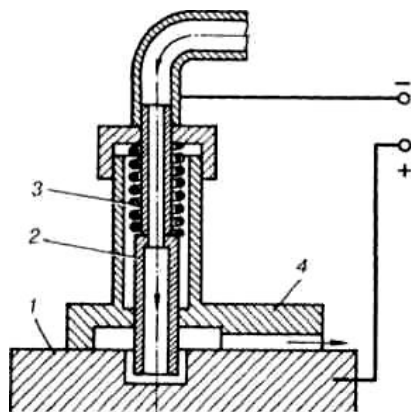


Рис. 1. Схема електрохімічного прошивання отворів

Різновидом електрохімічної обробки є **електроабразивне шліфування**, яке виконують електроабразивним кругом. Крім абразивних зерен, до його складу входить електропровідний наповнювач. Круг сполучають з негативним полюсом джерела струму, заготовку - з позитивним, а в робочу зону струменем подається електроліт. Плівка, що утворюється внаслідок анодного розчинення, знімається абразивними зернами круга. Порівняно зі звичайним шліфуванням цей процес більш продуктивний при меншому спрацюванні круга, не призводить до появи мікротріщин

## **Практична робота № 6**

### **Прокатне виробництво**

**Мета роботи:** ознайомитися з прокатуванням, його основними видами, сортаментом прокатування

### **Теоретичні відомості**

**Прокатування** - це вид обробки, при якому заготовка обтискується двома обертовими валками прокатного стану. Метал при прокатуванні деформується на невеликій ділянці, що називається *зоною деформації*.

При прокатуванні збільшується довжина і ширина заготовки і зменшується її товщина. Відносне зменшення товщини заготовки в процесі прокатування називається *відносний обтиском*, або ступенем деформації. Максимальне значення відносного обтиску залежно від типу виробів дорівнює 0,2...0,5. Розширення заготовки в процесі прокатування становить 5... 10 % від значення обтиску.

При прокатуванні метал втягується в зазор між валками силами тертя між заготовкою і валками.

Розрізняють такі основні види прокатування:

- *поздовжнє прокатування* (рис. 4.2, а) – заготовка переміщується перпендикулярно до осей валків, які обертаються в протилежних напрямках. До 90 % всього прокату виготовляють поздовжнім прокатуванням (листи, стрічки, прутки);

- *поперечне прокатування* (рис. 4.2, б) – валки, що обертаються навколо паралельних осей в одному напрямі, обертають заготовку, яка деформується при примусовому переміщенні вздовж валків.

- *поперечне гвинтове прокатування* (рис. 4.2, в) здійснюється при обертанні в одному напрямі валків, розміщених під кутом один до одного. Таке розташування валків забезпечує появу осьового зусилля, завдяки якому заготовка переміщується вздовж осей валків.

Сортамент прокату визначається сукупністю профілів та розмірів прокатаного металу. *Профілем* прокатаного виробу називають форму його поперечного перерізу.

За сортаментом продукцію прокатного виробництва поділяють на такі групи: сортовий прокат, листовий прокат, труби, спеціальний та періодичний прокат.

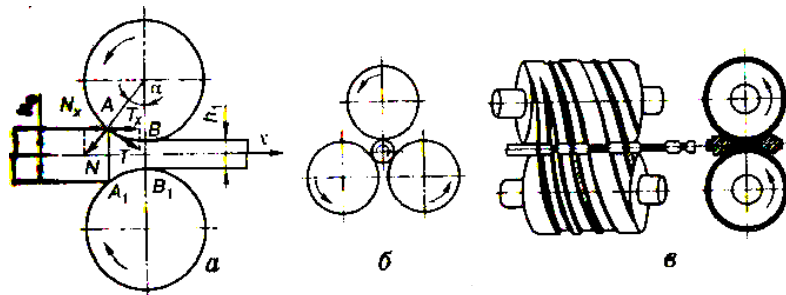


Рис.4.2. Основні схеми прокатування

Профілі сортової сталі можуть бути загального призначення - кругла, квадратна, кутова, стрічкова сталь, швелери, двотаврові балки та ін. та спеціального призначення - рейки, профілі для автотракторобудування, суднобудування, транспортного машинобудування та інших галузей промисловості.

*Листову* сталь поділяють на тонколистову (завтовшки менше ніж 4 мм) і товстолистову. Деякі види листової сталі призначені для окремих галузей промисловості, серед них розрізняють сталь котлову, автотракторну, електротехнічну тощо.

*Труби* поділяють на дві групи: безшовні та зварні. Крім того, випускають труби фасонні та змінного перерізу.

До *спеціальних* видів прокату належать залізничні колеса, шестерні, кулі, підшипникові кільця, періодичний прокат, а також гнутий профіль.

### **Волочіння та пресування металів**

**Волочіння** полягає в протягуванні (частіше в холодному стані) прокатаних або пресованих заготовок крізь отвір у матриці (волоці), переріз якого менший за переріз заготовки (рис. 4.3, б). При протягуванні прутка крізь отвір з зусиллям виникають сили реакції, які обтискують заготовку.

Щоб запобігти обривам, напруження при волочінні не повинно перевищувати 0,6 границі міцності матеріалу заготовки. Для отримання профілів потрібних розмірів волочіння виконують за кілька проходів крізь ряд отворів, що поступово зменшуються. В результаті холодного пластичного деформування метал зміцнюється. Для усунення наклепу і підвищення пластичності метал піддають проміжному рекристалізаційному відпалу.

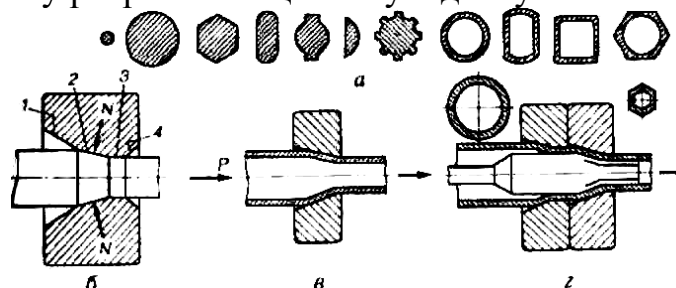


Рис. 4.3. Схеми волочіння і приклади виробів

Із різних сортів сталі та кольорових металів волочінням виготовляють дріт діаметром 0,002... 10 мм, різноманітні профілі (рис. 4.3, а), калібровані прутки діаметром 3... 150 мм, холоднотягнені труби діаметром до 500 мм із стінками завтовшки 0,1... 10 мм з високою точністю і високоякісною зовнішньою поверхнею. Завдяки наклепу волочінням можна підвищити міцність і твердість металу.

Інструментом для волочіння є волочильна матриця (волока). Волоки можуть бути суцільними, складними і роликowymi.

**Пресування** полягає у витісненні металу із закритого об'єму крізь отвір у матриці. Профіль пресованого виробу відповідає перерізу цього отвору. Пресування – високопродуктивний та економічний спосіб обробки металів і сплавів, яким можна отримати суцільні та порожнисті профілі (рис. 4.4, а). Пресовані вироби мають більшу точність, ніж катані.

Пресування відбувається в умовах всебічного стискання. При цій схемі деформування метал має найбільшу пластичність. Тому пресуванням можна обробляти як пластичні, так і малопластичні сплави: мідні, алюмінієві, магнієві, титанові, вуглецеві і легovanі сталі тощо. До недоліків процесу належать значні (іноді до 40 %) відходи металу та інтенсивне зношування інструменту.

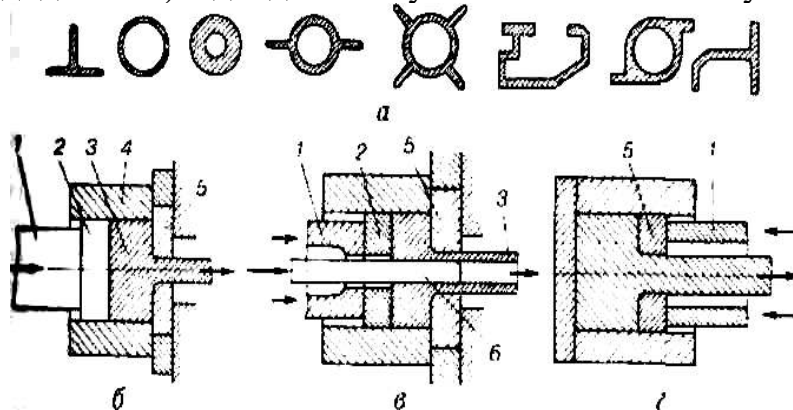


Рис. 4.4. Пресовані профілі та схеми пресування

Пресуванням виготовляють прутки діаметром 5...250 мм, дріт діаметром 5... 10 мм, труби зовнішнім діаметром 20...400 мм із стінками завтовшки 1,5... 12 мм та інші вироби. Завдяки гнучкості, простому переналагодженню на виготовлення іншого профілю пресуванням доцільніше, ніж прокатуванням, виготовляти малі серії профілів.

Вихідною заготовкою для пресування є зливки або круглий прокат. Розрізняють пряме і зворотне пресування.

## Практична робота № 7

### Вимірювання твердості металів

**Мета роботи:** ознайомитись з основними методами визначення твердості металів та застосування цих методів на практиці.

### Теоретичні відомості

**Твердість** – це здатність матеріалу чинити опір проникненню в його поверхню стандартного тіла (індентора), що не деформується при випробуванні.

Широке застосування пояснюється тим, що не вимагається спеціальні зразки.

Це неруйнуючий метод контролю. Основний метод оцінки якості при термічній обробці виробу. Про твердість судять або по глибині проникнення індентора (метод Роквелла), або по величині відбитка від вдавлювання (методи Брінелля, Віккерса, мікротвердості).

У всіх випадках відбувається пластична деформація матеріалу. Чим більше опір матеріалу пластичній деформації, тим вище твердість.

Від твердості значною мірою залежить міцність деталі і стійкість поверхні її до спрацювання. На твердість випробовують усі відповідальні деталі. Для двигунів внутрішнього згоряння випробовують поршні, поршневі пальці, шатуни, шатунні болти, колінчасті вали, клапани та інші деталі.

На практиці найпоширенішими є такі методи визначення твердості металів: вдавлювання сталеві кульки (метод Брінелля); Вдавлювання алмазного конуса (метод Роквелла); Вдавлювання алмазної піраміди (метод Віккерса). Схеми випробувань представлені на рис. 1.

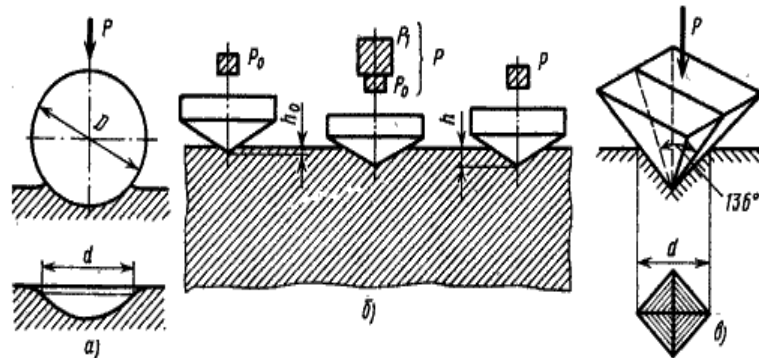


Рис. 1. Схеми визначення твердості: а – за Брінеллем; б – за Роквеллом; в – за Віккерсом

## 1. Твердість за Брінеллем (ГОСТ 9012)

Випробування проводять на твердомірі Брінелля (рис. 1 а)

Як індентор використовується сталева загартована кулька діаметром  $D$  2,5; 5; 10 мм, залежно від товщини виробу.

Навантаження  $P$ , залежно від діаметра кульки і твердості, що вимірюється: для термічно обробленої сталі і чавуна –  $P = 30D^2$ , литої бронзи і латуні –  $P = 10D^2$ , алюмінія і інших дуже м'яких металів –  $P = 2,5D^2$ .

Тривалість витримки  $t$ : для сталі і чавуна – 10 с, для латуні і бронзи – 30 с.

Отриманий відбиток вимірюється в двох напрямках за допомогою лупи Брінелля.

Для випробування твердості металів за цим методом застосовують прилад типу ТШ (твердомір кульковий). До нього додаються загартовані кульки з легованої сталі таких діаметрів: 2,5; 5; 10 мм (табл. 1).

Таблиця 1

Вибір діаметра кульки і навантажень залежно від товщини зразка

| Товщина зразка, мм | Діаметр кульки, мм | Навантаження, Н                  |                                   |                                      |
|--------------------|--------------------|----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|
|                    |                    | $30D^2$<br>для сталі<br>й чавуну | $10D^2$<br>для латуні<br>й бронзи | $2,5D^2$<br>для м'яких<br>матеріалів |
| Понад 6            | 10                 | 30 000                           | 10 000                            | 2500                                 |
| Від 6 до 3         | 5                  | 7500                             | 2500                              | 625                                  |
| Менше ніж 2,5      | 2,5                | 1875                             | 625                               | 156                                  |

За методом Брінелля випробовують незагартовані вироби (твердість яких не перевищує 450 HB), оскільки при випробуванні матеріалів з більшою твердістю сталевий кулька при вдавлюванні деформуватиметься і результати дослідів будуть неправильними (неточними). Схему вдавлювання зображено на рис. .

Унаслідок вдавлювання на поверхні зразка утворюється заглибина — відбиток з діаметром  $D$ , мм.

Діаметр відбитка вимірюють бінокулярним мікроскопом МПБ-2 (рис.). Цей мікроскоп застосовують для вимірювання відбитків при випробуванні кульками діаметром 5 і 10 мм. Мікроскоп МПБ-2 вимірює відбиток з точністю до 0,05 мм (див. рис.), оптична система збільшує його в 24 рази. Для вимірювання відбитків, зроблених кулькою діаметром 2,5 мм, слід застосовувати мікроскоп з точністю вимірювання до 0,01 мм.

Твердість на приладі ТП-2 визначають у такій послідовності: користуючись табл., вибрати відповідний режим випробування — діаметр  $D$  навантаження  $P$  Кульки і тривалість витримки  $T$ ; Встановити відповідно до навантаження тягарі на підвіску; закріпити кулькотримач з відповідним діаметром кульки; покласти зразок на предметний столик, підвести його до зіткнення з кулькою і ввімкнути прилад; після зняття зразка виміряти мікроскопом МПБ-2 (або лупою зі шкалою поділок десятих міліметра); розрахувати число твердості за Брінеллем як відношення прикладеного навантаження  $P$  до сферичної поверхні відбитка  $F$ :

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

Стандартними умовами є  $D = 10$  мм;  $P = 3000$  кгс;  $\tau = 10$  с. В цьому випадку твердість за Брінеллем позначається HB 250.

Таблиця 2

Числа твердості за HB

| Діаметр відбитка, мм | Число твердості при навантаженні $P$ , Н |         |          | Діаметр відбитка, мм | Число твердості при навантаженні $P$ , Н |         |          |
|----------------------|------------------------------------------|---------|----------|----------------------|------------------------------------------|---------|----------|
|                      | $30D^2$                                  | $10D^2$ | $2,5D^2$ |                      | $30D^2$                                  | $10D^2$ | $2,5D^2$ |
| 2,90                 | 4440                                     | —       | —        | 3,30                 | 3400                                     | 1140    | 384      |
| 2,95                 | 4300                                     | —       | —        | 3,35                 | 3320                                     | 1100    | 276      |
| 3,00                 | 4150                                     | —       | 346      | 3,40                 | 3210                                     | 1070    | 267      |
| 3,05                 | 4010                                     | —       | 334      | 3,45                 | 3110                                     | 1040    | 259      |
| 3,10                 | 3880                                     | 1290    | 323      | 3,50                 | 3020                                     | 1010    | 252      |
| 3,15                 | 3750                                     | 1250    | 313      | 3,55                 | 2930                                     | 977     | 245      |
| 3,20                 | 3630                                     | 1210    | 303      | 3,60                 | 2860                                     | 950     | 237      |
| 3,25                 | 3520                                     | 1170    | 293      | 3,65                 | 2770                                     | 923     | 231      |

Залежність між діаметром відбитка і числом твердості за Брінеллем (діаметри відбитка подано для кульки діаметром 10 мм) наведено в табл. 2.

Для визначення числа твердості HB при випробуванні кулькою діаметром 5 мм діаметр відбитка потрібно помножити на 2, а при випробуванні кулькою діаметром 2,5 мм — на 4, а потім знайти в таблиці 2 відповідну твердість.

## 2. Метод Роквелла ГОСТ 9013

Заснований на вдавлюванні в поверхню наконечника під певним навантаженням (рис. 1,б).

Індентор для м'яких матеріалів (до HB 230) – сталева кулька діаметром  $\varnothing 1,6$  мм, для більш твердих матеріалів – конус алмазний.

Навантаження здійснюється в два етапи. Спочатку прикладається попереднє навантаження  $P_0$  (10 кгс) для щільного зіткнення наконечника із зразком. Потім прикладається основне навантаження  $P_1$ , протягом деякого часу діє загальне робоче навантаження  $P$ . Після зняття основного навантаження визначають значення твердості по глибині залишкового вдавлювання наконечника  $h$  під навантаженням  $P_0$ .

**Метод Роквелла.** Цей метод застосовують для визначення твердості загартованих сталей та інших матеріалів, які мають високу твердість  $>450$  HB. За методом Роквелла твердість визначають вдавлюванням твердосплаву або наконечника з алмазним конусом із кутом при вершині  $120^\circ$  або зі сталевою кулькою діаметром 1,59 мм. Кулькою користуються при випробуванні м'яких сталей (до 220 HB) при навантаженні 981 Н (100 кгс). Зразок кладуть на стіл твердоміра і обертаючи гайки з трьома ручками піднімають його до дотику з алмазним конусом або сталевою кулькою. Обертання гайки продовжують до утворення тиску на зразок 98 Н (10 кгс) — попереднє навантаження, що показує маленька стрілка на циферблаті індикатора (шкала твердості), тобто маленька стрілка має зупинитися навпроти точки (вертикально). При цьому велика стрілка має стати майже вертикально. Обертаючи барабан встановити «0» шкали навпроти кінця великої стрілки. Циферблат має дві шкали: червону «В» — для випробування кулькою і чорну «С» і «А» — для випробування відповідно твердосплавом і алмазним конусом. Шкалою «В» користуються при вимірюванні твердості м'яких металів з твердістю 60...230 HB (незагартовані сталі, кольорові метали та їхні сплави); шкалою «С» при вимірюванні 230...700 HB (загартованих сталей) і шкалою «А» — з твердістю понад 700 HB (після хіміко-термічної обробки і твердих сплавів).

Ввімкнути електродвигун, повернувши ручку тумблера вгору. Після цього вимкнути механізм навантаження плавним коротким натисканням на клавішу. Простежити за відхиленням великої стрілки, а після її зупинення прочитати число твердості на відповідній шкалі.

**Позначення твердості записують так:** 35 HRB — випробування кулькою; 42 HRC — випробування конусом із твердого сплаву; 84 HRA — випробування алмазним конусом.

Залежно від природи матеріалу використовують три шкали твердості (таблиця 3).

Таблиця 3  
Шкали для визначення твердості за Роквеллом

| Шкала | Обозначение | Индентор                         | Нагрузка, кг |     |     | Область применения                  |
|-------|-------------|----------------------------------|--------------|-----|-----|-------------------------------------|
|       |             |                                  | P0           | P1  | P2  |                                     |
| A     | HRA         | Алмазный конус < 1200            | 10           | 50  | 60  | Для особо твёрдых материалов        |
| B     | HRB         | Стальной закаленный шарик Ø1/16" | 10           | 90  | 100 | Для относительно мягких материалов  |
| C     | HRC         | Алмазный конус < 1200            | 10           | 140 | 150 | Для относительно твёрдых материалов |

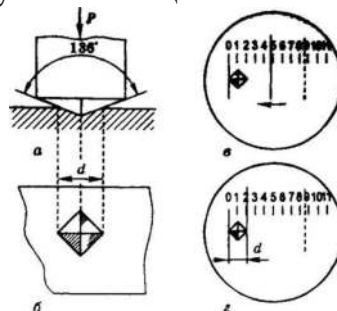
На твердість за Роквеллом випробовують шийки колінчастих валів, поршневі пальці, інструменти, тверді сплави (на різцях) та інші деталі.

### 3. Метод Віккерса

Твердість визначається за величиною відбитка (рис. 1 в).

Як індентор використовується алмазна чотириохгранна піраміда з кутом при вершині 136°.

**Метод Віккерса** застосовують для визначення твердості твердих металів і сплавів, а також надто малих деталей і тонких поверхневих шарів після цементації, азотування, ціанування тощо.



Метод Віккерса полягає в тому, що алмазний наконечник, який має форму правильної чотиригранної піраміди, вдавлюють у зразок (деталь) під дією навантаження  $F$  ( $P$ ). Потім вимірюють діагональ відбитка  $d$ , який залишається після зняття навантаження. Навантаження  $F$  ( $P$ ) може змінюватися від 9,8 (1) до 980 Н.

Твердість розраховується як відношення прикладеного навантаження  $P$  до площі поверхні відбитка  $F$ :

$$HV = \frac{P}{F} = \frac{2P \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = 1,8544 \frac{P}{d^2}$$

Навантаження  $P$  складає 5...100 кгс. Діагональ відбитка  $d$  вимірюється за допомогою мікроскопа, встановленого на приладі.

Число твердості за Віккерсом (HV) визначають за спеціальними таблицями, в яких наведено значення діагоналі  $d$  відбитка, визначене в міліметрах.

Перевага даного способу в тому, що можна виміряти твердість будь-яких матеріалів, тонкі вироби, поверхневі шари. Висока точність і чутливість методу.

*Спосіб мікротвердості* – для визначення твердості окремих структурних складових і фаз сплаву, дуже тонких поверхневих шарів (соті частки міліметра).

Аналогічний способу Віккерса. Індентор – піраміда малих розмірів, навантаження при вдавлюванні  $P$  складають 5...500 кгс

$$H_{200} = 1,854 \frac{P}{d^2}$$

## Практична робота № 8

### Діаграма стану Fe – Fe<sub>3</sub>C (залізо – цементит)

**Мета роботи:** закріпити теоретичні знання по фазах та структурних складових, навчитися практично користуватися діаграмою стану.

#### Теоретичні відомості

**Діаграмою стану** називають графічне зображення фаз та структурних складових в координатах “температура – концентрація”.

**Компонентами** системи Fe-Fe<sub>3</sub>C є залізо Fe і вуглець C.

**Фазою** називають відокремлену частину системи, яка має свою структуру, хімічний склад, властивості і відокремлена від решти системи поверхнею розділу. Розрізняють такі фази в системі Fe-Fe<sub>3</sub>C:

**Структурою** називають форму, розміри та розташування фаз у системі.

**L (ліква)** – розчин вуглецю в розплавленому залізі.

**Ф (ферит)** – твердий розчин проникнення вуглецю в  $\alpha$ -залізі з структурою ОЦК і розчинністю від 0% до 0,02%. Ферит має невисоку твердість і високу пластичність.

**Ф<sup>δ</sup> (ферит δ)** – твердий розчин проникнення вуглецю в  $\delta$ -залізі з структурою ОЦК і розчинністю від 0% до 0,1%.

**А (аустеніт)** – твердий розчин проникнення вуглецю в  $\gamma$ -залізі з структурою ГЦК і розчинністю від 0% до 2,14%. Аустеніт парамагнітний, пластичний, має низьку міцність і твердість.

**Ц (цементит)** - хімічне з’єднання заліза з вуглецем – карбід заліза (Fe<sub>3</sub>C), містить 6,67% C. Температура плавлення цементиту – 1260°C. Цементит має дуже високу твердість та крихкість.

Існують різновиди цементиту:

**Ц<sub>I</sub>** - виділяється при кристалізації з рідкої фази у всіх залізовуглецевих сплавах, які містять вуглецю більше 4,3%;

**Ц<sub>II</sub>** - виділяється при вторинній кристалізації з аустеніту внаслідок зменшення розчинності вуглецю в  $\gamma$ -залізі при зниженні температури від 1147°C до 727°C;

**Ц<sub>III</sub>**- виділяється з фериту внаслідок зменшення розчинності вуглецю в  $\alpha$ -залізі при зниженні температури від 727°C до кімнатної;

**Структурними складовими** називають частину системи, що містить дві і більше фаз. В системі Fe-Fe<sub>3</sub>C розрізняють такі структурні складові.

**П (перліт)** – евтектоїдна механічна суміш, яка складається з дрібних різних за розміром пластинок цементиту в феритній основі. Вміст вуглецю становить 0,8%. Утворюється при розпаді аустеніту визначеного складу при температурі 727°C. Структура має перламутровий блиск.

**Л (ледебурит)** – евтектична механічна суміш цементиту і аустеніту, містить 4,3% вуглецю. При температурі вище 727°C і нижче 1147°C ледебурит називають високотемпературним, він складається з аустеніту і цементиту Ц<sub>I</sub> і позначається як Л<sup>В</sup>. При температурі нижчій 727°C ледебурит називають низькотемпературним, він складається з перліту і цементиту і позначається як Л<sup>Н</sup>.

### Координати точок діаграми Fe-Fe<sub>3</sub>C

| Точка | t,°C | %C    | Визначення точки                            |
|-------|------|-------|---------------------------------------------|
| A     | 1539 | 0     | Температура плавлення заліза                |
| C     | 1147 | 4,3   | Склад евтектики                             |
| D     | 1260 | 6,67  | Температура плавлення цементиту             |
| E     | 1147 | 2,14  | Гранична розчинність вуглецю в γ-залізі     |
| G     | 911  | 0     | Поліморфне перетворення α-заліза в γ-залізо |
| P     | 727  | 0,02  | Гранична розчинність вуглецю в α-залізі     |
| S     | 727  | 0,8   | Евтектоїд не перетворення                   |
| Q     | 20   | 0,006 | Мінімальна розчинність вуглецю в α-залізі   |

### Основні лінії діаграми:

Лінія ABCD – лінія ліквідус. Вище цієї лінії всі сплави знаходяться в рідкому стані.

Лінія AHJECF – лінія солідус. Нижче цієї лінії всі сплави знаходяться в твердому стані.

### Лінії поліморфного перетворення:

Вуглець розчиняючись в поліморфній модифікації α-заліза знижує температуру поліморфного перетворення від 911°C до 727°C.

GS і GP – лінії нижнього поліморфного перетворення.

NN, JN – лінії верхнього поліморфного перетворення.

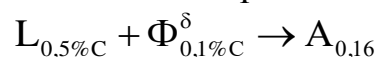
### Лінії змінного розчинення вуглецю в поліморфних модифікаціях:

ES – max 2,14% C                      min 0,8% C;

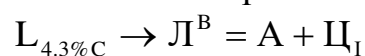
GP – max 0,02% C                      min 0,006% C;

### Лінії ізотермічного перетворення:

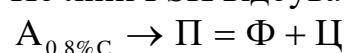
По лінії JNB при 1499°C відбувається перитектичне перетворення:



По лінії ECF при 1147°C відбувається евтектичне перетворення



По лінії PSK відбувається евтектоїд не перетворення



**Критичними точками** називаються температури, при яких відбуваються фазові та структурні перетворення в сплавах системи “Fe-Fe<sub>3</sub>C”. Позначаються буквою A (arret – зупинка (фран.)).

$A_0$  – цементит переходить з феромагнітного стану в парамагнітний;

$A_1$  – знаходяться на лінії PSK, при температурі 727°C аустеніт розпадається з утворенням перліту;

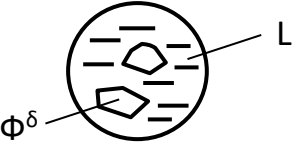
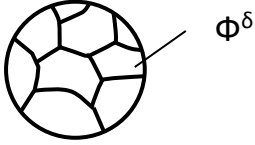
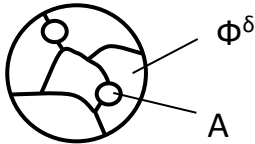
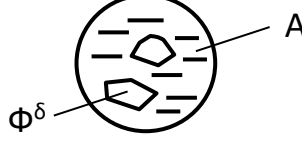
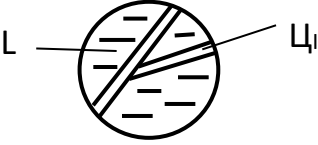
$A_2$  – знаходяться на лінії MO, при температурі 768°C залізо із феромагнітного стану переходить в парамагнітний;

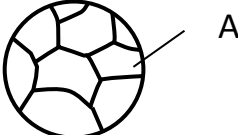
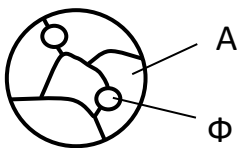
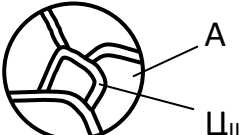
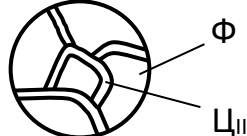
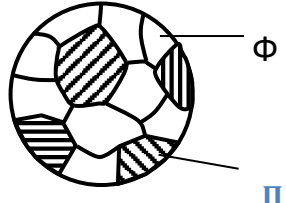
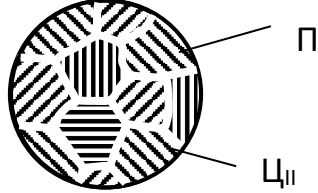
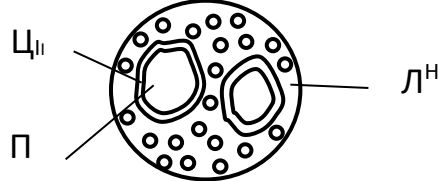
$A_3$  – знаходяться на лінії GS, відбувається перетворення аустеніту в ферит;

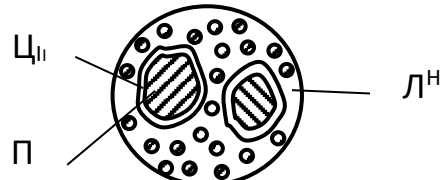
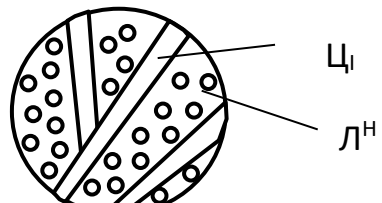
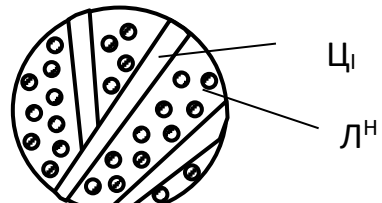
$A_{cm}$  – знаходяться на лінії SE, початок виділення цементиту вторинного.

При нагріві через тепловий гістерезис додають букву с ( $A_{c1}$ ,  $A_{c3}$ ), при охолодженні r ( $A_{r1}$ ,  $A_{r3}$ ).

Структурний аналіз областей діаграми

| Область | Фази, структурні складові  | Схематичне зображення структури                                                       |
|---------|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| ABH     | $L + \Phi^\delta$          |     |
| AHN     | $\Phi^\delta$              |  |
| HJN     | $\Phi^\delta + A$          |  |
| BCEJ    | $L \rightarrow A$          |   |
| DFC     | $L \rightarrow \text{Ц}_I$ |   |

|          |                                       |                                                                                       |
|----------|---------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| JESGN    | A                                     |     |
| GPQ      | $\Phi$                                |    |
| GSP      | A+ $\Phi$                             |     |
| EE'S     | A+ $\mathbb{L}_{II}$                  |    |
| PP'Q     | $\Phi$ + $\mathbb{L}_{III}$           |  |
| PSS'P'   | $\Phi + \Pi$                          |   |
| SE'E''S' | $\Pi$ + $\mathbb{L}_{II}$             |   |
| ECC'E'   | A+ $\mathbb{L}_{II}$ + $\mathbb{L}^B$ |   |

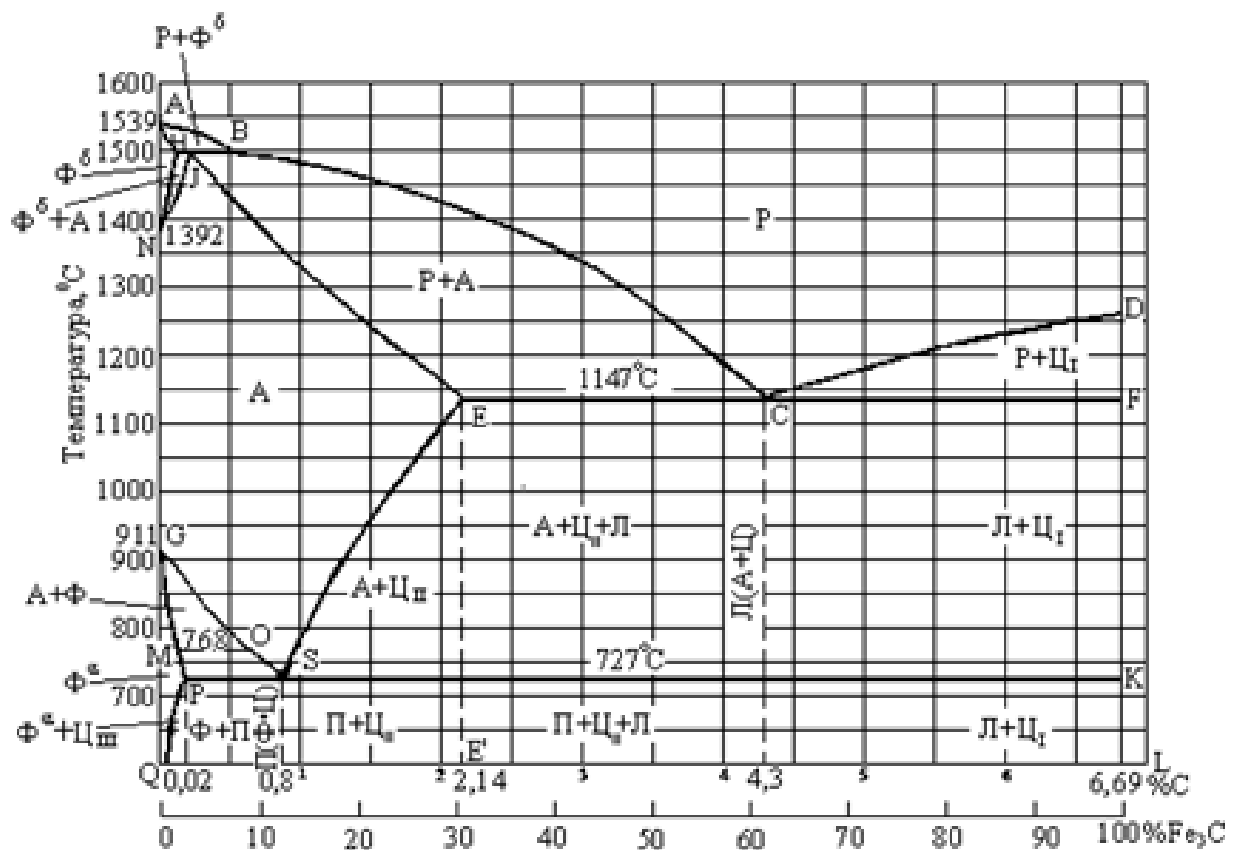
|            |                                                    |                                                                                    |
|------------|----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| E'C'C''E'' | $\Pi + \text{Ц}_{\text{II}} + \text{Л}^{\text{H}}$ |  |
| CFKC'      | $\text{Ц}_I + \text{Л}^{\text{B}}$                 |  |
| C'KLC''    | $\text{Ц}_I + \text{Л}^{\text{H}}$                 |  |

**Кінцевий структурний стан** сплаву визначається фазами та структурними складовими в області діаграми, яка відповідає заданій концентрації вуглецю при температурі 600°C.

**Число ступенів вільності** визначають згідно з правилом фаз  $C = K + 1 - \Phi$ , де  $K = 2$  – число компонентів,  $\Phi$  – число фаз.

З допомогою **правила відрізків** визначимо кількість фаз:

$$m_L = \frac{l}{l + S} 100\%, \quad m_A = \frac{S}{l + S} 100\%.$$



## ЗАВДАННЯ

**Завдання 1А.**

Для вказаного хімічного елемента (табл.1) задано тип і параметри кристалічної ґратки (КГ), атомну масу і густину, визначену експериментально. Потрібно:

- зобразити елементарну комірку КГ;
- дати визначення таких понять як координаційне число, базисне число та щільність пакування;
- визначити ці величини для заданого типу КГ;
- обчислити з точністю до третього знака після коми густину за атомною масою і параметрами КГ та порівняти одержане значення з заданим.

Навести можливі причини розбіжностей.

Таблиця 1

Параметри кристалічних ґраток, атомна маса та густина хімічних елементів

(1 а.о.м. =  $1,66 \cdot 10^{-24}$  г;  $1 \text{ \AA} = 10^{-8}$  см)

| Варіан | Елемент  | Хімічний знак | Модифікація | Тип КГ | Період, $\text{\AA}$ |        | Атомна маса | Густина, г/см <sup>3</sup> |
|--------|----------|---------------|-------------|--------|----------------------|--------|-------------|----------------------------|
|        |          |               |             |        | а                    | с      |             |                            |
| 1      | Алюміній | Al            | —           | ГЦК    | 4,0414               | —      | 26,97       | 2,70                       |
| 2      | Ванадій  | V             | —           | ОЦК    | 3,0338               | —      | 50,95       | 6,02                       |
| 3      | Вольфрам | W             | —           | ОЦК    | 3,1586               | —      | 183,92      | 19,34                      |
| 4      | Гафній   | Hf            | —           | ГЩС    | 3,200                | 5,077  | 178,6       | 13,3                       |
| 5      | Залізо   | Fe            | $\alpha$    | ОЦК    | 2,8664               | —      | 55,85       | 7,874                      |
| 6      | Залізо   | Fe            | $\gamma$    | ГЦК    | 3,600                | —      | 55,85       | 8,1                        |
| 7      | Золото   | Au            | —           | ГЦК    | 4,070                | —      | 197,2       | 19,31                      |
| 8      | Іридій   | Ir            | —           | ГЦК    | 3,8312               | —      | 198,1       | 22,4                       |
| 9      | Ітрій    | Y             | —           | ГЩС    | 3,663                | 5,814  | 88,92       | 4,57                       |
| 10     | Кадмій   | Cd            | —           | ГЩС    | 2,9731               | 5,6069 | 112,41      | 8,64                       |
| 11     | Калій    | K             | —           | ОЦК    | 5,333                | —      | 39,096      | 0,86                       |
| 12     | Кальцій  | Ca            | $\alpha$    | ГЦК    | 5,560                | —      | 40,08       | 1,55                       |
| 13     | Кальцій  | Ca            | $\gamma$    | ГЩС    | 3,94                 | 6,46   | 40,08       | 1,53                       |
| 14     | Кобальт  | Co            | $\alpha$    | ГЩС    | 2,507                | 4,072  | 58,94       | 8,8                        |
| 15     | Кобальт  | Co            | $\beta$     | ГЦК    | 3,545                | —      | 58,94       | 8,8                        |
| 16     | Лантан   | La            | $\alpha$    | ГЩС    | 3,75                 | 6,06   | 138,92      | 6,15                       |
| 17     | Лантан   | La            | $\beta$     | ГЦК    | 5,296                | —      | 138,92      | 6,2                        |
| 18     | Магній   | Mg            | —           | ГЩС    | 3,2022               | 5,1991 | 24,32       | 1,76                       |
| 19     | Літій    | Li            | —           | ОЦК    | 3,5019               | —      | 6,94        | 0,53                       |

| Варіант | Елемент   | Хімічний знак | Модифікація | Тип КГ | Період, А |        | Атомна маса | Густина, г/см <sup>3</sup> |
|---------|-----------|---------------|-------------|--------|-----------|--------|-------------|----------------------------|
|         |           |               |             |        | а         | с      |             |                            |
| 20      | Мідь      | Cu            | —           | ГЦК    | 3,6080    | —      | 63,54       | 8,93                       |
| 21      | Молібден  | Mo            | —           | ОЦК    | 3,1403    | —      | 95,95       | 10,2                       |
| 22      | Натрій    | Na            | —           | ОЦК    | 4,2820    | —      | 22,997      | 0,98                       |
| 23      | Неодим    | Nd            | α           | ГЦС    | 3,657     | 5,88   | 144,27      | 7,0                        |
| 24      | Нікель    | Ni            | —           | ГЦК    | 3,5169    | —      | 58,69       | 8,8                        |
| 25      | Ніобій    | Nb            | —           | ОЦК    | 3,2941    | —      | 92,91       | 8,50                       |
| 26      | Осмій     | Os            | —           | ГЦС    | 2,7298    | 4,3104 | 190,2       | 22,48                      |
| 27      | Паладій   | Pd            | —           | ГЦК    | 3,8905    | —      | 106,7       | 11,5                       |
| 28      | Платина   | Pt            | —           | ГЦК    | 3,9158    | —      | 195,23      | 21,4                       |
| 29      | Празеодим | Pr            | —           | ГЦС    | 3,657     | 5,924  | 140,92      | 6,47                       |
| 30      | Реній     | Re            | —           | ГЦС    | 2,7553    | 4,4493 | 183,91      | 21,2                       |
| 31      | Родій     | Rh            | —           | ГЦК    | 3,7956    | —      | 102,91      | 12,3                       |
| 32      | Рубідій   | Rb            | —           | ОЦК    | 5,62      | —      | 85,48       | 1,52                       |
| 33      | Свинець   | Pb            | —           | ГЦК    | 4,9497    | —      | 207,21      | 11,34                      |
| 34      | Срібло    | Ag            | —           | ГЦК    | 4,0778    | —      | 107,88      | 10,5                       |
| 35      | Стронцій  | Sr            | —           | ГЦК    | 6,075     | —      | 87,63       | 2,63                       |
| 36      | Тантал    | Ta            | —           | ОЦК    | 3,2959    | —      | 180,88      | 16,2                       |
| 37      | Титан     | Ti            | α           | ГЦС    | 2,953     | 4,729  | 47,90       | 4,51                       |
| 38      | Титан     | Ti            | β           | ОЦК    | 3,320     | —      | 47,90       | 4,32                       |
| 39      | Торій     | Th            | —           | ГЦК    | 5,077     | —      | 232,02      | 11,02                      |
| 40      | Хром      | Cr            | α           | ОЦК    | 2,8786    | —      | 52,01       | 7,19                       |
| 41      | Церій     | Ce            | —           | ГЦК    | 5,143     | —      | 140,13      | 6,80                       |
| 42      | Цинк      | Zn            | —           | ГЦС    | 2,6595    | 4,9368 | 65,38       | 7,15                       |
| 43      | Цирконій  | Zr            | α           | ГЦС    | 3,223     | 5,123  | 91,22       | 6,45                       |
| 44      | Цирконій  | Zr            | β           | ОЦК    | 3,610     | —      | 91,22       | 6,36                       |
| 45      | Скандій   | Sc            | —           | ГЦС    | 3,308     | 5,265  | 45,10       | 3,00                       |
| 46      | Уран      | U             | γ           | ОЦК    | 3,462     | —      | 238,03      | 19,05                      |
| 47      | Барій     | Ba            | —           | ОЦК    | 5,010     | —      | 137,34      | 3,65                       |
| 48      | Гадоліній | Gd            | —           | ГЦС    | 3,636     | 5,7826 | 157,25      | 7,868                      |
| 49      | Гольмій   | Ho            | —           | ГЦС    | 3,5773    | 5,6158 | 164,94      | 8,799                      |
| 50      | Диспрозій | Dy            | —           | ГЦС    | 3,5903    | 5,6475 | 162,46      | 8,565                      |

### **Завдання 1Б.**

Для вказаного хімічного елемента (табл.1) задано тип і параметри кристалічної ґратки (КГ), атомну масу і густину, визначену експериментально. Потрібно:

- зобразити елементарну комірку КГ;
- дати визначення таких понять як координаційне число, базисне число та щільність пакування;
- визначити ці величини для заданого типу КГ;
- обчислити з точністю до третього знака після коми масу куска металу, що містить  $10^{25}$  елементарних комірок за відомим базисним числом КГ і атомною масою, а також за заданими параметрами КГ і густиною. Одержані результати порівняти.

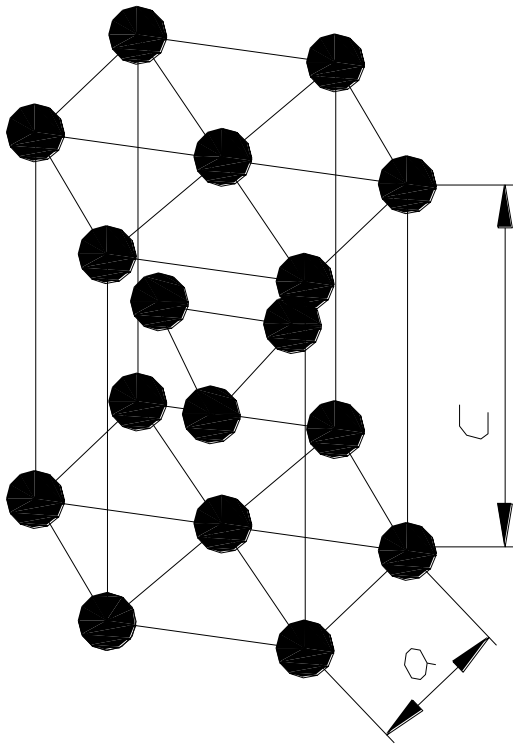
## – ПРИКЛАДИ ВИКОНАННЯ ЗАВДАННЯ

### Завдання 1

| Елемент | Хім. знач. | Модифікація | Тип КГ | Період, Å |       | Атомна маса | Густина, г/см <sup>3</sup> |
|---------|------------|-------------|--------|-----------|-------|-------------|----------------------------|
|         |            |             |        | a         | c     |             |                            |
| Берилій | Be         | —           | ГЦС    | 2,281     | 3,576 | 9,013       | 1,848                      |
| Барій   | Ba         | —           | ОЦК    | 5,010     | —     | 137,34      | 3,65                       |

### Завдання 1А.

1. Зобразимо ГЦС КГ берилію.



а) Визначимо об'єм елементарної комірки. ( $1\text{Å}=10^{-8}\text{см}$ )

$$V = 6 \cdot \frac{1}{2} \cdot a \cdot a \cdot \sin 60^\circ \cdot c =$$

$$= \frac{6}{2} \cdot 2,281^2 \cdot 3,576 \cdot 0,866 \cdot 10^{-24} =$$

$$= 48,338 \cdot 10^{-24} \text{ см}^3;$$

б) Визначимо масу атомів Be в елементарній комірці, враховуючи, що для ГЦС базисне число рівне 6.

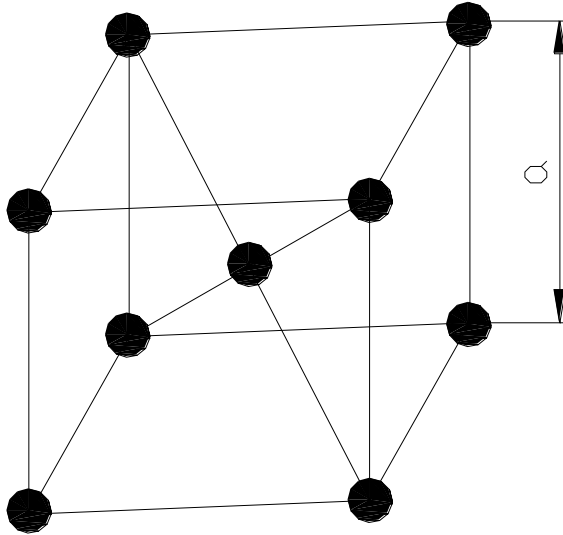
$$M = 6 \cdot 9,013 \cdot 1,66 \cdot 10^{-24} = 89,769 \cdot 10^{-24} \text{ г.}$$

в) Знаходимо рентгенівську густину берилію:

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{89,769 \cdot 10^{-24}}{48,338 \cdot 10^{-24}} = 1,857 \frac{\text{г}}{\text{см}^3};$$

Одержаний результат досить добре співпадає з наведеним експериментальним значенням густини. Одержане менше значення наведеної густини пояснюється наявністю порожнин в реальних металах.

2. Зобразимо ОЦК КГ барію:



$$\text{а) } V = a^3 = 5,010^3 \cdot 10^{-24} = 125,752 \cdot 10^{-24} \text{ см}^3;$$

$$\text{б) Базисне число для ОЦК КГ рівне 2. } M = 2 \cdot 137,34 \cdot 1,66 \cdot 10^{-24} = 455,969 \cdot 10^{-24} \text{ г};$$

$$\text{в) } \rho = \frac{M}{V} = \frac{455,969 \cdot 10^{-24}}{125,752 \cdot 10^{-24}} = 3,626 \frac{\text{г}}{\text{см}^3};$$

Завдання 1Б.

1. Зобразимо ГЦС КГ берилію (див. завдання 1А).

а) Визначимо масу куска берилію (з відомим базисним числом і атомною масою):

$$m = 10^{25} \cdot 6 \cdot 9,013 \cdot 1,66 \cdot 10^{-24} = 897,695 \text{ г.}$$

б) Визначимо масу куска берилію за заданою густиною і об'ємом. (Ми беремо об'єм елементарної комірки з завдання 1А, а студенту його потрібно знайти)

$$m = \rho \cdot V = 1,848 \cdot 10^{25} \cdot 48,338 \cdot 10^{-24} = 893,286 \text{ г}$$

Одержані значення непогано співпадають.

2. Зобразимо ОЦК КГ барію. (див. завдання 1А).

$$\text{а) } m = 10^{25} \cdot 2 \cdot 137,34 \cdot 1,66 \cdot 10^{-24} = 4559,688 \text{ г.}$$

$$\text{б) } m = \rho \cdot V = 3,65 \cdot 10^{25} \cdot 125,752 \cdot 10^{-24} = 4589,948 \text{ г}$$

Одержані результати задовільно співпадають.

## Практична робота № 9

### Визначення складу та кількості фаз за діаграмою стану

**Мета роботи:** ознайомитися з діаграмою стану Fe-Fe<sub>3</sub>C та навчитися визначати склад та кількість фаз за діаграмою стану

### Теоретичні відомості

Діаграму стану (ДС) можна акуратно в масштабі вручну скопіювати або скористатися ксерокопією.

Компонентами системи Fe – Fe<sub>3</sub>C є залізо Fe і цементит: (Ц) - карбід заліза Fe<sub>3</sub>C .

Відповіді до завдання 3 (стор.18):

а) Фазою називають відокремлену частину системи, яка має свою, тільки їй притаманну, структуру, і свої властивості. Фаза відмежована від решти системи. Розрізняють такі фази в системі Fe – Fe<sub>3</sub>C .

L – ліква, розчин вуглецю в розплавленому Fe.

A – аустеніт ( $A = Fe_\gamma(C)$ ), що є твердим розчином проникнення C в  $Fe_\gamma$  з структурою ГЦК і розчинністю від 0% до 2,14%.

Ф - ферит ( $\Phi = Fe_\alpha(C)$ ) - твердий розчин C в  $Fe_\alpha$  з структурою ОЦК і розчинністю від 0% до 0,025%.

Ц – цементит ( $C = Fe_3C$ ) - карбід заліза, містить 6,67% C .

Існують різновиди Ц:

Ц<sub>I</sub> - виділяється з лікви;

Ц<sub>II</sub> - виділяється з аустеніту A внаслідок зменшення розчинності C в  $Fe_\gamma(C)$  при зниженні температури від 1147°C до 727°C;

Ц<sub>III</sub>- виділяється з фериту Ф внаслідок зменшення розчинності C в  $Fe_\alpha(C)$  при зниженні температури від 727°C до кімнатної;

б) Структурні складові складаються з кількох (2-х і більше) фаз. В системі Fe –  $Fe_3C$  розрізняють такі структурні складові.

П - перліт (П=Ф+Ц), евтектоїд, може мати пластинчасту або зернисту структуру, містить 0,8% C.

Л - ледебурит, евтектика. При температурі вище 727°C і нижче 1147°C ледебурит називають високотемпературним, він складається з аустеніту і цементиту Ц<sub>I</sub> і позначається як Л<sup>в</sup>=А+Ц<sub>I</sub>. При температурі нижчій 727°C ледебурит називають низькотемпературним, він складається з перліту і цементиту і позначається як Л<sup>н</sup>=П+Ц<sub>I</sub>.

### Завдання.

Для заданої (спрощеної) ДС системи Fe– $Fe_3C$ :

- описати фази системи і показати їх на ДС;
- описати структурні складові системи і показати їх на ДС;
- для заданого сплаву (табл.1) побудувати криву охолодження, вказати на її ділянках фази і число ступенів вільності, а також технічну назву цього сплаву і мікроструктуру;
- для заданої точки (табл.2) з допомогою правила відрізків визначити кількість лікви і аустеніту, або кількість лікви і цементиту, а також технічну назву цього сплаву і мікроструктуру;
- описати суть евтектоїдного і евтектичного перетворення.

Таблиця 1

Завдання для варіантів

| Варіант | До п. “в”,<br>%C | До п. “г” |      |
|---------|------------------|-----------|------|
|         |                  | t, °C     | %C   |
| 1       | 0,02             | 1147      | 2,25 |
| 2       | 0,10             | 1147      | 2,50 |
| 3       | 0,20             | 1147      | 2,75 |
| 4       | 0,30             | 1147      | 3,00 |
| 5       | 0,40             | 1147      | 3,25 |

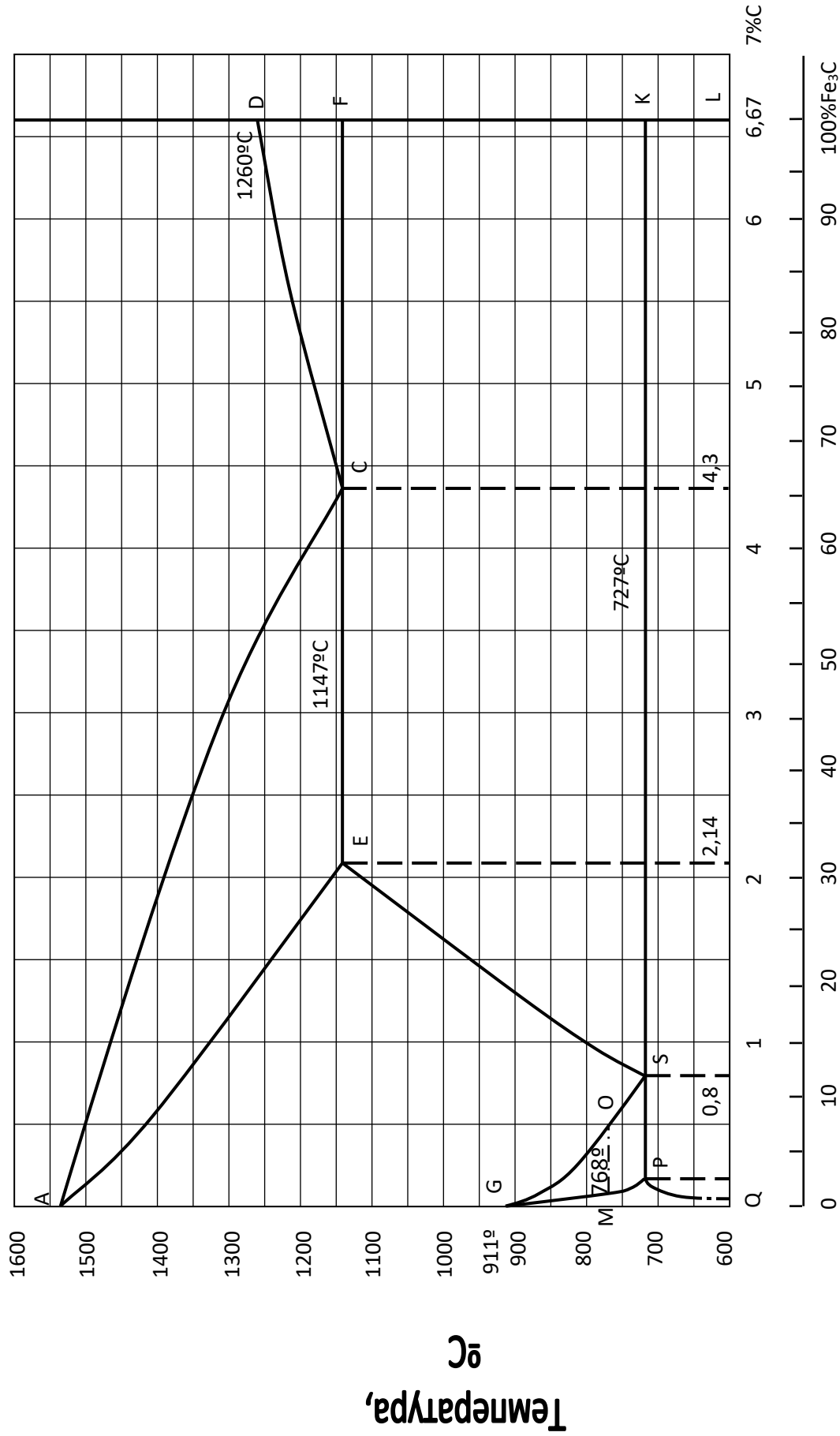
| Варіант | До п. “В”,<br>%C | До п. “Г” |      |
|---------|------------------|-----------|------|
|         |                  | t, °C     | %C   |
| 6       | 0,50             | 1147      | 3,50 |
| 7       | 0,60             | 1147      | 3,75 |
| 8       | 0,70             | 1147      | 4,00 |
| 9       | 0,80             | 1147      | 4,25 |
| 10      | 0,90             | 1200      | 2,00 |
| 11      | 1,00             | 1200      | 2,25 |
| 12      | 1,10             | 1200      | 2,50 |
| 13      | 1,20             | 1200      | 2,75 |
| 14      | 1,30             | 1200      | 3,00 |
| 15      | 1,40             | 1200      | 3,25 |
| 16      | 1,50             | 1200      | 3,50 |
| 17      | 1,60             | 1200      | 3,75 |
| 18      | 1,70             | 1250      | 1,75 |
| 19      | 1,80             | 1250      | 2,00 |
| 20      | 1,90             | 1250      | 2,25 |
| 21      | 2,00             | 1250      | 2,50 |
| 22      | 2,10             | 1250      | 2,75 |
| 23      | 2,20             | 1250      | 3,00 |
| 24      | 2,30             | 1250      | 3,25 |
| 25      | 2,40             | 1300      | 1,50 |
| 26      | 2,50             | 1300      | 1,75 |
| 27      | 2,60             | 1300      | 2,00 |
| 28      | 2,70             | 1300      | 2,25 |
| 29      | 2,80             | 1300      | 2,50 |
| 30      | 2,90             | 1300      | 2,75 |
| 31      | 3,00             | 1350      | 1,25 |
| 32      | 3,10             | 1350      | 1,50 |
| 33      | 3,20             | 1350      | 1,75 |
| 34      | 3,30             | 1350      | 2,00 |
| 35      | 3,40             | 1350      | 2,25 |
| 36      | 3,50             | 1400      | 0,80 |
| 37      | 3,60             | 1400      | 1,00 |
| 38      | 3,70             | 1400      | 1,25 |
| 39      | 3,80             | 1400      | 1,50 |
| 40      | 3,90             | 1450      | 0,50 |
| 41      | 4,00             | 1450      | 0,80 |
| 42      | 4,10             | 1450      | 1,00 |
| 43      | 4,30             | 1147      | 4,50 |
| 44      | 4,50             | 1147      | 5,00 |
| 45      | 4,75             | 1147      | 5,50 |
| 46      | 5,00             | 1147      | 6,00 |

| Варіант | До п. “В”,<br>%C | До п. “Г” |      |
|---------|------------------|-----------|------|
|         |                  | t, °C     | %C   |
| 47      | 5,25             | 1147      | 6,50 |
| 48      | 5,50             | 1200      | 5,50 |
| 49      | 5,75             | 1200      | 6,00 |
| 50      | 6,00             | 1200      | 6,50 |

Таблиця 2

Координати точок на діаграмі стану залізо – Fe<sub>3</sub>C (цементит).

| Точка | t, °C | %C    |
|-------|-------|-------|
| A     | 1539  | 0     |
| E     | 1147  | 2,14  |
| C     | 1147  | 4,3   |
| F     | 1147  | 6,67  |
| P     | 727   | 0,025 |
| S     | 727   | 0,8   |
| Q     | 20    | 0,006 |



Діаграма стану залізо – Fe<sub>3</sub>C (цементит)

## ПРИКЛАДИ ВИКОНАННЯ ЗАВДАННЯ

### Завдання 1

Покажемо фази і структурні складові на ДС;

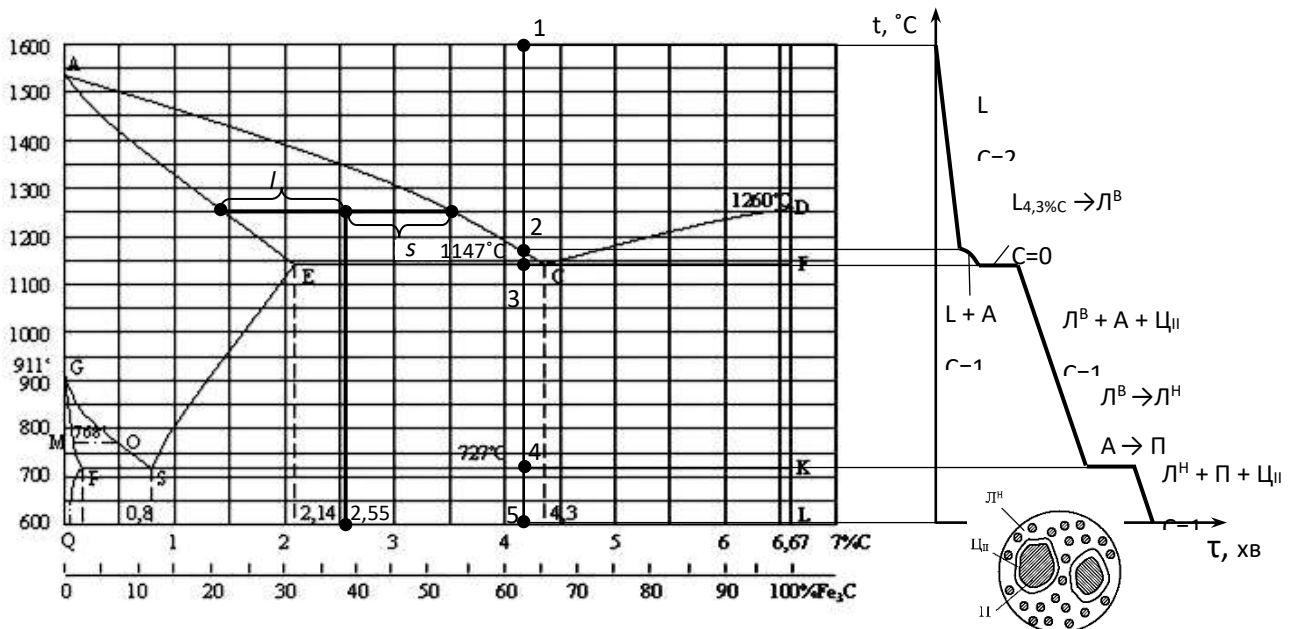
в) Для сплаву з 4,2% С побудуємо криву охолодження, на ділянках якої вкажемо фази, структурні складові, перетворення їх, а також число ступенів вільності згідно з правилом фаз  $C = K + 1 - \Phi$ , де  $K = 2$  – число компонентів,  $\Phi$  – число фаз.

Сплав з 4,2% С є доєвтектичним білим чавуном, мікроструктура якого наведена під кривою охолодження;

г) Для сплаву з 2,55% С при температурі 1250°C з допомогою правила відрізків визначимо кількість лікви і аустеніту, відповідно  $m_L$  і  $m_A$ .

$$m_L = \frac{l}{l+S} = \frac{11}{11+10} \cdot 100\% = 52,4\%; \quad m_A = \frac{S}{l+S} = \frac{10}{11+10} \cdot 100\% = 47,6\%;$$

Рис. 3.1. ДС Fe-Fe<sub>3</sub>C з кривою охолодження для сплаву з 4,2%С

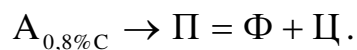


Сплав з 2,55%С є доєвтектичним чавуном, його структура показана на рис.3.1.

д) Евтектичне перетворення відбувається при температурі 1147°C для лікви з 4,3%, яка при відведенні тепла перетворюється в Л<sup>В</sup> згідно:



Евтектоїдне перетворення відбувається при температурі 727°C для аустеніту з 0,8%С, який при відведенні тепла перетворюється в перліт згідно



**Додаток**  
**Схематичне зображення мікроструктур сталей та чавунів**  
**при кімнатній температурі**

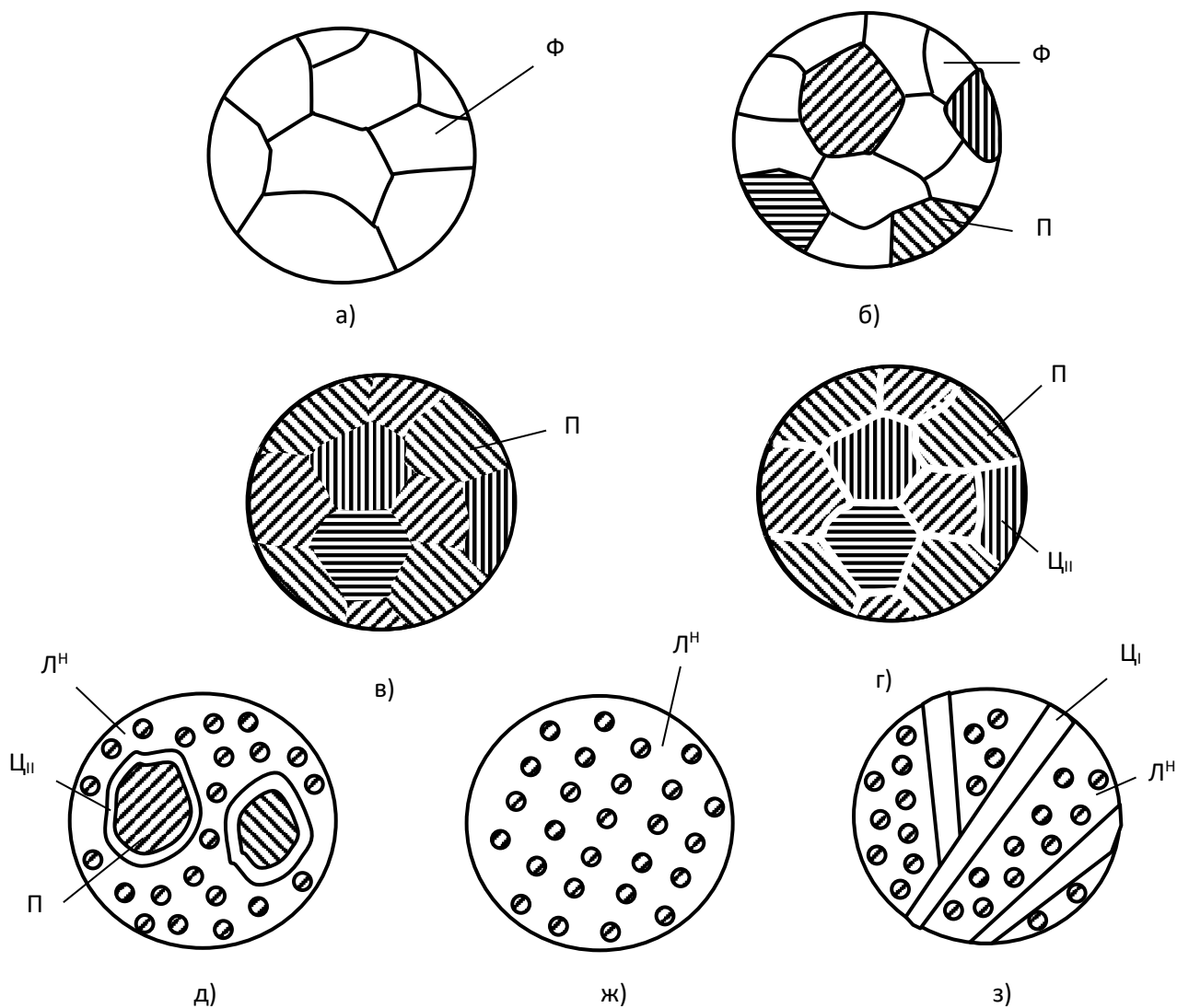


Рисунок. Схематичне зображення мікроструктур сталей та чавунів при кімнатній температурі:

- 1) сталей: а – ферит; б – ферит з перлітом; в – перліт; г – перліт з цементитом вторинним;
- 2) чавунів: д – доевтектичний; ж – евтектичний; з – заевтектичний .  
 Ф – ферит; П – перліт; Ц<sub>I</sub> – цементит первинний; Ц<sub>II</sub> – цементит вторинний; Л<sup>Н</sup> – ледебурит низькотемпературний.

## Практична робота № 10

### Сталі та їх класифікація

**Мета роботи:** вивчення структури вуглецевих сталей в рівноважному стані, визначення марки сталей, встановлення зв'язку між структурою сталі, діаграмою стану Fe – Fe<sub>3</sub>C і властивостями сплавів.

#### Теоретичні відомості

**Вуглецеві сталі** промислового виробництва – це багатокомпонентні сплави, які крім заліза й вуглецю мають домішки марганцю, кремнію, фосфору сірки та деякі інші. Кожен з перелічених компонентів впливає відповідним чином на структуру та властивості сталей. З-поміж них найбільший вплив має вуглець.

#### 1. Вплив вуглецю.

Вплив вуглецю на властивості сталей показаний на рис. 1.

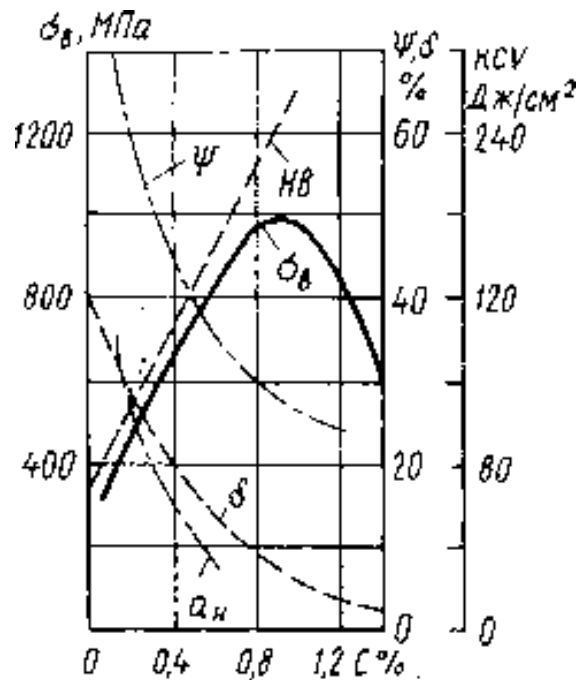


Рис. 1. Вплив вуглецю на властивості сталей

Із зростанням вмісту вуглецю в структурі сталі збільшується кількість цементиту, при одночасному зниженні кількості фериту. Зміна співвідношення між складовими приводить до зменшення пластичності, а також до підвищення міцності і твердості. Міцність підвищується при вмісті вуглецю близько 1%, а потім вона зменшується, оскільки утворюється груба сітка цементиту первинного.

Вуглець впливає на в'язкі властивості. Збільшення вмісту вуглецю підвищує поріг холодоламкості і знижує ударну в'язкість.

Підвищуються електроопір і коерцетивна сила, знижуються магнітна проникність і густина магнітної індукції.

Вуглець впливає і на технологічні властивості. Підвищення вмісту вуглецю погіршує ливарні властивості сталі (використовуються сталі із вмістом вуглецю до 0,4 %), оброблюваність тиском і різанням, зварюваність. Слід враховувати, що сталі з низьким вмістом вуглецю також погано обробляються різанням.

#### 2. Вплив домішок на властивості сталі.

В сталях завжди присутні домішки, які поділяються на три групи.

1. *Постійні домішки:* кремній, марганець, сірка, фосфор.

**Марганець** і **кремній** вводяться в процесі виплавки сталі для розкислювання, вони є технологічними домішками.

Вміст марганцю не перевищує 0,5...0,8 %. Марганець підвищує міцність, не знижуючи пластичності, і різко знижує червоноламкість сталі, викликану впливом сірки. Він сприяє зменшенню вмісту сульфід заліза  $FeS$ , оскільки утворює з сіркою з'єднання сульфід марганцю  $MnS$ . Частинки сульфід марганцю розташовуються у вигляді окремих включень.

Вміст кремнію не перевищує 0,35...0,4 %. Кремній, дегазуючи метал, підвищує густину зливка. Кремній розчиняється у фериті і підвищує міцність сталі, особливо підвищується межа текучості  $\sigma_{0,2}$ , спостерігається деяке зниження пластичності.

Вміст **фосфору** в сталі 0,025...0,045 %. Фосфор, розчиняючись у фериті, спотворює кристалічні грати і збільшує межу міцності  $\sigma_v$  і межу текучості  $\sigma_t$ , але знижує пластичність і в'язкість.

Розташовуючись поблизу зерен, збільшує температуру переходу в крихкий стан, викликає холодоламкість, зменшує розповсюдження тріщин, Підвищення вмісту фосфору на кожну 0,01 % підвищує поріг холодоламкості на 20...25°C.

Фосфор володіє схильністю до ліквації, тому в центрі зливка окремі ділянки мають різко знижену в'язкість.

Для деяких сталей можливо збільшення вмісту фосфору до 0,10...0,15 %, для поліпшення оброблюваної різанням.

**Сірка** – зменшується пластичність, зварюваність і корозійна стійкість. Фосфор – спотворює кристалічні грати.

Вміст сірки в сталях складає 0,025...0,06 %. Сірка – шкідлива домішка, потрапляє в сталь з чавуну. При взаємодії із залізом утворює хімічне з'єднання – сульфід сірки  $FeS$ , яке, у свою чергу, утворює із залізом легкоплавку евтектику з температурою плавлення 988°C. При деформації в місцях розташування евтектики виникають надриви і тріщини, заготовка руйнується – явище червоноламкості.

Червоноламкість – підвищення крихкості при високих температурах

Сірка знижує механічні властивості, особливо ударну в'язкість і пластичність, а також межу витривалості. Вона погіршує зварюваність і корозійну стійкість.

2. *Приховані домішки* - гази (азот, кисень, водень) – потрапляють в сталь при виплавці.

**Азот** і **кисень** знаходяться в сталі у вигляді крихких неметалічних включень: оксидів ( $FeO$ ,  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ) нітридів ( $Fe_2N$ ), у вигляді твердого розчину або у вільному стані, розташовуючись в дефектах (раковинах, тріщинах).

Домішки впровадження (азот  $N$ , кисень  $O_2$ ) підвищують поріг холодоламкості і знижують опір крихкому руйнуванню. Неметалічні включення (оксиди, нітриди), будучи концентраторами напруг, можуть значно знизити межу витривалості і в'язкість.

Дуже шкідливим є розчинений в сталі водень, який значно окрихчує сталь. Він приводить до виникнення внутрішніх тріщин – флокенів.

*Флокени* – тонкі тріщини овальної або округлої форми, що мають в зламі вид плям – пластівців сріблястого кольору.

Метал з флокенами не можна використовувати в промисловості, при зварюванні утворюються холодні тріщини в наплавленому і основному металі.

Для видалення прихованих домішок використовують вакуумування.

**3. Спеціальні домішки** – спеціально вводяться в сталь для отримання заданих властивостей. Домішки називаються легуючими елементами, а сталі – легованими сталями.

### **3. Класифікація вуглецевих сталей.**

**Вуглецеві сталі** класифікують за хімічним складом, за вмістом вуглецю, структурою, якістю, способом виробництва, ступенем окислення, та призначенням.

1. За хімічним складом сталі поділяються: вуглецеві і леговані.
2. За вмістом вуглецю:
  - низьковуглецеві, із вмістом вуглецю до 0,25 %;
  - середньовуглецеві, із вмістом вуглецю 0,3...0,6 %;
  - високовуглецеві, із вмістом вуглецю вище 0,7 %
3. За рівноважною структурою: доєвтектоїдні, евтектоїдні, заєвтектоїдні.
4. За якістю. Критерієм якості є масові частки шкідливих домішок: сірки і фосфору:
  - $0,04 \leq S \leq 0,06\%$  ,  $0,04 \leq P \leq 0,08\%$  – вуглецеві сталі звичайної якості;
  - $P, S = 0,03...0,04\%$  – якісні сталі;
  - $P, S \leq 0,03\%$  – високоякісні сталі.
5. За способом виробництва розрізняють сталі, виплавлені:
  - в мартенівських печах;
  - в кисневих конверторах;
  - в електричних печах: електродугових, індукційних і ін.
6. За ступенем окислення сталі поділяються на:
  - спокійні;
  - напівспокійні;
  - киплячі.
7. За призначенням сталі поділяють:
  - конструкційні – застосовуються для виготовлення деталей машин і механізмів;
  - інструментальні – застосовуються для виготовлення різних інструментів;
  - спеціальні – сталі з особливими властивостями: електротехнічні, з особливими магнітними властивостями і ін.

### **4. Маркування сталей.**

Прийнято буквено-цифрове позначення сталей.

#### **Вуглецеві сталі звичайної якості (ГОСТ 380).**

Сталі містять підвищену кількість сірки і фосфору. Маркуються Ст.2кп., БСт.3кп, ВСт.3пс, ВСт.4сп.

Ст – індекс даної групи сталі. Цифри від 0 до 6 - це умовний номер марки сталі. Із збільшенням номера марки зростає міцність і знижується пластичність сталі. Існує три групи сталей: А, Б і В. Для сталей групи А при поставці гарантуються механічні властивості, в позначенні індекс групи А не вказується.

Для сталей групи Б гарантується хімічний склад. Для сталей групи В при поставці гарантуються і механічні властивості, і хімічний склад.

Індекси кп, пс, сп вказують ступінь розкислення сталі: кп - кипляча, пс – пс - напівспокійна, сп - спокійна.

### **Якісні вуглецеві сталі**

Якісні сталі поставляють з гарантованими механічними властивостями і хімічним складом (група В). Ступінь розкислення, в основному, спокійна.

*Конструкційні якісні вуглецеві сталі* Маркуються двозначним числом, яке вказує середній вміст вуглецю в сотих частках відсотка. Вказується ступінь розкислення, якщо він відрізняється від спокійної. Наприклад, сталь 08 кп, сталь 10 пс, сталь 45. Вміст вуглецю, відповідно, 0,08 %, 0,10 %, 0,45 %.

*Інструментальні якісні вуглецеві сталі* маркуються буквою У (вуглецева інструментальна сталь) і числом, яке вказує вміст вуглецю в десятих частках відсотка. Наприклад, сталь У8, сталь У13. Вміст вуглецю, відповідно, 0,8 % і 1,3 %

*Інструментальні високоякісні вуглецеві сталі.* Маркуються аналогічно якісним інструментальним вуглецевим сталям, тільки вкінці марки ставлять букву А, для позначення високої якості сталі. Наприклад, сталь У10А.

### **Якісні і високоякісні леговані сталі**

Позначення буквено-цифрове. Легуючі елементи мають умовні позначення, Позначаються буквами російського алфавіту.

Позначення легуючих елементів: Х – хром, Н – нікель, М – молібден, В – вольфрам, К – кобальт, Т – титан, А – азот ( вказується в середині марки), Г – марганець, Д – мідь, Ф – ванадій, С – кремній, П – фосфор, Р – бор, Б – ніобій, Ц – цирконій, Ю – алюміній.

### **Леговані конструкційні сталі**

Сталь 15Х25Н19ВС2

На початку марки вказується двозначне число, що показує вміст вуглецю в сотих частках відсотка. Далі перераховуються легуючі елементи. Число, наступне за умовним позначення елемента, показує його вміст у відсотках. Якщо число не вказується, то вміст елемента не перевищує 1,5 %. Для позначення високоякісних легованих сталей вкінці марки вказується буква А.

У вказаній марці сталі міститься 0,15 % вуглецю, 25% хрому, 19 % нікелю, до 1,5% вольфраму, до 2 % кремнію.

### **Леговані інструментальні сталі**

Сталь 9ХС, сталь ХВГ.

На початку марки вказується однозначне число, що показує вміст вуглецю в десятих частках відсотка. При вмісті вуглецю більше 1 %, число не вказується. Далі перераховуються легуючі елементи, з вказівкою їх вмісту. Деякі сталі мають нестандартні позначення.

### **Швидкорізальні інструментальні сталі**

Сталь Р18.

Р – індекс даної групи сталей (від rapid – швидкість). Вміст вуглецю більше 1%. Число показує вміст основного легуючого елемента – вольфраму. Якщо сталі містять легуючі елементи, то їх вміст вказується після позначення відповідного елемента.

У вказаній сталі вміст вольфраму – 18 %.

## Шарикопідшипникові сталі

Сталь ШХ6, сталь ШХ15ГС.

Ш – індекс даної групи сталей. Х – вказує на наявність в сталі хрому. Наступне число показує вміст хрому в десятих частках відсотка, у вказаних сталях, відповідно, 0,6 % і 1,5 %. Також вказуються легуючі елементи, що входять в склад сталі. Вміст вуглецю більше 1 %.

## Завдання

Для заданої марки сталі або сплаву:

- визначити хімічний склад;
- визначити групу за призначенням (конструкційна, інструментальна, з особливими властивостями та ін.);
- вказати галузь використання і особливості термічної обробки;
- оцінити вплив легуючих елементів на механічні властивості та на термічну обробку;
- призначити термічну обробку і описати кінцеву структуру.

| Варіант | Марка сталі чи сплаву | Варіант | Марка сталі чи сплаву |
|---------|-----------------------|---------|-----------------------|
| 1       | Б88                   | 26      | 12Х18Н9               |
| 2       | Б16                   | 27      | ШХ15                  |
| 3       | БрА9ЖЗЛ               | 28      | 60С2Н2А               |
| 4       | БрАЖН10-4-4           | 29      | 25Н25М4Г1             |
| 5       | БрОЦС4-4-2,5          | 30      | АС38ХГМ               |
| 6       | БрО5ЦНС5              | 31      | 40ХГТР                |
| 7       | ЛЦ40Мц3Ж              | 32      | 36Х2Н2МФА             |
| 8       | ЛЖМц59-1-1            | 33      | 20ХГН2МБФ             |
| 9       | МЛ6                   | 34      | 15ХГН2ТА              |
| 10      | МА14                  | 35      | 25ХГМ                 |
| 11      | АЛ19                  | 36      | 14Г2СФБ               |
| 12      | АЛ4                   | 37      | 16Г2САФ               |
| 13      | АК4                   | 38      | Сталь 65              |
| 14      | АЛ33                  | 39      | Сталь 10 кп           |
| 15      | ВТ14                  | 40      | Ст 6                  |
| 16      | ВТ5                   | 41      | ВК10                  |
| 17      | 4Х3ВМФ                | 42      | Т5К12                 |
| 18      | 5ХНВ                  | 43      | ТТ8К6                 |
| 19      | 6Х6В3МФС              | 44      | 9ХС                   |
| 20      | Р9                    | 45      | У12                   |
| 21      | 9ХС                   | 46      | ЮН14ДК25А             |
| 22      | ХН55ВМТКЮ             | 47      | Сталь 30              |
| 23      | 10Х11Н23Т3МР          | 48      | 30ХГС                 |
| 24      | 12Х2МФСР              | 49      | 40ХН2МА               |
| 25      | 10Х17Н13М3Т           | 50      | 12Х18Н10Т             |

## ПРИКЛАДИ ВИКОНАННЯ ЗАВДАННЯ

### Завдання

Для сталі марки 20ХГН2МБФ:

- визначити хімічний склад;
- визначити групу за призначенням (конструкційна, інструментальна, з особливими властивостями та ін.);
- вказати галузь використання і особливості термічної обробки;
- оцінити вплив легуючих елементів на механічні властивості та на термічну обробку;
- призначити термічну обробку і описати кінцеву структуру.

Хімічний склад сталі: 0,15...0,22% C ; 0,5...0,8% Mn; 0,4...0,6% Cr; 1,6...2,0 % Ni; 0,5...0,6% Mo; 0,05...0,10% Nb; 0,01...0,16% V і не більше 0,035 % S і P .

Це конструкційна хромомарганцевонікелева (машинобудівна) цементівна (нітроцементівна) легована сталь. Цементацію (нітроцементацию) деталей з цих сталей застосовують для зміцнення шестерень і валів коробок передач автомобілів, валів і шпинделів верстатів та інших деталей.

Ця сталь використовується в машинобудуванні, верстатобудуванні, автомобілебудуванні для виготовлення відповідальних деталей, які працюють під навантаженням. Деталі, виготовлені з цієї сталі, піддаються хіміко-термічній обробці (цементуванню, нітроцементуванню), після чого їх піддають термічній обробці (загартуванню і низькому відпуску).

Карбідоутворюючі елементи (Cr, Mn, Nb, Mo) зменшують розчинність вуглецю в аустеніті, що сприяє утворенню в цементованому шарі карбідів. Марганець (Mn), хром (Cr), нікель (Ni) і молібден (Mo) підвищують міцність і прогартуваність. Особливо такі легуючі елементи як Ni і Mo підвищують механічні властивості незагартованої серцевини. Ванадій V і ніобій Nb подрібнюють зерно і збільшують ударну в'язкість деталей.

Після цементування проводять загартування з температури 960°C з охолодженням на повітрі і повторне загартування з температури 840°C з охолодженням в оливі, далі проводять низький відпуск (180°C), в результаті чого вони мають твердість на поверхні 58-62 HRC і 30-42 HRC в серцевині. На поверхні деталі в цементованому шарі після термічної обробки утворюється відпущений мартенсит, а серцевина буде мати структуру сорбіту з трооститом.

## Практична робота № 11

### Термічна обробка металів, її види та призначення

**Мета роботи:** вивчення методики призначення режимів відпалу, нормалізації і гартування, придбання практичних навичок проведення різноманітних операцій термічної обробки, дослідження впливу вмісту вуглецю і температури відпуску на твердість загартованої сталі

### Теоретичні відомості

Термічною обробкою сталі називається технологічний процес, який полягає в нагріванні сталі до певної температури, витримки і наступного охолодження з певною швидкістю. При термічній обробці отримують необхідні властивості сталі, змінюючи її структуру без зміни хімічного складу. Біля 40 % сталі, споживаної машинобудуванням для виготовлення деталей машин, приладів, устаткування, піддають різноманітним видам термічної обробки. Оскільки

основними чинниками при термічній обробці є температура і час, то будь-який процес термічної обробки можна подати в цих координатах.

Основні параметри режиму термічної обробки - температура нагрівання ( $t_H$ ), швидкість нагрівання ( $v_H$ ), тривалість витримки при температурі нагрівання ( $t_B$ ) і швидкість охолодження ( $v_o$ ).

Температура нагрівання сплаву при конкретному виді термічної обробки визначається температурами фазових перетворень (критичними температурами) на відповідній діаграмі його стану. Ці критичні температури для кожної стадії позначаються літерою  $A$  з відповідним індексом ( $A_1, A_2, A_3, A_4, A_{cm}$ ). Критичні точки  $A_1$  на лінії  $PSK$  показують перетворення  $A \rightleftharpoons P$  (при охолодженні –  $Ar_1$ ) або  $P \rightleftharpoons A$  (при нагріванні –  $Ac_1$ );  $A_3$  на лінії  $GS$  – початок виділення фериту з аустеніту при охолодженні або кінець його розчинення при нагріванні (відповідно –  $Ar_3$  і  $Ac_3$ );  $A_{cm}$  на лінії  $SE$  – початок виділення цементиту вторинного з аустеніту в заєвтектоїдних сталях при охолодженні або кінець його розчинення при нагріванні (відповідно –  $Ar_{cm}$  і  $Ac_{cm}$ ).

Температура нагрівання при термічній обробці сталі, щоб уникнути її оплавлення, не повинна перевищувати лінії солідуса

Швидкість нагрівання вибирається залежно від ряду чинників: теплопровідності сталі, форми і розмірів деталей, загальної маси деталей, що нагріваються, характеру їх розташування в печі та деяких інших.

Тривалість витримки при заданій температурі нагрівання визначається швидкістю фазових перетворень, що відбуваються в металі. Витримка необхідна для завершення фазових перетворень і вирівнювання температури по об'єму деталі.

Швидкість охолодження обирається залежно від ступеня стійкості переохолодженого аустеніту, обумовленого переважно хімічним складом сталі, а також від необхідних структури і властивостей сплаву. Залежно від швидкості охолодження вуглецевої сталі можуть бути отримані перлітна, сорбітна, троститна або мартенситна структури (рис. 1) з різноманітними властивостями.

Термічна обробка поділяється на власне термічну, хіміко-термічну і деформаційно-термічну. Перша в свою чергу включає чотири основні групи: відпал першого роду, відпал другого роду, гартування, відпуск.

Відпал (*annealing*) п першого роду сприяє усуненню відхилень у структурі сплавів від рівноважного стану, що виникли при литті, деформуванні, механічній обробці, зварюванні й інших технологічних процесах. Розрізняють такі основні види відпалу першого роду: дифузійний, рекристалізаційний, низький.

*Дифузійний*, або *гомогенізувальний*, відпал застосовується для усунення ліквіації, тобто неоднорідності хімічного складу всередині окремих зерен або в об'ємі сплаву, що виникає частіше всього в процесі кристалізації. Він полягає у нагріванні сталі до температур, що значно перевищують критичні (1050 ... 1200 °C), тривалій витримці (10 ... 100 год) і повільному охолодженні (з виключеною пічкою), що забезпечує дифузію нерівномірно розподілених елементів.

Для усунення різноманітних відхилень у структурі сплавів від рівноважного стану, що виникли в результаті наклепу при холодному пластичному деформуванні, застосовується *рекристалізаційний відпал*. Він включає нагрівання металу до температур, що перевищують температуру рекристалізації (для сталі  $T_{рекp} = 0,3 \dots 0,4 T_{пл}$ ), витримку (1 ... 2 год) і повільне охолодження.

*Низький відпал* застосовується для усунення залишкових внутрішніх напружень, що виникають, наприклад, у зоні термічного впливу при зварюванні виробів внаслідок нерівномірного охолодження виливків або зрізання окремих об'ємів металу при механічній обробці і порушення врівноважених напружень між окремими частинами деталі. Він включає нагрівання металу до температур 150 ... 700°C, витримку і наступне повільне охолодження.

Відпал другого роду (фазова перекристалізація) – термічна обробка, що включає нагрівання сталі до температур, що перевищують  $A_{c1}$  або  $A_{c3}$ , витримку і повільне охолодження, що має за мету забезпечення фазових перетворень і досягнення практично рівноважних (відповідно до діаграми стану системи Fe – Fe<sub>3</sub>C) фазового і структурного станів. Після відпалу структура сталей така: доєвтектоїдних – Ф + П, евтектоїдних – П; заєвтектоїдних – П + Ц<sub>II</sub>. Оскільки такий відпал забезпечує мінімальну твердість і найкращу оброблюваність сталі різанням, як правило, він є підготовчою термічною обробкою перед обробкою різанням. Проте в деяких випадках (наприклад, для крупних виливків) він може бути й остаточним видом обробки. Розрізняють такі основні види відпалу другого роду: повний, неповний, нормалізаційний, ізотермічний.

При *повному відпалі* сталь нагрівають до температури, що на 20 ... 30 °C перевищує  $A_{c3}$ , витримують при цій температурі, повільно охолоджують до 500 ... 600 °C разом із піччю, а потім на повітрі. Повний відпал забезпечує повну фазову перекристалізацію і застосовується, як правило, для доєвтектоїдних сталей з метою усунення дефектів структури (крупнозернистої, відманштетової тощо).

При *неповному відпалі* температура нагрівання сталі на 20 ... 30 °C вище  $A_{c1}$ , але не перевищує  $A_{c3}$  або  $A_{cm}$ . Після витримки сталь повільно охолоджують разом із піччю. При нагріванні відбувається часткова (неповна) перекристалізація сталі (в початковій структурі Ф + П або П + Ц<sub>II</sub>, при нагріванні тільки перліт перетворюється в аустеніт). Неповний відпал, проведений для заєвтектоїдних сталей, називають сфероїдизацією. Він дозволяє одержувати сталь із структурою зернистого перліту. Така сталь має більш низьку твердість, вищу пластичність і кращу оброблюваність різанням, ніж сталь із пластинчастим перлітом. Для доєвтектоїдних сталей неповний відпал також застосовують з метою покращення оброблюваності різанням.

*Нормалізаційний відпал* (нормалізація) включає нагрівання доєвтектоїдної сталі до температури на 30 ... 50 °C вище  $A_{c3}$ , а заєвтектоїдної – на 30 ... 50 °C вище  $A_{cm}$ , ізотермічну витримку й охолодження на спокійному повітрі. Прискорене охолодження при нормалізації дозволяє отримати більш дисперсну (здрібнену) структуру сталі, що призводить до підвищення її твердості та міцності порівняно зі сталлю, що піддавалась повному відпалу. Оскільки температури нагрівання під нормалізацію порівняно високі, то для уникнення значного зростання зерна металу витримка повинна бути мінімальною, але забезпечувати рівномірний прогрів виробу по всьому перерізу.

Нормалізацією усувається цементитна сітка в заєвтектоїдних сталях при підготовці їх до гартування. З огляду на більш високу продуктивність нормалізації порівняно з повним або неповним відпалом, їх часто замінюють нею при підготовці вуглецевих сталей до механічної обробки.

*Ізотермічний відпал* включає нагрівання сталі до температури, що на 30 ... 50 °С перевищує  $A_{c3}$ , витримку, а потім перенос деталі в іншу піч із заданою температурою (нижче  $A_1$ ) і ізотермічну витримку її до повного розпаду аустеніту. Ізотермічний відпал покращує оброблюваність різанням і застосовується для деталей і заготовок невеликих розмірів.

Гартування (*heat strengthening*) – термічна обробка, що включає нагрівання сталі вище критичних температур, ізотермічну витримку і наступне охолодження зі швидкістю вище критичної ( $v_{кр}$ ).

Під критичною швидкістю гартування (*critical speed of heat strengthening*) розуміють мінімальну швидкість охолодження, що забезпечує бездифузійне перетворення аустеніту в мартенсит. Мета гартування – підвищення твердості, міцності і зносостійкості сталі. Змінюючи швидкість охолодження нагрітих сталей, що мають аустенітну структуру, і варіюючи тим самим ступінь переохолодження, можна одержувати сталі з різноманітною структурою і властивостями (рис. 1).

Так, при невеликих швидкостях охолодження ( $V_1, V_2, V_3$ ) в інтервалі температур 720 ... 550 °С з аустеніту утворюються пластинчасті ферито-цементитні суміші (перліт, сорбіт або троостит). В міру збільшення швидкості охолодження дисперсність суміші, нерівновісність структури сталі, а отже, її твердість і міцність зростають. При охолодженні зі швидкістю вище критичної ( $> V_5$ ) з аустеніту утвориться мартенсит, що є пересиченим твердим розчином проникнення вуглецю в ґратку  $\alpha$ -Fe

Залежність критичної швидкості гартування від вмісту вуглецю в сталі подана на рис. 2. На  $v_{кр}$  впливає також вид охолоджувального середовища, розмір зерна та легувальні елементи.

За зростанням інтенсивності охолодження охолодні середовища, що застосовують в практиці термічної обробки можна розташувати так: мінеральні мастила, вода, водяні розчини солей, кислот, лугів. Для гартування вуглецевих сталей краще вода або водяні розчини солей. Ідеальний охолодник при гартуванні той, що не викликає розпаду аустеніту на перлітні структури, забезпечуючи максимальну швидкість охолодження в інтервалі температур  $A_1 - M_n$  і мінімально допустиму в мартенситному інтервалі, що виключає появу значних внутрішніх структурних і термічних напружень, жолоблення, тріщин. Недолік води як охолоджувача: висока швидкість охолодження в мартенситному інтервалі і різкий спад охолоджуючої спроможності при її нагріванні. Мінеральні мастила позбавлені цих вад, але характеризуються в декілька разів меншою охолодною спроможністю. Тому їх доцільніше застосовувати для охолодження легованих сталей, критична швидкість загартування яких менше, ніж вуглецевих.

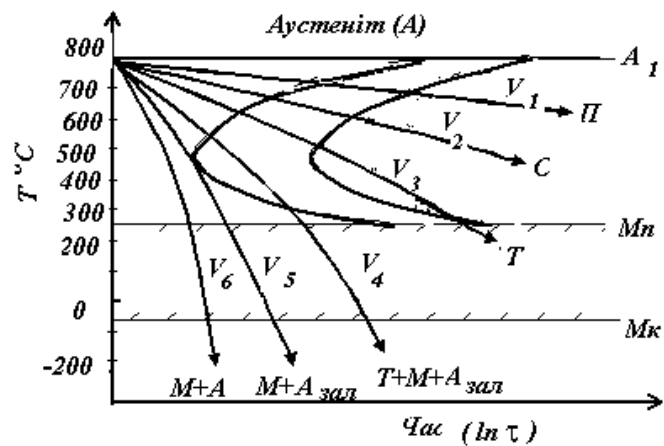


Рис.1 – Діаграма ізотермічного розпаду переохолодженого аустеніту з накладеними на неї кривими охолодження

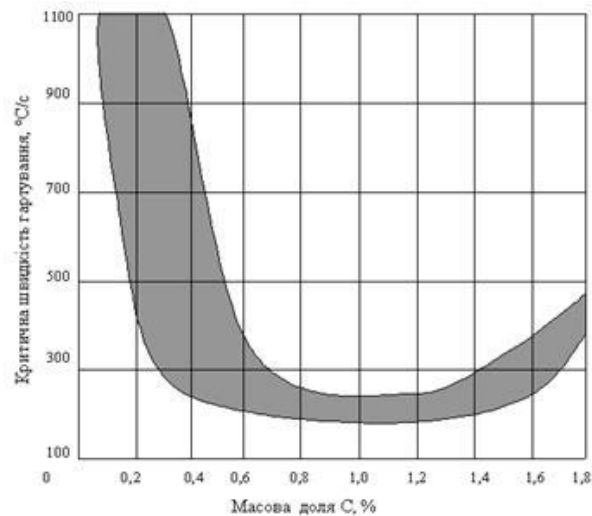


Рис.2 - Критична швидкість гартування залежно від вмісту вуглецю в сталі  
При розрахунку тривалості нагрівання  $t_n$  під термічну обробку можна керуватися табл. 8.1. Тривалість ізотермічної витримки ( $t_b$ ) беруть найчастіше рівною 1/5 від загальної тривалості нагрівання.

Таблиця 1 – Приблизна тривалість нагрівання сталевих виробів

| Тип нагрівального пристрою                   | Температура нагрівання, °C | Тривалість нагрівання (с) на 1 мм діаметра виробу зі сталі |           |
|----------------------------------------------|----------------------------|------------------------------------------------------------|-----------|
|                                              |                            | Вуглецевої                                                 | Легованої |
| Полуменева піч<br>Електропіч<br>Соляна ванна | 800...900                  | 60...70                                                    | 65...80   |
|                                              | 770...820                  | 60...65                                                    | 70...75   |
|                                              | 820...880                  | 50...55                                                    | 60...65   |
|                                              | 770...820                  | 12...14                                                    | 18...20   |
|                                              | 820...8880                 | 10...12                                                    | 16...18   |

Загартування доевтектоїдних сталей, що включає нагрівання до температур вище  $A_{c3}$ , тобто в аустенітний стан, називають *повним*. Для заевтектоїдних сталей використовують *неповне гартування*, при якому сталь, нагріта до температури дещо вищої за  $A_{c1}$ , набуває структури  $A + \text{Ц}_{\text{II}}$ , при охолодженні проходить лише перетворення  $A \rightarrow M$ , тобто часткова (неповна) зміна структури. Зберігання деякої частки твердого і зносостійкого вторинного цементиту сприяє підвищенню механічних властивостей сталі. Повне

Рис3 – Температурні області нагрівання при термічній обробці сталі 1 – дифузійний (гомогенізувальний) відпал; 2 – повний відпал, повне гартування; 3,

4 – нормалізація; 5 - рекристалізаційний відпал; 6 – відпуск; 7 – неповний відпал, неповне гартування

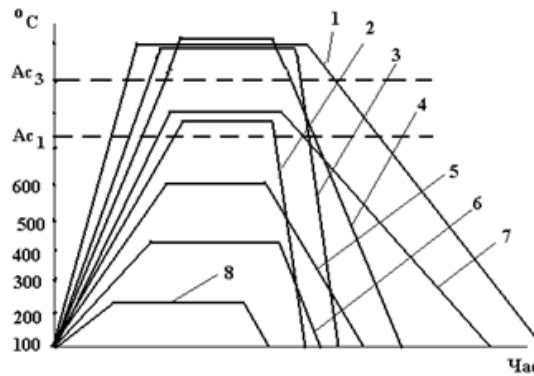


Рис. 4 – Схеми режимів термічної обробки сталей: 1 – повний відпал; 2 – неповне гартування; 3 – повне гартування; 4 – нормалізація; 5 – високий відпуск; 6 – середній відпуск; 7 – неповний відпал; 8 – низький відпуск

На рис. 5 показана залежність механічних властивостей вуглецевої сталі від температури відпуску. За цією залежністю розрізняють низькотемпературний (низький), середньотемпературний (середній) і високотемпературний (високий) види відпуску.

Троостит, сорбіт і перліт відпуску на відміну від одержуваних з аустеніту при безперервному охолодженні мають зернисту, а не пластинчасту будову. Сталі з зернистою структурою характеризуються більш високою пластичністю і кращою оброблюваністю різанням.

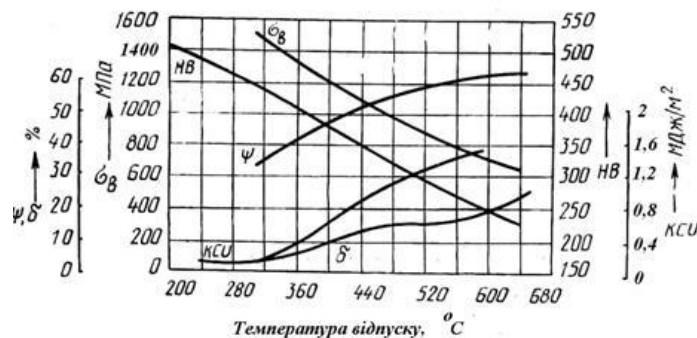


Рис. 5 – Залежність механічних властивостей сталі від температури відпуску  
**Завдання на роботу**

1. Призначити термічну обробку і скласти її режими для сталі відповідно до табл. 2

2. Описати структуру після проведення призначеної термічної обробки.

3. Навести механічні властивості сталі після термічної обробки.

4. Зробити висновки і скласти звіт відповідно до завдання.

Таблиця 2 – Варіанти індивідуальних завдань

| Варіант | Марка сталі | Мета термічної обробки                             |
|---------|-------------|----------------------------------------------------|
| 1       | У12А        | Зміцнювальна остаточна для інструменту             |
| 2       | 35          | Виправлення структури після гарячої обробки тиском |
| 3       | 10          | Усунення ліквації в металургійних зливках          |
| 4       | 45          | Пом'якшення сталі перед обробкою різанням          |

|    |      |                                                 |
|----|------|-------------------------------------------------|
| 5  | 40X  | Остаточна зміцнювальна для зубчастих коліс      |
| 6  | У10А | Пом'якшення сталі перед обробкою різанням       |
| 7  | 20   | Пом'якшення сталі перед обробкою різанням       |
| 8  | 50   | Усунення дефектів структури після горячої ОМТ   |
| 9  | 25   | Усунення дефектів структури після горячої ОМТ   |
| 10 | 30   | Покращення обробки різанням та якості остаточна |
| 11 | 50Л  | Усунення дефектів структури                     |
| 12 | 40   | Остаточна зміцнювальна для валів                |
| 13 | 20   | Усунення ліквідації в металургійних зливках     |
| 14 | 60С2 | Остаточна зміцнювальна                          |
| 15 | У13А | Ліквідація сітки вторинного цементиту           |

### Контрольні питання для самопідготовки

1. Які лінії на діаграмі стану “залізо-вуглець” позначаються як  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $A_4$ ,  $A_{cm}$  ?
2. Які є види термічної обробки для сталей?
3. Які види відпалу сталей ви знаєте?
4. З якою метою призначають повний відпал доєвтектоїдних сталей? До яких температур нагрівають ці сталі при повному відпалі?
5. З якою метою призначають неповний відпал доєвтектоїдних сталей? До яких температур нагрівають ці сталі при повному відпалі?
6. З якою метою призначають відпал заєвтектоїдних сталей? До яких температур нагрівають ці сталі при відпалі?
7. Яка термічна обробка називається нормалізацією? До яких температур нагрівають до- та заєвтектоїдні сталі при нормалізації?
8. Які структури можуть утворюватися в сталях при їх різній швидкості охолодження з аустенітного стану?
9. В чому полягає термічна обробка “гартування” для сталей?
10. Яка швидкість охолодження сталей називається критичною?
11. Яка структура називається “мартенсит”?
12. Від чого залежить кількість залишкового аустеніту при гартуванні?
13. До яких температур нагрівають сталі різного хімічного складу при гартуванні?
14. Які види відпуску існують?
15. Для яких сталей призначають низький, середній та високий відпуск?
16. Яка термічна обробка сталей називається поліпшенням?

### Практична робота № 12 Сплави міді (латунь, бронза і спецсплав)

**Мета роботи:** вивчення структури, властивостей, маркування мідних сплавів; ознайомлення з вимогами, які ставляться до сплавів в залежності від умов роботи виробів в них.

### Теоретичні відомості

#### 1. Мідь і її сплави.

Мідь має гранецентровану кубічну ґратку. Густина міді  $8,94 \text{ г/см}^3$ , температура плавлення  $1083^\circ\text{C}$ .

Характерною властивістю міді є її висока електропровідність, тому вона знаходить широке застосування в електротехніці. Технічно чиста мідь маркується: М00 (99,99 % Cu), М0 (99,95 % Cu), М2, М3 і М4 (99 % Cu).

Механічні властивості міді відносно низькі: межа міцності складає  $150\ldots 200 \text{ МПа}$ , відносне видовження –  $15\ldots 25 \%$ . Тому як конструкційний матеріал мідь застосовується рідко. Підвищення механічних властивостей досягається створенням різних сплавів на основі міді.

Розрізняють дві групи мідних сплавів: **латунь** – сплави міді з цинком, **бронза** – сплави міді з іншими (окрім цинку) елементами.

#### 2. Латунь.

Латунь може мати в своєму складі до 45 % цинку. Підвищення вмісту цинку до 45 % призводить до збільшення межі міцності до  $450 \text{ МПа}$ . Максимальна пластичність має місце при вмісті цинку близько 37 %.

При сплавлянні міді з цинком утворюється ряд твердих розчинів  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\epsilon$  (рис. 1.).

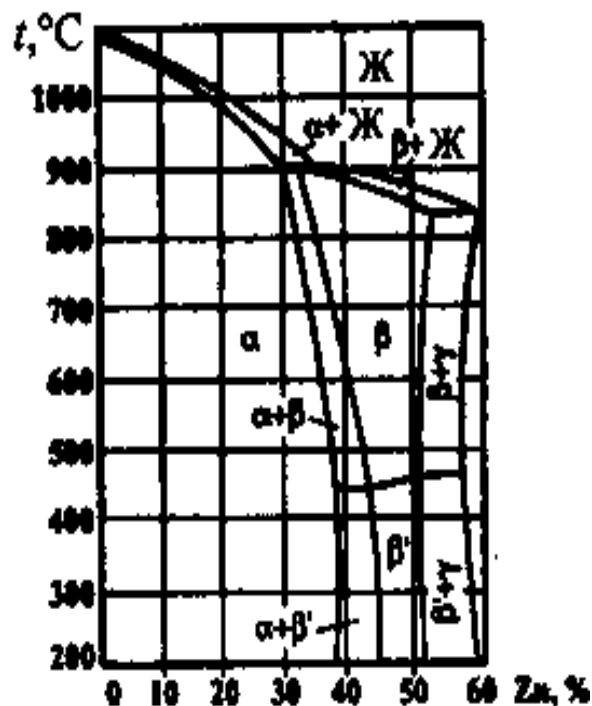


Рис. 1. Діаграма стану мідь – цинк

З діаграми стану мідь – цинк видно, що залежно від складу є однофазна латунь, що складається з  $\alpha$  – твердого розчину, і двофазні ( $\alpha + \beta$ ) – латунь.

За способом виготовлення виробів розрізняє латунь, що деформується і ливарну.

Латунь, що деформується, маркується буквою Л, за якою слідує число, що показує вміст міді у відсотках, наприклад в латуні Л62 міститься 62 % мідь і 38 % цинку. Якщо крім міді і цинку, є інші елементи, то ставляться їх початкові

букви ( О – олово, С – свинець, Ж – залізо, Ф – фосфор, Мц – марганець, А – алюміній, Ц – цинк, Б – берилій, Н – нікель, К – кремній). Кількість цих елементів позначається відповідними цифрами після числа, що показує вміст міді, наприклад, сплав ЛАЖ60-1-1 містить 60 % мідь, 1 % алюмінія, 1 % заліза і 38 % цинку.

Однофазні  $\alpha$  – латунь використовується для виготовлення деталей, що деформуються в холодному стані. Виготовляють стрічки, гільзи патронів, радіаторні трубки, дріт.

Для виготовлення деталей, що деформуються при температурі вище 500 °С використовують ( $\alpha + \beta$ ) – латунь. З двофазної латуні виготовляють листи, прутки і інші заготовки, з яких подальшою механічною обробкою виготовляють деталі. Латунь, яка оброблена різанням і покращується при введенні до складу свинцю як домішки, наприклад, латунь марки ЛС59-1, називають “автоматною латунню”.

Латунь має добру корозійну стійкість, яку можна підвищити додатково домішкою олова. Латунь ЛО70-1 стійка проти дії корозії в морській воді і називається “морською латунню”.

Домішка нікелю і заліза підвищує механічну міцність до 550 МПа.

Ливарна латунь також маркується буквою Л, після буквеного позначення основного легуючого елемента (цинк) і кожного подальшого ставиться цифра, яка вказує його мередній вміст в сплаві. Наприклад, латунь ЛЦ23А6Ж3Мц2 містить 23 % цинку, 6 % алюмінію, 3 % заліза, 2 % марганцю.. Найкращою рідкотекучістю володіє латунь марки ЛЦ16К4. До ливарної латуні відноситься латунь типу ЛС, ЛК, ЛА, ЛАЖ, ЛАЖМц. Ливарна латунь не схильна до ліквації, має зосереджену усадку, виливки виходять з високою густиною.

Латунь є добрим матеріалом для конструкцій, які працюють при негативних температурах.

### **3. Бронза**

Сплави міді з іншими елементами крім цинку називаються бронзою.

Бронзи поділяється на деформівні і ливарні.

За маркуванням бронзи, що деформуються, на першому місці ставляться букви Бр, потім букви, які вказують, які елементи, крім міді, входять до складу сплаву. Після букв йдуть цифри, які показують вміст компонентів в сплаві. Наприклад, марка БрОФ10-1 означає, що в бронзу входить 10 % олово, 1 % фосфору, інше – мідь.

Маркування ливарної бронзи також починається з букв Бр, потім вказуються буквені позначення легуючих елементів і ставиться цифра, яка вказує його середній вміст в сплаві. Наприклад, бронза БрОЗЦ12С5 містить 3 % олово, 12 % цинку, 5 % свинцю, інше – мідь.

**Олов’яна бронза** При сплавланні міді з оловом утворюються тверді розчини. Ці сплави дуже схильні до ліквації через великий температурний інтервал кристалізації. Завдяки ліквації сплави із вмістом олова вище 5 % мають в структурі евтектоїдну складову  $E(\alpha + \delta)$ , що складається з м’якої і твердої фаз. Така будова є сприятливою для деталей типу підшипників ковзання: м’яка фаза забезпечує добру припрацьовуваність, тверді частинки створюють зносостійкість. Тому олов’яна бронза є добрим антифрикційним матеріалом.

Олов'яна бронза має низьку об'ємну усадку (близько 0,8 %), тому використовуються в художньому литті.

Наявність фосфору забезпечує добру рідкотекучість.

Олов'яна бронза поділяється на деформівну і ливарну.

**В бронзі, що деформується**, вміст олова не повинен перевищувати 6 %, для забезпечення необхідної пластичності, БрОФ6,5-0,15.

Залежно від складу бронза, що деформується, відрізняється високими механічними, антикорозійними, антифрикційними і пружними властивостями, і використовуються в різних галузях промисловості. З цих сплавів виготовляють прутки, труби, стрічку, дріт.

**Ливарна олов'яна бронза**, БрОЗЦ7С5Н1, БрО4Ц4С17, застосовуються для виготовлення арматури і для виливання антифрикційних деталей типу втулок, вінців черв'ячних коліс, вкладишів підшипників.

**Алюмінієва бронза**, БрАЖ9-4, БрАЖ9-4Л, БрАЖН10-4-4.

Бронза із вмістом алюмінія до 9,4 % мають однофазну будову  $\alpha$  – твердого розчину. При вмісті алюмінія 9,4...15,6 % сплави системи мідь – алюміній двофазні і складаються з  $\alpha$  – і  $\gamma$  – фаз.

Оптимальними властивостями володіє алюмінієва бронза, що містить 5...8 % алюмінія. Збільшення вмісту алюмінія до 10...11 % внаслідок появи  $\lambda$  – фази веде до різкого підвищення міцності і сильного зниження пластичності. Додаткове підвищення міцності для сплавів із вмістом алюмінія 8...9,5 % можна досягти гартуванням.

Переваги алюмінієвої бронзи в порівнянні з олов'яними:

- мало схильність до внутрішньокристалічної ліквідації;
- велика густина виливок;
- більш висока міцність і жароміцність;
- мало схильність до холодоламкості.

Основні недоліки алюмінієвої бронзи:

- значна усадка;
- схильність до утворення стовпчастих кристалів при кристалізації і зростання зерна при нагріванні, що окрихчує сплав;
- сильний газопоглинач рідкого розплаву;
- самовідпуск при повільному охолодженні;
- недостатня корозійна стійкість в перегрітому парі.

Для усунення цих недоліків сплави додатково легують марганцем, залізом, нікелем, свинцем.

З алюмінієвої бронзи виготовляють відносно дрібні, але високовідповідальні деталі типу шестерень, втулок, фланців литтям і обробкою тиском. З бронзи БрА5 штампуванням виготовляють медалі і дрібну розмінну монету.

**Кремнієві бронза**, БрКМц3-1, БрК4, застосовують як замітники олов'яної бронзи. Вони немагнітні і морозостійкі, перевершують олов'яну бронзу за корозійною стійкістю і механічними властивостями, мають високі пружні властивості. Сплави добре зварюються і піддаються паянню. Завдяки високій стійкості сухих газів, їх використовують для виробництва стічних труб, газо- і димопроводів.

**Свинцева бронза**, БрС30, використовує як високоякісний антифрикційний матеріал. В порівнянні з олов'яною бронзою має нижчі механічні і технологічні властивості.

**Берилієва бронза**, БрБ2, є високоякісним пружинним матеріалом. Розчинність берилію в міді з пониженням температури значно зменшується. Це явище використовують для отримання високих пружних і міцнісних властивостей виробів методом дисперсійного твердіння. Готові вироби з берилієвої бронзи піддають гартуванню від 800 °С, завдяки чому фіксується при кімнатній температурі пересичений твердий розчин берилію в міді. Потім проводять штучне старіння при температурі 300...350 °С. При цьому відбувається виділення дисперсних частинок, зростають міцність і пружність. Після старіння межа міцності досягає 1100...1200 МПа.

## **Практична робота № 13**

### **Інструментальні сталі і їх призначення**

**Мета роботи:** вивчення структури, властивостей, способів термічної обробки інструментальних сталей і області їх застосування.

#### **Теоретичні відомості**

##### **1. Сталі для ріжучого інструменту.**

Інструментальна сталь повинна володіти високою твердістю, зносостійкістю, достатньою міцністю і в'язкістю (для інструментів ударної дії).

Ріжучі кромки можуть нагріватися до температури 500...900 °С, тому важливою властивістю є теплостійкість, тобто здатність зберігати високу твердість і ріжучу здатність при тривалому нагріві (червоностійкість).

##### **2. Вуглецеві інструментальні сталі (ГОСТ 1435).**

Містять 0,65...1,35% вуглецю. Сталі У7...У13А – володіють високою твердістю, добре шліфуються, дешеві і недефіцитні.

Із сталей марок У7, У8А виготовляють інструмент для роботи по дереву і інструмент ударної дії, коли вимагається підвищена в'язкість – пуансони, зубила, штампи, молотки.

Сталі марок У9...У12 володіють більш високою твердістю і зносостійкістю – використовуються для виготовлення свердел, мітчиків, фрез.

Сталь У13 володіє максимальною твердістю, використовується для виготовлення напилків, граверного інструменту.

Для зниження твердості і створення сприятливої структури, всі інструментальні сталі до виготовлення інструменту піддають відпалу.

Для заєвтектоїдних сталей проводять сфероїдизуючий відпал, в результаті якого цементит вторинний набуває зернисту форму. Регулюючи швидкість охолодження можна отримати будь-який розмір зерен.

Заключна термічна обробка – гартування з наступним відпуском.

Гартування для доевтектоїдних сталей проводять повне, а для заєвтектоїдних – неповне. Структура загартованих сталей або мартенсит, або мартенсит і карбіди.

Температура відпуску вибирається залежно від твердості, необхідної для інструменту.

Для інструментів ударної дії, що вимагають підвищеної в'язкості, із сталей У7, У8 відпуск проводять при температурі 280...300 °С, що забезпечує твердість HRC 56...58.

Для напилків, мітчиків, плашок відпуск проводять при температурі 150...200 °С, при цьому забезпечується отримання максимальної твердості — HRC 62...64.

Основними недоліками вуглецевих інструментальних сталей є їх невисоке прожарювання (5...10 мм), низька теплостійкість (до 200 °С), тобто інструменти можуть працювати тільки при невисоких швидкостях різання.

### **3. Леговані інструментальні сталі**

Містять 0,9...1,4 % вуглецю. Легуючими елементами є хром, вольфрам, ванадій, марганець, кремній і інші. Загальний вміст легуючих елементів до 5%.

Висока твердість і зносостійкість в основному визначаються високим вмістом вуглецю. Легування використовується для підвищення гартування і прожарювання, збереження дрібного зерна, підвищення міцності і в'язкості.

Термічна обробка включає гартування і відпуск.

Проводять гартування з температури 800...850 °С в маслі або ступінчасте гартування, що зменшує можливість викривлення і утворення гартівних тріщин.

Відпуск проводять низькотемпературний, при температурі 150...200 °С, що забезпечує твердість HRC 61...66. Іноді, для збільшення в'язкості, температуру відпуску збільшують до 300 °С, але при цьому спостерігається зниження твердості HRC 55...60.

Для деревообробного інструменту із сталей 6ХС і 9ХФ рекомендується ізотермічне гартування, яке значно поліпшує в'язкість.

Підвищений вміст кремнію (сталь 9ХС) сприяє збільшенню прожарювану до 40 мм і підвищенню стійкості мартенситу при відпуску. Недоліками сталей, що містять кремній, є чутливість їх до знеуглецювання при термообробці, погана оброблювана різанням і деформацією через зміцнення фериту кремнієм.

Підвищений вміст марганцю (сталі ХВГ, 9ХВСГ) сприяє збільшенню кількості залишкового аустеніту, що зменшує деформацію інструменту при гартуванні. Це особливо важливо для інструменту, що має велику довжину при малому діаметрі, наприклад, протяжок.

Хром збільшує прожарювання і твердість після гартування.

Сталі використовуються для виготовлення інструменту і ударного, і ріжучого.

“Алмазна” сталь ХВ5 містить 5% вольфраму. Завдяки присутності вольфраму, в термічно обробленому стані має надмірну дрібнодисперсну фазу карбиду. Твердість складає HRC 65...67. Сталь використовується для виготовлення інструменту, що зберігає тривалий час гостру ріжучу кромку і високу розмірну точність (розгортки, різці фасонів, граверний інструмент).

### **4. Швидкорізальні сталі**

Сталі отримали свою назву за властивостями. Внаслідок високої теплостійкості (550...650 °С), виготовлені з них інструменти можуть працювати з достатньо високими швидкостями різання.

Сталі містять 0,7...1,5 % вуглецю, до 18 % основного легуючого елемента — вольфраму, до 5 % хрому і молібдену, до 10 % кобальту

Додавання ванадію підвищує зносостійкість інструменту, але погіршує здатність до шліфування. Кобальт підвищує теплостійкість до 650°C і твердість HRC 67...70.

Мікроструктура швидкорізальної сталі в литому стані має евтектичну структурну складову. Для отримання оптимальних властивостей інструментів з швидкорізальної сталі необхідно по можливості усунути структурну неоднорідність сталі – карбід ліквациї. Для цього виливки з швидкорізальної сталі піддаються інтенсивній пластичній деформації (куванню). При цьому відбувається дроблення карбідів евтектики і досягається більш однорідний розподіл карбідів по перетину заготовки.

Потім проводять відпал сталі при температурі 860...900 °C. Структура відпаленої швидкорізальної сталі – дрібнозернистий (сорбітоподібний) перліт і карбіди, дрібні евтектоїдні і більш крупні первинні. Кількість карбідів близько 25 %. Сталь з такою структурою добре обробляється різанням. Переважна кількість легуючих елементів знаходяться у фазі карбіду. Для отримання оптимальних властивостей сталі в готовому інструменті необхідно при термічній обробці забезпечити максимальне насичення мартенситу легуючими елементами. При гартуванні швидкорізальні сталі вимагають нагріву до дуже високих температур, біля 1280 °C. Нагрів здійснюють в добре розкислюючих соляних ваннах  $\text{BaCl}_2$ , що поліпшує рівномірність прогрівання і знижує можливість знеуглецювання поверхні. Для зниження термічних фазових напруг нагрів здійснюють ступінчасто: уповільнюють нагрів при температурах 600...650 °C і при 850...900 °C. Графік режиму термічної обробки швидкорізальної сталі уявлений на рис. 1.

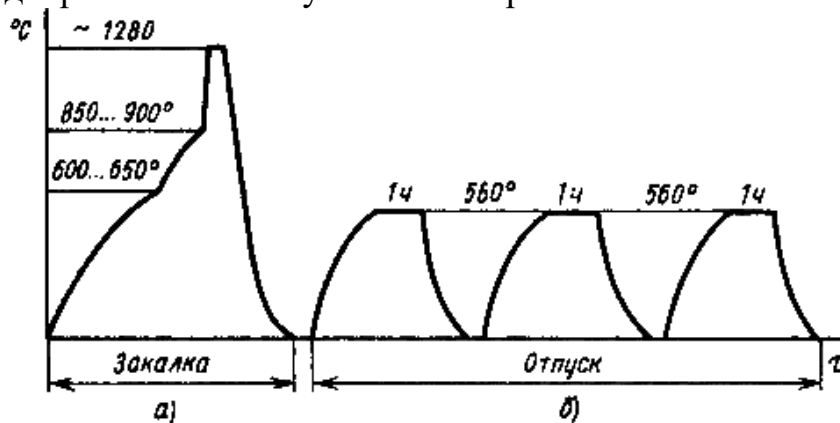


Рис. 1. Графік режиму термічної обробки швидкорізальної сталі

Охолодження від гартівної температури проводять в маслі. Структура сталі після гартування складається з легованого, дуже тонкодисперсного мартенситу, значної кількості (30...40 %) залишкового аустеніту і карбідів вольфраму. Твердість складає 60...62 HRC. Наявність аустеніту залишкового в структурі загартованої сталі погіршує ріжучі властивості.

Для максимального видалення аустеніту залишкового проводять трьохразовий відпуск при температурі 560 °C. При нагріві під відпуск вище 400 °C спостерігається збільшення твердості. Це пояснюється тим, що з легованого залишкового аустеніту виділяються леговані карбіди. Аустеніт при охолодженні від температури відпуску перетворюється на мартенсит відпуску,

що викликає приріст твердості. Максимальна твердість досягається при температурі відпуску 560 °С.

Після відпуску кількість аустеніту залишкового знижується до 10%. Щоб зменшити його кількість до мінімуму, необхідна трьохразовий відпуск.

Твердість сталі після відпуску складає 64...65 HRC. Структура сталі після термообробки складається з мартенситу відпуску і карбідів.

При термічній обробці швидкорізальних сталей застосовують обробку холодом. Після гартування сталь охолоджують до температури — 80 ...100 °С, після цього проводять відпуск при температурі 560 °С для зняття напруги.

Іноді для підвищення зносостійкості швидкорізальних сталей застосовують низькотемпературне ціанування.

Основними видами ріжучих інструментів з швидкорізальної сталі є різці, свердла, протяжки, мітчики машинні, ножі для різання паперу. Часто з швидкорізальної сталі виготовляють тільки робочу частину інструменту.

### **5. Сталі для вимірювальних інструментів.**

Основними вимогами, що ставляться до сталей, з яких виготовляються вимірювальні інструменти, є висока твердість і зносостійкість, стабільність в розмірах протягом довгого часу. Остання вимога забезпечується мінімальним температурним коефіцієнтом лінійного розширення і зведенням до мінімуму структурних перетворень в часі.

Для виготовлення вимірювальних інструментів застосовуються:

- високовуглецеві інструментальні сталі, леговані і вуглецеві (сталі У12, Х, Х9, ХГ), після гартування і стабілізуючої низькотемпературної (120...170 °С) відпуску протягом 10...30 год. До відпуску бажано провести обробку холодом. Одержують твердість 62...67 HRC;

- маловуглецеві сталі (сталь 15, 20) після цементації і загартування з низьким відпуском;

- нітралої (сталь 38ХМЮА) після азотування на високу твердість

### **6. Штампові сталі.**

Інструмент, який використовується для обробки металів тиском (штампи, пуансони, матриці) виготовляють з штампових сталей.

Розрізняють сталі для штампів холодної і гарячої деформації.

#### **6.1. Сталі для штампів холодної деформації.**

Сталі повинні володіти високою твердістю, зносостійкістю, міцністю, в'язкістю (щоб сприймати ударні навантаження), опором пластичним деформаціям.

Для штампів невеликих розмірів (до 25 мм) використовують вуглецеві інструментальні сталі У10, У11, У12 після гартування і низького відпуску на твердість 57...59 HRC. Це дозволяє отримати добру зносостійкість і ударну в'язкість.

Для більш крупних виробів застосовують леговані сталі Х, Х9, Х6ВФ. Для підвищення зносостійкості інструменту після термічної обробки проводять ціанування або хромування робочих поверхонь.

Для зменшення браку при гартуванні необхідне повільне охолодження в області температур мартенситного перетворення (наприклад, гартування з води в масло для вуглецевих сталей, ступінчасте гартування для легованих сталей).

Якщо штамповий інструмент випробовує ударні навантаження, то використовують сталі, володіючи більшою в'язкістю (сталі 4XC4, 5XHM). Це досягається зниженням вмісту вуглецю, введенням легуючих елементів і відповідною термічною обробкою. Після гартування проводять високий відпуск при температурі 480...580 °C, що забезпечує твердість 38...45 HRC.

## **6.2. Сталі для штамів гарячої деформації.**

Додатково до загальних вимог, від сталей цієї групи вимагається стійкість проти утворення тріщин при багаторазовому нагріванні і охолодженні, окалинотійкість, висока теплопровідність для відведення теплоти від робочих поверхонь штапу, високаепожарювання для забезпечення високої міцності по всьому перетину інструменту.

Для виготовлення молотових штамів застосовують середньовуглецеві сталі 5XHM, 5XHB, 4XCMF. Вольфрам і молібден додають для зниження схильності до відпускнуї крихкості. Після термічної обробки, що включає гартування з температури 760...820 °C і відпуску при 460...540°C, сталь має структуру – сорбіт або троостит і сорбіт відпуску. Твердість 40...45 HRC.

Штапи гарячого пресування працюють в більш важких умовах. Для їх виготовлення застосовуються сталі підвищеної теплостійкості. Сталь 3X2B8F зберігає теплостійкість до 650 °C, але наявність карбідів вольфраму знижує в'язкість. Сталь 4X5B2FC має високу в'язкість. Підвищений вміст хрому і кремнію значно збільшує окалинотійкість сталі.

## **7. Тверді сплави.**

Як матеріалів для інструментів використовуються *тверді сплави*, які складаються з твердих карбідів і зв'язуючої фази. Вони виготовляються методами порошкової металургії.

Характерною особливістю твердих сплавів є дуже висока твердість 87...92 HRC при достатньо високій міцності. Твердість і міцність залежать від кількості зв'язуючої фази (кобальту) і величини зерен карбідів. Чим крупніше зерно карбідів, тим вище міцність. Тверді сплави відрізняються великою зносостійкістю і теплостійкістю. Основними твердими сплавами є групи ВК (WC + Co), ТК (WC + TiC + Co), ТТК (WC + TiC + TaC + Co). Найбільш поширеними сплавами групи ВК це сплави марок ВК3, ВК6, ВК8, ВК20, де число показує вміст кобальту у відсотках, інше – карбіди вольфраму WC. Сплави групи ТК марок Т30К6, Т14К8 – перше число показує вміст карбідів титана у відсотках, другий – вміст кобальту у відсотках. Сплави цієї групи краще протистоять зношуванню, володіють більшою твердістю, тепло- і жаростійкістю, стійкістю до корозії, але меншою теплопровідністю і більшою крихкістю. Використовуються на середніх і високих швидкостях різання.

Сплави з малою кількістю кобальту володіють підвищеною твердістю і зносостійкістю, але мінімальною міцністю, Тому їх використовують для чистового точіння (ВК3, Т30К4).

Сплави з підвищеним вмістом кобальту використовують для чорнового точіння (ВК8, Т14К8).

Сплав ВК20 використовують для армування штамів, що підвищує їх зносостійкість.

Зносостійкість інструментів з твердих сплавів перевищує зносостійкість інструментів з швидкорізальних сталей в 10...20 раз і зберігається до температур 800...1000 °С.

#### **8. Алмаз як матеріал для виготовлення інструментів.**

80 % природних алмазів видобувається, і всі синтетичні алмази використовуються як інструментальних матеріалів.

Основна кількість алмазів використовується у вигляді алмазного порошку для виготовлення алмазно-абразивного інструменту – шліфувальних кругів, притирів, надфілів і ін., для обробки особливо твердих металів і гірських порід. Велике значення мають заточувальні круги для твердосплавного інструменту, це збільшує продуктивність праці і термін служби інструменту. Підвищення стійкості твердосплавного інструменту забезпечується високою чистотою (відсутність дрібних тріщин) леза інструменту.

Алмазний інструмент виготовляється у вигляді алмазовміщуючих кругів з бакелітовою або металевою зв'язкою.

Також виготовляють алмазні різці (для обробки корпусів годинника), фільери (для волочіння дроту з високотвердих і дорогоцінних металів) і ін.

### **Практична робота № 14**

#### **Гартування та відпуск**

**Мета роботи:** вивчення методики призначення режимів загартування і відпуску; набуття практичних навичок проведення різних операцій термічної обробки; дослідження впливу вмісту вуглецю і температури відпуску на твердість загартованої сталі.

#### **Теоретичні відомості**

##### **1. Гартування.**

Конструкційні сталі піддають гартуванню і відпуску для підвищення міцності і твердості, отримання високої пластичності, в'язкості і високої зносостійкості, а інструментальні – для підвищення твердості і зносостійкості.

Верхня межа температур нагріву для заевтектоїдних сталей обмежується, оскільки приводить до зростання зерна, що знижує міцність і опір крихкому руйнуванню.

Основними параметрами є температура нагрівання і швидкість охолодження. Тривалість нагріву залежить від нагрівального пристрою.

За температурою нагрівання розрізняють види гартування:

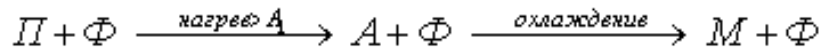
– **повне**, з температурою нагріву на 30...50 °С вище за критичну температуру  $A_3$

$$T_{\text{н}} = A_3 + (30...50)^{\circ}\text{C}.$$

Застосовують його для доевтектоїдних сталей. Зміни структури сталі при нагріванні і охолодженні відбуваються за схемою:



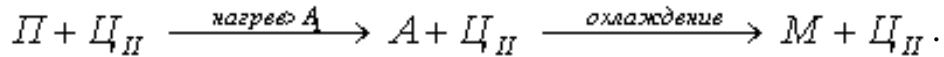
Неповне гартування доевтектоїдних сталей недопустиме, оскільки в структурі залишається м'який ферит. Зміни структури сталі при нагріванні і охолодженні відбуваються за схемою:



– **неповне** з температурою нагріву на 30...50 °С вище за критичну температуру  $A_1$

$$T_n = A_1 + (30 \dots 50)^\circ \text{C}$$

Застосовується для заевтектоїдних сталей. Зміни структури сталі при нагріванні і охолодженні відбуваються за схемою:



Після охолодження в структурі залишається цементит вторинний, який підвищує твердість і зносостійкість ріжучого інструменту.

Після повного гартування заевтектоїдних сталей одержують дефектну структуру грубоголчатого мартенситу.

Заевтектоїдні сталі перед гартуванням обов'язково піддають відпалу – сфероїдизації, щоб цементит мав зернисту форму.

## 2. Способи гартування.

Залежно від форми виробу, марки сталі і потрібного комплексу властивостей застосовують різні способи охолодження (рис. 1).

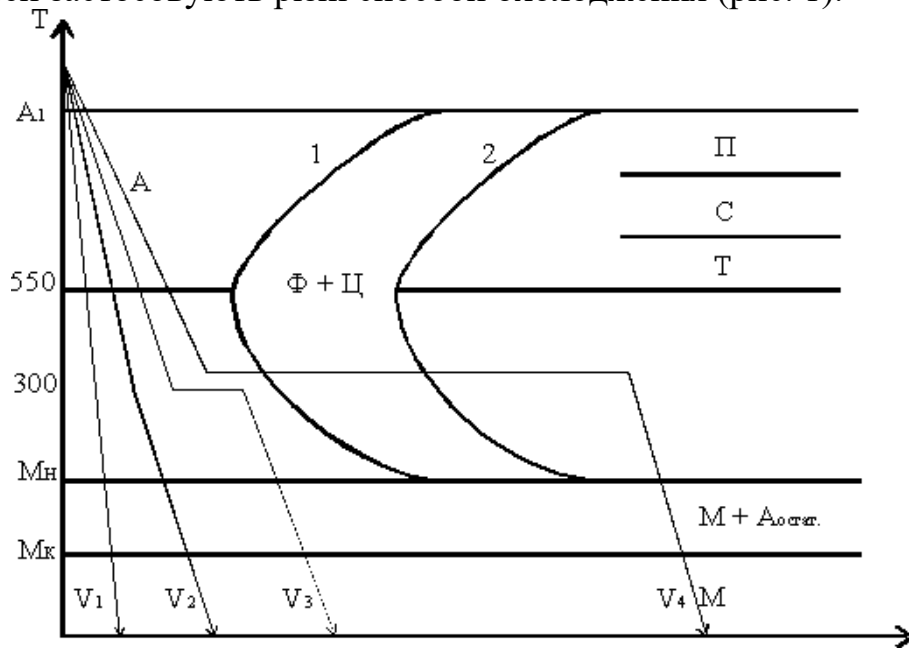


Рис. 1. Режими гартування

### 2.1. Гартування в одному охолоджувачі (V1).

Нагріту до потрібної температури деталь переносять в охолоджувач і повністю охолоджують. Як охолоджуюче середовище використовують:

- воду – для крупних виробів з вуглецевих сталей;
- масло – для невеликих деталей простої форми з вуглецевих сталей і виробів з легированих сталей.

Основний недолік – значні гартувальні напруги.

### 2.2. Гартування в двох сферах або переривчасте (V2).

Нагрітий виріб заздалегідь охолоджують в більш різкому охолоджувачі (вода) до температури ~ 3000 °С і потім переносять в більш м'який охолоджувач (масло).

Переривчасте гартування забезпечує максимальне наближення до оптимального режиму охолодження. Застосовується в основному для гартування інструментів.

Недолік: складність визначення моменту перенесення виробу з одного середовища в інше.

### **2.3. Ступінчасте гартування (V3).**

Нагрітий до необхідної температури виріб поміщають в охолоджуюче середовище, температура якого на 30...50 °C вище за точку  $M_n$  і витримують протягом часу, необхідного для вирівнювання температури по всьому перетину. Час ізотермічної витримки не перевищує періоду стійкості аустеніту при заданій температурі.

Як охолоджуюче середовища використовують розплавлені солі або метали. Після ізотермічної витримки деталь охолоджують з невисокою швидкістю. Спосіб використовується для дрібних і середніх виробів.

### **2.4. Ізотермічне гартування (V4).**

Відрізняється від ступінчастого гартування тривалістю витримки при температурі вище  $M_n$ , в області проміжного перетворення. Ізотермічна витримка забезпечує повне перетворення переохолодженого аустеніту в бейніт. При проміжному перетворенні легованих сталей окрім бейніту в структурі зберігається аустеніт залишковий. Структура, що утворилася, характеризується поєднанням високої міцності, пластичності і в'язкості. Разом з цим знижується деформація через гартувальні напруги, зменшуються і фазові напруги. Як охолоджуюче середовища використовують розплавлені солі і луги. Застосовуються для легованих сталей.

### **2.5. Гартування з самовідпуском.**

Нагріті вироби поміщають в охолоджуюче середовище і витримують до неповного охолодження. Після витягування виробу, його поверхневі шари повторно нагріваються за рахунок внутрішньої теплоти до необхідної температури, тобто здійснюється самовідпуск. Застосовується для виробів, які повинні поєднувати високу твердість на поверхні і високу в'язкість в серцевині (інструменти ударної дії: молотки, зубила).

## **3. Відпуск.**

Відпуск є кінцевою термічною обробкою.

Метою відпуску є підвищення в'язкості і пластичності, зниження твердості і зменшення внутрішніх напружень загартованих сталей.

З підвищенням температури нагріву міцність звичайно знижується, а пластичність і в'язкість зростають. Температуру відпуску вибирають, виходячи з необхідної міцності конкретної деталі.

Розрізняють три види відпуску

1. **Низький відпуск** з температурою нагріву  $T_n = 150...300$  °C.

В результаті його проведення частково знімаються гартувальні напруження. Одержують структуру – мартенсит відпуску.

Проводять для інструментальних сталей; після гартування струмами високої частоти; після цементації.

2. **Середній відпуск** з температурою нагріву  $T_n = 300...450$  °C.

Одержують структуру – троостит відпуску, яка поєднує високу твердість 40...45HRC з доброю пружністю і в'язкістю. Використовується для виробів типу пружин, ресор.

3. Високий відпуск з температурою нагріву  $T_n = 450...650\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Одержують структуру, яка поєднує достатньо високу твердість і підвищену ударну в'язкість (оптимальне поєднання властивостей) – сорбіт відпуску.

Використовується для деталей машин, що витримують ударні навантаження.

Комплекс термічної обробки, що включає гартування і високий відпуск, називається **поліпшенням**.

#### 4. Відпускна крихкість.

Звичайно з підвищенням температури відпуску ударна в'язкість збільшується, а швидкість охолодження не впливає на властивості. Але для деяких сталей спостерігається зниження ударної в'язкості. Цей дефект називається **відпускною крихкістю** (рис. 2).

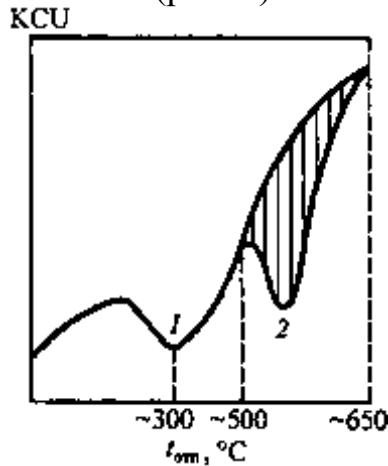


Рис. 2. Залежність ударної в'язкості від температури відпуску

**Відпускна крихкість I роду** спостерігається при відпуску в області температур біля  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Вона не залежить від швидкості охолодження.

Це явище пов'язане з нерівномірністю перетворення мартенситу відпуску. Процес протікає швидше поблизу границь зерен в порівнянні з об'ємами всередині зерна. На границях спостерігається концентрація напружень, тому границі крихкі.

Відпускна крихкість I роду “необоротна”, тобто при повторних нагріваннях тих же деталей не спостерігається.

**Відпускна крихкість II роду** спостерігається в легованих сталях при повільному охолодженні після відпуску в області  $450...650\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

При високому відпуску по границях зерен відбувається виділення дисперсних включень карбідів. Зона поблизу границь збагачується легуючими елементами. При подальшому повільному охолодженні відбувається дифузія фосфору до границь зерна. Зони поблизу границь збагатились фосфором, при цьому знижуються міцність і ударна в'язкість. Цьому деєкту сприяють хром, марганець і фосфор. Зменшують схильність до відпускної крихкості II роду молібден і вольфрам, а також швидке охолодження після відпуску.

Відпускна крихкість II роду “оборотна”, тобто при повторних нагріваннях і повільному охолодженні тих же сталей в небезпечному інтервалі температур дефект може повторитися.

Сталі, схильні до відпускнуї крихкості II роду, не можна використовувати для роботи з нагріванням до 650 °С без подальшого швидкого охолодження.

## **Практична робота № 15**

### **Сплави алюмінію**

**Мета роботи:** вивчення маркування, складу, структури, властивостей і області застосування алюмінієвих сплавів.

### **Теоретичні відомості**

#### **1. Алюміній і його сплави.**

Алюміній – легкий метал з густиною 2,7 г/см<sup>3</sup> і температурою плавлення 660 °С. Має гранецентровану кубічну ґратку. Володіє високою тепло- і електропровідністю. Хімічно активний, але щільна плівка оксиду алюмінію Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, що утворюється, захищає його від корозії.

Механічні властивості: межа міцності 150 МПа, відносне видовження 50 %, модуль пружності 7000 МПа.

Алюміній високої чистоти маркується А99 (99,999 % Al), А8, А7, А6, А5, А0 (вміст алюмінію від 99,85 % до 99 %).

Технічний алюміній добре зварюється, має високу пластичність. З нього виготовляють будівельні конструкції, малонавантажені деталі машин, використовують як електротехнічного матеріалу для кабелів, дротів.

#### **2. Принцип маркування алюмінієвих сплавів.**

На початку вказується тип сплаву: Д – сплави типу дуралюмінів; А – технічний алюміній; АК – ковкі алюмінієві сплави; У – високоміцні сплави; ЛК – ливарні сплави.

Далі вказується умовний номер сплаву. За умовним номером слідує позначення, що характеризує стан сплаву: М – м'який (відпалений); Т – термічно оброблений (гартування плюс старіння); Н – нагартований; П – напівнагартований.

За технологічними властивостями сплави поділяються на три групи:

- сплави, що деформуються, але не зміцнюються термічною обробкою;
- сплави, що деформуються і зміцнюються термічною обробкою;
- ливарні сплави.

Методами порошкової металургії виготовляють спечені алюмінієві сплави (САС), спечені алюмінієві порошкові сплави (САП).

#### **3. Деформівні алюмінієві сплави, що не зміцнюються термічною обробкою.**

Міцність алюмінію можна підвищити легуванням. В сплави, не зміцнювані термічною обробкою, вводять марганець або магній. Атоми цих елементів істотно підвищують його міцність, знижуючи пластичність. Позначаються сплави: з марганцем – АМц, з магнієм – АМг; після позначення елемента вказується його вміст (АМг3).

Магній діє тільки як зміцнювач. Марганець зміцнює і підвищує корозійну стійкість.

Міцність сплавів підвищується тільки в результаті деформації в холодному стані. Чим більший ступінь деформації, тим краще зростає міцність і знижується пластичність. Залежно від ступеня зміцнення розрізняють сплави нагартовані і напівнагартовані (АМг3П).

Ці сплави застосовують для виготовлення різних зварних ємностей для пального, азотної і інших кислот, мало- і середньонавантажених конструкцій.

#### **4. Деформівні алюмінієві сплави, що зміцнюються термічною обробкою.**

До таких сплавів відносяться дуралюміні (складні сплави систем алюміній – мідь – магній або алюміній – мідь – магній – цинк). Вони мають знижену корозійну стійкість, для підвищення якої вводиться марганець.

**Дуралюміні** звичайно піддаються гартуванню з температури 500 °С і природному старінню, якому передують дво-, тригодинний інкубаційний період. Максимальна міцність досягається через 4...5 діб.

Широке застосування дуралюміні знаходять в авіабудуванні, автомобілебудуванні, будівництві.

**Високоміцними старіючими сплавами** є сплави, які крім міді і магнію містять цинк. Сплави В95, В96 мають межу міцності близько 650 МПа. Основний споживач – авіабудування (обшивка, лонжерони).

**Кувальні алюмінієві сплави АК:**, АК8 застосовуються для виготовлення поковок. Поковки виготовляються при температурі 380...450 °С, піддаються гартуванню від температури 500...560 °С і старінню при 150...165 °С протягом 6...15 годин.

До складу алюмінієвих сплавів додатково вводять нікель, залізо, титан, які підвищують температуру рекристалізації і жароміцність до 300 °С.

Виготовляють поршні, лопатки і диски осьових компресорів, турбореактивних двигунів.

#### **5. Ливарні алюмінієві сплави.**

До ливарних сплавів відносяться сплави системи алюміній – кремній (силуміни), що містять 10...13 % кремнію.

Домішками до силумінів є магній, мідь сприяють ефекту зміцнення ливарних сплавів при старінні. Титан і цирконій подрібнюють зерно. Марганець підвищує антикорозійні властивості. Нікель і залізо підвищують жароміцність.

Ливарні сплави маркуються від АЛ2 до АЛ20. Силуміни широко застосовують для виготовлення литих деталей приладів і інших середньо- і малонавантажених деталей, у тому числі тонкостінних виливків складної форми.

## **Практичне заняття № 16**

### **Пластмаси**

**Мета роботи:** вивчення маркування, складу, структури, властивостей і області застосування пластмас.

#### **Теоретичні відомості**

##### **1. Склад, класифікація та властивості пластмас**

**Пластмасами** називають штучні неметалічні матеріали, які отримують на основі органічних полімерних в'язучих речовин (синтетичних смол, ефірів та інших сполук).

В'язуча речовина є обов'язковим компонентом пластмас. В якості в'язучих речовин для більшості пластмас використовують синтетичні смоли. Залежно від виду в'язучого полімеру пластмаса має певні властивості та певну назву: поліетилен, поліпропілен, лавсан та ін.

Властивості пластмас залежать від складу окремих компонентів, їх поєднання і кількісного співвідношення, що дає можливість змінювати характеристики пластмас в широких межах.

Пластмаси формують при підвищеній температурі, у той час коли вони мають високу пластичність. Сировиною для отримання полімерів є нафта, природний газ, кам'яне вугілля, сланці.

Поширенню пластмас сприяють їхня мала густина ( $0,85\text{—}1,8\text{ г/см}^3$ ), що значно зменшує масу деталей, висока корозійна стійкість та широкий діапазон інших властивостей. Хороші антифрикційні характеристики багатьох пластмас дають можливість з успіхом застосовувати їх для виготовлення підшипників ковзання. Високий коефіцієнт тертя деяких пластмас дозволяє використовувати їх для гальмових пристроїв. Окремі пластмаси мають специфічні властивості: високі електроізоляційні та теплоізоляційні характеристики, велику прозорість, тощо.

Важливою перевагою пластмас є можливість їхньої переробки у виробі найпродуктивнішими способами з коефіцієнтом використання матеріалу  $0,9\text{--}0,95$  — литтям, видавлюванням тощо.

Предмети побуту, повністю або частково виготовлені з пластмаси

Водночас пластмасам притаманні деякі недоліки:

- невисокі міцність,
- твердість,
- механічна жорсткість,
- велике значення коефіцієнта лінійного термічного розширення ( $\sim 15 \times 10^{-5}\text{ K}^{-1}$ ),
- значна повзучість, особливо у термопластів,
- низька теплостійкість (більшість пластмас має робочу температуру не вищу, ніж  $200\text{ }^\circ\text{C}$ , і лише деякі можуть працювати при  $300\text{...}400\text{ }^\circ\text{C}$ ),
- низька теплопровідність (в  $500\text{--}600$  разів менша, ніж у металів),
- схильність до старіння (втрата властивостей під впливом тепла, світла, води та інших факторів).

При старінні зменшується еластичність і міцність пластмас, збільшується їхня механічна жорсткість і крихкість. Під еластичністю розуміють здатність матеріалу до великих зворотних деформацій. Цей термін за фізичним сенсом аналогічний пружності, але перший вживається для аморфних, а останній — для кристалічних тіл.

Твердість пластмас за методом Брінелля становить  $30\text{...}200\text{ МПа}$ .

Більшість полімерів перебуває в аморфному (склоподібному) стані. Такі полімери називають смолами. В пластмасах може бути присутньою певна кількість кристалічної фази, яка підвищує міцність, жорсткість і теплостійкість полімера. У виробництві пластмас використовують переважно синтетичні смоли.

За складом пластмаси можуть бути *простими* та *складними*. До складних пластмас, на відміну від простих, крім в'язучого полімеру, входять один чи декілька складників. *Складниками* пластмас є наповнювачі, стабілізатори, пластифікатори, барвники, твердники, інгібітори, порофори та ін.

*Наповнювачі* вводять для зміни механічних властивостей пластмас. Бувають порошкоподібні, волокнисті, листові, органічні, неорганічні.

*Стабілізатори* перешкоджають окисленню та старінню (руйнуванню внутрішньої будови при тривалому використанні) пластмас.

*Пластифікатори* підвищують еластичність пластмаси.

*Барвники* надають кольору пластмасі.

*Твердники* надають полімеру певної твердості та міцності.

*Інгібітори* перешкоджають твердінню.

*Порофори* використовують при виробництві газонаповнених пластмас (піноплас).

За характером впливу температури на в'язучий полімер всі пластмаси поділяють на термопластичні (термопласти) та термореактивні (реактопласти).

*Термопластичні пластмаси* завжди розм'якчуються при нагріванні, що використовується при переробці цих пластмас (поліетилен).

*Термореактивні пластмаси* після тверднення не здатні розм'якчуватись та при нагріванні залишаються твердими аж до температури згоряння (епоксидні смоли).

Залежно від природи твердого наповнювача серед пластмас розрізняють: азбопластики, боропластики, графітопласти, металополімери, органопластики, склопластики, вуглепластики.

Залежно від складових їх макромолекул пластмаси поділяються на такі види: пластомери (лінійні ланцюги), дуромери (структури з високою щільністю решітки), еластомери (структури з низькою щільністю решітки) і синтетичне волокно (сильно орієнтовані ланцюгові молекули).

## **2. Термопластичні та термореактивні пластмаси**

*Термопластичні пластмаси (термопласти)* — це пластмаси на основі термопластичних полімерів, що під час нагрівання розм'якшуються, переходять у в'язкотекучий стан, а при охолодженні тверднуть, і цей процес повторюється при повторному нагріванні. Тобто такі пластмаси допускають повторну переробку. Вони характеризуються невеликою усадкою (1...3%), зручні в переробці, не складні у виробництві тощо. Зазвичай їхня робоча температура не перевищує 90 °С. Типовими представниками термопластів є наступні (список не вичерпний).

**Поліетилен (ПЕ, PE — polyethylene)** — полімер етилену, твердий, легкий і водостійкий матеріал, гарний діелектрик з високою морозостійкістю (до — 60 °С), стійкий проти агресивних середовищ. Застосовується для виготовлення електроізоляції, кабелів, плівок, труб, захисту металів від корозії, ємностей технічного і побутового призначення тощо. Недоліки: низька гранична температура експлуатації, висока газопроникність і низька маслостійкість.

Поліетилен залежно від умов полімеризації (тиск, температура) буває високого і низького тиску. Піддається старінню.

**Поліпропілен (ПП, PP — polypropylene)** — полімер пропілену твердий матеріал загальнотехнічного призначення, що має високі електроізоляційні властивості, водо- і хімічну стійкість, кращі фізико-механічні властивості, ніж поліетилен (міцність сягає до 40 МПа). Існують марки, що отримали допуск до контакту з харчовими продуктами. Недоліки: низька морозостійкість (— 15 °С), горючість, незадовільна склеюваність, здатність накопичувати статичну електрику. Використовується в медицині, харчовій промисловості (пакувальні

плівки) та електротехніці, труб, конструкційних деталей, корпусів, плівки, волокна, тканин. Піддається старінню.

**Полістирол (ПС, PS — polystyrene)** — продукт полімеризації стиролу, термопласт загальнотехнічного призначення. Завдяки гарним механічним властивостям (висока твердість), прозорості і зовнішньому вигляду, він використовується у світлотехніці та виробках культурно-побутового призначення. Він гарно обробляється різанням та склеюється, старіє, має низьку теплостійкість ( $<90^{\circ}\text{C}$ ). Чудовий діелектриком у широкому діапазоні частот, завдяки чому використовується в електротехніці. Нетоксичний, водо- і радіаційно стійкий, через що використовується у харчовій галузі і медичній техніці. Недоліки: крихкість при нормальних умовах, низька ударна в'язкість, здатність до статичної електризації, низька теплостійкість та хімічна стійкість, горючість. Поширення набув спінений ПС (пінопласт). Для покращення властивостей використовують співполімери полістиролу з акрилонітрилом, метилметакрилатом,  $\alpha$ -метилстиролом. Найбільшого поширення отримали удароміцні співполімери стиролу з бутадієновим чи бутадієнстирольним каучуком, що отримали назву — «удароміцний полістирол» (УПС, ASR — Advanced Styrene Resine).

**Фторопласти** — група полімерів на основі фторомістких поліолефінів і (або) їхніх співполімерів, до яких належать політетрафторетилен, політрифторхлоретилен, полівініліденфторид та ін.

**Фторопласт - 4** - високоеластичний (до температур  $-259^{\circ}\text{C}$ ), хімічно стійкий, деструкція починається при ( $>415^{\circ}\text{C}$ , низький коефіцієнт тертя 0,04, повзе при низьких температурах, високоякісний діелектрик,  $t_{\text{роб}}$  до  $250^{\circ}\text{C}$ .

З нього виготовляють труби, антифрикційні покриття, плівки, електро- та радіодеталі.

**Полівінілхлорид (ПВХ, поліхлорвініл, PVC — Polyvinyl chloride)** — аморфний полімер вінілхлориду з високою міжмолекулярною взаємодією. ПВХ — атмосферостійкий, самозгасаючий при горінні полімер, однак при горінні виділяються екологічно шкідливі діоксини. При нагріванні до температур  $150\ldots170^{\circ}\text{C}$  починає розкладатись з виділенням хлороводню. Тому до нього вводять термостабілізатори (солі кальцію, цинку, барію). На практиці мають справу з вініпластами, пластикатами і пластизолями ПВХ, а також полівінілхлоридним волокном.

- *вініпласти* — жорсткі матеріали на основі ПВХ, що містять стабілізуювальні добавки і мастильні речовини. Характеризується високою міцністю, ударною в'язкістю, антикорозійними властивостями. Використовується в машинобудуванні.

- *пластикати* — м'які матеріали на основі стабілізованого і пластифікованого ПВХ. Характеризуються негорючістю, еластичністю, технологічністю у переробці. Використовується як електроізоляційні покриття (кабельні пластикати) для роботи в діапазоні температур від  $-60$  до  $70^{\circ}\text{C}$ .

- *пластизолі* (пасти) — дисперсії ПВХ у пластифікаторах. Використовується для виготовлення штучних шкір, взуття, іграшок. Широкого застосування набули спінені ПВХ (піно- і поропласти).

Полівінілхлорид - хімічно стійкий, хороший електроізолятор, не горить, його різновид вініпласт (без пластифікаторів) використовується в будівництві, комунальному господарстві, харчовій промисловості.

**Поліуретани** - мають високу еластичність, стійкість в атмосфері,  $t_{роб} = -70...150^{\circ}\text{C}$ , йдуть на виготовлення плівок, волокон, поролону.

**Поліформальдегід** - простий поліефір, кристалічний, має високу твердість, пружність, значну ударну в'язкість. З нього виготовляють деталі автомобілів, шестерні, підшипники, деталі конвеєрів.

### **Реактопласти**

*Термореактивні пластмаси (реактопласти)* — полімерні матеріали, які при нагріванні розм'якшуються, але при певній температурі і під дією твердників, каталізаторів чи ініціаторів хімічних реакцій зазнають полімеризації, внаслідок якої переходять у твердий стан і повторна переробка таких пластмас неможлива. Теплостійкість їхня вища і досягає  $200...370^{\circ}\text{C}$ .

Термореактивні полімери порівняно рідко використовуються у чистому вигляді. Зазвичай, у них вводять наповнювачі (дисперсні, волокнисті суцільні), розчинники, згущувачі, стабілізатори, барвники, змазки, завдяки чому отримують складні багатокомпонентні системи — реактопласти. Полімерну основу реактопласта (термореактивний полімер) називають «смола» або «сполучник».

Залежно від типу сполучника реактопласти поділяються на:

- *фенопласти*, що базуються на фенолоальдегідних смолах;
- *амінопласти*, що утворюються на основі аміносмол;
- *поліефірні*, отримані на основі поліефірних смол і скловолоконних наповнювачів;
- *епоксидні* — мономерні, олігомерні або поліефірні сполуки, у склад молекул яких входить не менше двох епоксидних або гліцидилових груп;
- *кремнійорганічні*, що отримані на основі кремнійорганічних олігомерів, що містять гідроксильні і ефірні групи.
- *поліуретанові*, що отримуються на основі поліуретанових полімерів, котрі містять в основному ланцюгу макромолекул уретанові групи.
- *алкідні*, котрі базуються на алкідних смолах (гліфталевій, пентафталевій, етрифталевій).

*Термореактивні пластмаси* — це композити з наповнювачами на основі фенолформальдегідних, фенолоальдегідних, поліепоксидних, поліефірних смол та полісилоксанів (кремнійорганічних сполук). Після затвердіння їх фізико-механічні властивості мало змінюються з температурою. В якості наповнювачів, які вводяться до 70%, використовуються:

- порошки (деревне борошно, слюда, кварц, каолін, азбест, сажа);
- волокна (азбест, бавовна, скловолокно, полімерне волокно);
- листи (тканина, склотканина, деревний шпон, папір та ін.).

*Пластмаси з волокнистими наповнювачами*;;

- волокніти - композити з волокнами бавовни;
- азбоволокніти - наповнювачем в азбест, вяжуче - фенолформальдегідна смола, мають підвищену теплостійкість (до  $200^{\circ}\text{C}$ ) і коефіцієнт тертя 0,35. З них виготовляють гальма;
- скловолокніти - композити з довгим скловолокном, мають підвищену

міцність на розтяг 600... 3500 МПа;

- скловолокніти з коротким волокном - йдуть на виготовлення корпусів, кузовів автомобілів, човнів тощо.

*Пластмаси з шаруватими (листовими) наповнювачами.*

В якості в'язучого використовують переважно фенолформальдегідні, карбамідні та інші смоли.

*Гетинакс* - одержують методом пресування листів паперу, просочених смолою. Розрізняють електротехнічний гетинакс (для монтажу електро- та радіосхем) та декоративний гетинакс (для облицювання кабін, вагонів, приміщень).

*Текстоліт* - одержують пресуванням просочених смолою бавовняних тканин. Розрізняють текстоліти конструкційні (для виготовлення деталей машин, шестерень), електротехнічні та для прокладок.

*Деревошаруватий пластик (ДШП).* Наповнювачем для нього служить деревний шпон. З нього виготовляють деталі машин, обшивку вагонів, човнів (як водостійка фанера).

*Азботекстоліт* - містить до 60% азбесту. З нього виготовляють гальма, фрикційні диски, оскільки має високий коефіцієнт тертя 0,3...0,4.

*Склотекстоліт* - наповнювачем тут служить склотканина. Має високі електроізоляційні властивості, тепло- і морозостійкість. СВМ - скловолокнистий анізотропний матеріал, має дуже високі механічні властивості (міцність, пружність, ударну в'язкість), що досягаються спеціальним формуванням джгутів із скловолокна та їх орієнтованою укладкою.

### **3. Газонаповнені пластмаси**

В'язучим для них можуть бути як термопласти, так і реактопласти, "наповнювачем" є пори, пустоти, які створюються за допомогою газуючих речовин-порофторів.

*Пінопласти* мають пори, комірки яких ізольовані одна від одної, використовуються як теплоізолятори, а також звукоізолятори і амортизатори.

*Поропласти* - губчасті матеріали з порами, що з'єднуються. Їх густина та об'єм легко змінюються,  $\rho = 20...500 \text{ кг/м}^3$ . Використовуються як амортизатори сидінь в авіабудуванні, залізничному транспорті та автомобільній промисловості.

*Сотопласти* мають порівняно великі пори, що створюються під час їх формування з пластмаси: - термогекіта. Мають високі теплоізоляційні та електроізоляційні властивості та прозорість для радіохвиль. Використовуються для теплоізоляції, обшивки, оздоблення тощо.

### **Еластомери**

*Високоеластичні пластмаси (еластомери)* — матеріал, який може розширюватися і стискатися, суттєво змінюючи свою форму в результаті прикладання зусиль і здатний під дією внутрішніх пружних сил повертатись до попередньої форми. Еластомери майже повністю замінили гумові еластомери із сировини природного походження, а також знайшли низку нових застосувань, недоступних для звичайної гуми.

Еластомери застосовуються у промисловості переробки пластмас найчастіше як високомолекулярні пластифікатори для зниження крихкості склоподібних або кристалічних полімерів. Обмеженням застосування

еластомерів у складі композитів на основі пластмас є низький опір їхньому тепловому старінню і термоокислювальній деструкції, а також, неможливість їхнього виробництва у гранульованому вигляді. Основні види еластомерів:

- *ізопренові каучуки* (синтетичний аналог натурального каучуку) — полімери ізопрену, отримані полімеризацією у розчині під дією комплексних каталізаторів типу Ціглера-Натта або під дією літійорганічного каталізатора. Переробляється методами, прийнятими для гумової промисловості і застосовується самостійно і в сумішах з іншими каучуками для виробництва автошин та інших гумовотехнічних виробів;

- *бутадієновий каучук* — застосовується як каучук загального призначення а також, як високомолекулярний пластифікатор, що підвищує морозостікість пластмас. Використовується як компонент удароміцного полістиролу;

- *бутадієн-стирольні каучуки* — використовуються як недорогі каучуки загального призначення та як пластифікатори полістирольних пластиків;

- *кремнійорганічні каучуки* — еластомери, у яких основний ланцюг є неорганічним. Вирізняється хімічною стійкістю, нетоксичністю при горінні, фізіологічною інертністю. Гуми на основі кремнійорганічних каучуків стійкі у широкому діапазоні температур ( $-90...+300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), мають хороші діелектричні властивості. Використовується для виготовлення виробів, що працюють в умовах великого перепаду температур, для теплоізоляції космічних апаратів, виробів медичного призначення, деталей ущільнень холодильної техніки;

- *термоеластопласти (ТЕП)* — термопластичні еластомери, що проявляють властивості м'яких гум (еластомерів) в умовах експлуатації, тоді як при високих температурах в умовах переробки вони здатні текти як розплави термопластів. Переробка ТЕП здійснюється традиційними методами, характерними для термопластів.