

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ**

**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**

**В. І. Скуріхін, О. Ф. Бабічева**

## **КОНСТРУКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ**

### **КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ**

*(для студентів I курсу всіх форм навчання освітнього рівня «бакалавр» за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка)*

**Харків  
ХНУМГ ім. О.М. Бекетова  
2018**

УДК 669 (042.3)

C46

**Скуріхін В. І.** Конструкційні матеріали : конспект лекцій для студентів 1 курсу всіх форм навчання освітнього рівня «бакалавр» за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / В. І. Скуріхін, О. Ф. Бабічева; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. – 61 с.

Автори:

канд. техн. наук, доц. В. І. Скуріхін,  
канд. техн. наук, доц. О. Ф. Бабічева,

Рецензент:

**Д. Ю. Зубенко**, кандидат технічних наук, доцент Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

*Рекомендовано кафедрою електричного транспорту, протокол № 7 від 16 січня 2017 р.*

Конспект лекцій складено з метою допомогти студентам електромеханічних спеціальностей вузів під час підготовки до занять, заліків та іспитів із курсу «Конструкційні матеріали».

© В. І. Скуріхін, О. Ф. Бабічева, 2018  
© ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018

## ЗМІСТ

|  |    |
|--|----|
| ВСТУП.....   | 4  |
| 1 БУДОВА МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ.....                              | 5  |
| 2 КРИСТАЛІЗАЦІЯ І БУДОВА МЕТАЛЕВОГО ЗЛИВКА.....              | 9  |
| 3 МЕТАЛЕВІ СПЛАВИ.....                                       | 10 |
| 3.1 Взаємодія металів у твердому стані.....                  | 11 |
| 4 УТВОРЕННЯ ХІМІЧНИХ СПОЛУК.....                             | 12 |
| 5 ОСНОВНІ ТИПИ ДІАГРАМ СТАНУ СПЛАВІВ.....                    | 13 |
| 5.1 Правило фаз і відрізків.....                             | 17 |
| 5.2 Зв'язок властивостей сплавів з типом діаграм станів..... | 19 |
| 6 ДІАГРАМА СТАНУ «Fe – C».....                               | 20 |
| 7 ОСНОВИ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ.....                              | 24 |
| 7.1 Термічна обробка.....                                    | 24 |
| 7.2 Відпал. Нормалізація.....                                | 26 |
| 7.3 Гарт і відпуск.....                                      | 27 |
| 7.4 Хіміко-термічна обробка.....                             | 30 |
| 8 МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ.....                      | 31 |
| 8.1 Класифікація сталі (загальна).....                       | 31 |
| 8.2 Чавуни.....  | 33 |
| 8.3 Пластична деформація і рекристалізація металів.....      | 35 |
| 9 КОЛЬОРОВІ МЕТАЛИ.....                                      | 40 |
| 9.1 Алюміній і його властивості.....                         | 40 |
| 9.2 Мідь.....  | 45 |
| 9.3 Інші кольорові метали.....                               | 47 |
| 10 НЕМЕТАЛІЧНІ КОНСТРУКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ.....                  | 49 |
| 10.1 Типові термопластичні матеріали.....                    | 51 |
| 10.2 Типові термореактивні матеріали.....                    | 53 |
| 10.3 Гумові матеріали.....                                   | 55 |
| 10.4 Композиційні матеріали.....                             | 56 |
| СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....                        | 61 |

## ВСТУП

Основна вимога машинобудування – поліпшення якості матеріалів деталей машин і механізмів. Металографія виникла в ХІХ ст. як самостійна галузь знання і наукова дисципліна. Металознавство охоплює широке коло питань, вивчає все, що відноситься до будови або структури металів і сплавів. Відомо більше 50 чистих металів і безлічі сплавів. Метою металознавства є вивчення структури і властивостей металів і їх сплавів, обґрунтування вибору металів для тих або інших цілей, а також розробка або дослідження нових металевих матеріалів, що володіють потрібними властивостями. «Матеріалознавство» ще більше розширило охоплювані питання.

Ця наука виникла в практиці російських металургійних заводів. Основоположниками її були В. А. Аносов, Д. К. Чернов. В. А. Аносов на Златоустовському заводі займався виробництвом булатної сталі. Всі її властивості пов'язані з виплавою і подальшою тепловою обробкою. Вперше в 1831 р. він застосував мікроскоп для дослідження структури сталі, звернув увагу на залежність властивостей сталі від її структури, основоположник сучасних легованих сталей.

Д. К. Чернов у 1866 р. на Обухівському заводі керував заміною бронзових гармат на сталеві. Зробив ряд теоретичних відкриттів: критичні точки (1869), структура зливка, поліморфізм заліза.

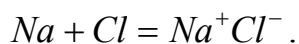
Перша діаграма Чернова. Точка «А» визначена за появою гарту, точка «В» – за перетворенням сталі з великокристалічної будови в дрібнокристалічну будову. Він першим відмітив, що при нагріві існує температура, нижче за яку звичайна сталь не гартується. Визначив температуру точки «В», що відповідає темно-червоному кольору коління і різна для сталей з різним вмістом вуглецю. Визначив точку «Х» – початок плавлення сталі. Точка «С» – кінець плавлення сталі. Відкрив точки «D» і «Е». Точка «D» – приблизно 200 °С і відповідає температурі, до якої треба швидко охолоджувати сталь при гарті, щоб отримати високу твердість. Точка «Е» – приблизно 450 °С. При цій температурі відбувається повний «відпуск» сталі. Розробив вчення про будову сталевих зливок, вперше вказав на кристалічну будову металів.

## 1 БУДОВА МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ

Характерною особливістю будови атомів металів є мале число електронів на зовнішній орбіті і їх слабкий зв'язок з ядром. Легкість відриву валентних електронів від ядра вважається обумовлюючою всі основні властивості металів.

У твердих тілах існують чотири типи зв'язків:

1. *Іонні*, коли при взаємодії один атом віддає свої електрони іншому і, як результат, один з них стає позитивно зарядженим, а інший – негативно:



2. *Ковалентні* зв'язки в однойменних атомів і при утворенні ряду металевих з'єднань. Засновані на тому, що при взаємодії атомів відбувається немовби усуспільнення двох або декількох електронів. Ці узагальнені електрони одночасно належать декільком атомам. Стійкою конфігурацією зовнішньої орбіти є така, коли на ній 8 електронів.

3. *Металевий* зв'язок характеризується наявністю як би каркаса з позитивно заряджених іонів і усередині нього вільно переміщуються валентні електрони. При цьому переміщенні вони взаємодіють одночасно з декількома позитивно зарядженими іонами і утворюють зв'язок з ними. Приводить до утворення твердих кристалічних тіл.

4. *Молекулярний* зв'язок (Ван-дер-Ваальса). Існує в ряду речовин між молекулами з ковалентними внутрішньомолекулярними зв'язками. Приклад – парафін, який має низьку температуру плавлення, що свідчить про неміцність кристалічної молекулярної решітки.

*Всі тверді тіла розділяються на дві групи:*

- аморфні;
- кристалічні.

На відміну від аморфних тіл, кристалічні тіла характеризуються трьома особливостями:

- 1) розташуванням атомів або у внутрішній будові;
- 2) у властивостями;
- 3) процесом кристалізації або переходом з рідкого стану в твердий.

На відміну від аморфних тіл, кристалічні тіла володіють закономірним розташуванням атомів. Атоми розташовуються в певному порядку, на певних відстанях один від одного, утворюючи елементарні або кристалічні решітки.

Елементарні решітки (рис.1.1) – мінімальна група атомів, що утворює правильну геометричну фігуру, переміщенням або трансляцією якої можна побудувати весь кристал.

1. Кути між гранями:

$$xZ - \alpha$$

$$yZ - \beta$$

$$xY - \gamma$$

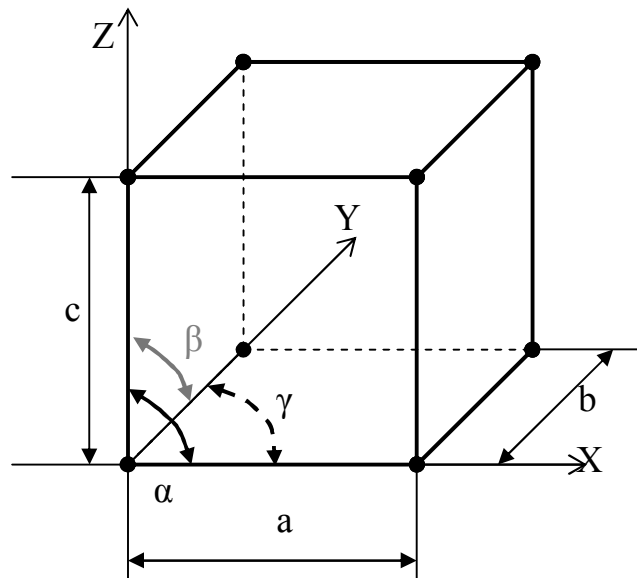


Рисунок 1.1 – Елементарні решітки металів

2. Відстані між атомами:

$x \rightarrow a$ ;  $y \rightarrow b$ ;  $z \rightarrow c$ . Це *параметри решіток*.

Існує сім кристалічних систем залежно від кутів і параметрів:

|                  |  |                     |
|------------------|--|---------------------|
| 1) триклінна     | $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$  | $a \neq b \neq c$ ; |
| 2) моноклінна    | $\alpha = \beta = 90^\circ \neq \gamma$        | $a \neq b \neq c$ ; |
| 3) ромбічна      | $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$           | $a \neq b \neq c$ ; |
| 4) ромбоєдрична  | $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$        | $a = b = c$ ;       |
| 5) кубічна       | $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$           | $a = b = c$ ;       |
| 6) тетрагональна | $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$           | $a = b < c$ ;       |
| 7) гексагональна | $\alpha = \beta = 90^\circ \gamma = 120^\circ$ | $a = b < c$ .       |

Ці сім систем можуть утворювати 14 типів просторових решіток.

*Кубічні системи дають три типи просторових решіток:*

1) *звичайний (простий) куб*, коли атом розташований тільки по вершинах куба (метали так не кристалізуються);

2) *об'ємцентрований куб (ОЦК)*, коли окрім 8 атомів у вершинах є 1 атом в центрі куба. Такі решітки мають багато металів:  $Fe_\alpha, W, Cr, V, Mo, Pb, Nb$ ;

3) *гранецентрований куб (ГЦК)*, коли окрім 8 атомів у вершинах є ще атоми в центрі кожної грані. Такі решітки також мають багато металів:  $Fe_\gamma, Ni, Al, Ag, Au, Cu, Pt$ .

Приклади інших типів решіток:

1) тетрагональна об'ємцентрована (рис. 1.2)

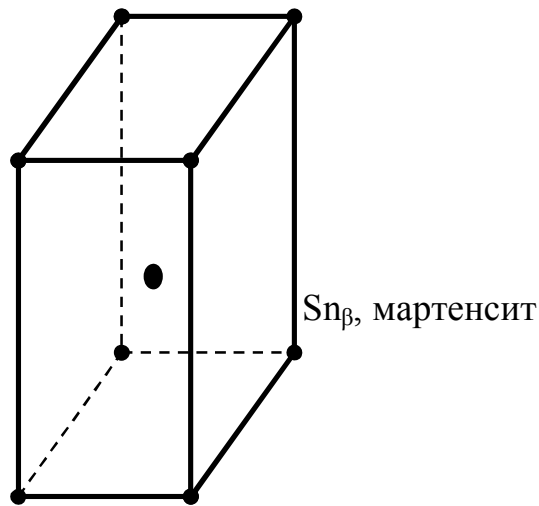


Рисунок 1.2 – Тетрагональна об'ємоцентрована решітка

2) гексагональна з центрованими основами (рис. 1.3)

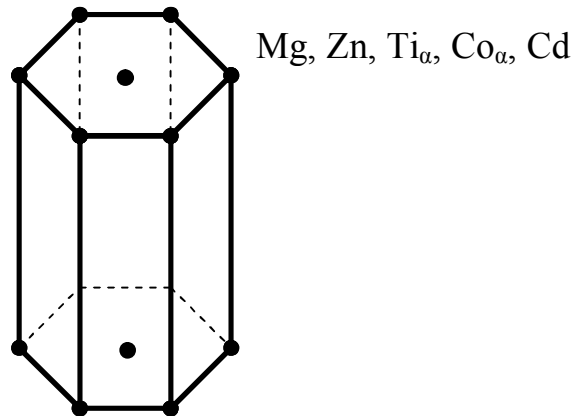


Рисунок 1.3 – Гексагональна з центрованими основами

Щільність різних кристалічних решіток різна і характеризується координаційним числом  $K$ , під яким розуміють число атомів, що знаходяться на рівній і найменшій відстані від даного атома. Для  $ОЦК$   $K = 8$ , для  $ГЦК$   $K = 12$ .

У кристалах завжди є дефекти (недосконалість) будови, викликані порушенням розташування атомів у кристалічній решітці. Дефекти кристалічної будови за геометричними ознаками підрозділяють на точкові, лінійні й поверхневі.

1. «**Точкові дефекти**» – вакансії й міжвузлові атоми. Окремі атоми мають енергію, що перевершує середню і можуть переміщуватися з одного місця в інше. Такі атоми, особливо розташовані ближче до поверхні, виходять на поверхню, а їх місце можуть зайняти атоми, що знаходяться далі від поверхні. Звільнене місце, де знаходився атом, який перемістився, називається «**вакансією**». Число вакансій збільшується з підвищенням температури, при обробці тиском, опромінюванні та інших видах обробки. Вакансії відіграють важливу роль в дифузійних процесах, що відбуваються в металах і сплавах «**Міжвузлові дефекти**» утворюються в результаті переходу атома з вузла

решітки в міжвузол кристалічної решітки. Точкові дефекти приводять до спотворення кристалічної решітки.

2. «**Лінійні дефекти**» – дислокації. Розрізняють два види дислокацій: *крайові* і *гвинтові*. Крайові дислокації є місцеві спотворення кристалічної решітки; гвинтова дислокація утворюється при неповному зрушенні кристала по площині. Дислокації утворюються у процесі кристалізації, при хімічній і хіміко-термічній обробках, пластичній деформації та інших видах дій на структуру сплавів.

3. «**Поверхневі дефекти**» є поверхні розділу між окремими кристалами і їх блоками.

Метали і сплави знаходяться в трьох агрегатних станах: твердому, рідкому, газоподібному. Перехід металу з рідкого стану в твердий називають **кристалізацією**. Цей вид кристалізації називається *первинною кристалізацією* на відміну від *вторинної кристалізації* (перекристалізації), яка має місце в твердому металі. У чистих металах твердий стан переходить в рідкий при температурі плавлення, рідкий в газоподібний – при температурі кипіння. Температура плавлення металів коливається від  $-39^{\circ}\text{C}$  (для ртуті) до  $3390^{\circ}\text{C}$  (для вольфраму). Процес кристалізації складається з двох елементарних процесів:

- 1) зародження центрів кристалізації (утворення зародків кристалів);
- 2) зростання кристалів навколо цих зародків.

Не всяка частинка твердої фази може бути центром кристалізації. Їм можуть бути частинки, збільшення розмірів яких приводить до зменшення вільної енергії, тобто центром кристалізації є частинки з розміром  $r > r_k$ , а всі частинки менші, ніж  $r_k$ , розчинятимуться. Процес кристалізації, тобто число зародків (ч. з.) і швидкість кристалізації (ш. к.) залежать від ступеня переохолодження.

Число зародків – це число центрів кристалізації, що виникають в одиницю часу в одиниці об'єму.

Швидкість кристалізації – лінійні зміни розмірів кристалів в одиницю часу.

Ступінь переохолодження – це різниця між теоретичною і дійсною температурою кристалізації.

Кристал – це геометрично правильна фігура з плоскими гранями, що природно утворилася, форма якої залежить від типу просторової решітки.

Зерно – неповногранний кристал із закругленими гранями. Утворюється в результаті зіткнення сусідніх зерен при кристалізації.

Дендрит – спотворений кристал деревовидної форми. Швидко росте в одному вертикальному напрямі. Можуть виникати осі другого порядку, третього і т.д. У результаті дендрит перетворюється на зерно.

### Контрольні питання

1. Яка найбільш щільно упакована кристалічна решітка металу?



2. Як називається здатність металу утворювати різні типи кристалічних решіток?
3. Які бувають типи зв'язків в твердих тілах?
4. Як змінюється концентрація вакансій при підвищенні температури?
5. Які умови тепловідведення сприяють утворенню стовпчастих кристалів?
6. Що сприяє зменшенню розміру зерна при розливанні модифікованого металу?
7. Що таке кристалізація?
8. Що таке дендритна ліквіація?

## 2 КРИСТАЛІЗАЦІЯ І БУДОВА МЕТАЛЕВОГО ЗЛИТКА

*У структурі зливка розрізняють три основних зони:*

- 1) зовнішня зона дрібних рівновісних кристалів;
- 2) зона шестовидних крупних кристалів, витягнутих перпендикулярно до поверхні зливка;
- 3) центральна частина зливка (зона крупних рівновісних кристалів).

**Усадочні раковини** утворюються завдяки тому факту, що перехід переважної більшості металів з рідкого стану в твердий супроводжується суттєвим зменшенням об'єму.

**Поліморфізмом або алотропією** називають здатність металу в твердому стані при зміні температури перебудовувати свою кристалічну решітку. Поліморфні перетворення супроводжуються виділенням або поглинанням теплоти, а також зміною властивостей металу. Різні алотропічні стани називають модифікаціями. Кожній модифікації властиво залишатися стійкою лише в межах визначеного для даного металу інтервалу температур. Алотропічні форми позначають грецькими буквами  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  і т. д. На кривих охолодження і нагріву перехід з одного стану в інший характеризується зупинкою (для чистих металів) або зміною характеру кривої (для сплавів). При алотропічних перетвореннях, окрім змін властивостей (теплопровідність, електропровідність, механічні, магнітні властивості), спостерігають зміни об'єму металу і розчинності (наприклад, вуглецю в залізі). Алотропічні перетворення властиві багатьом металам (*Fe, Sn, Ti* та ін.).

Для заліза крива охолодження має наступний вигляд (рис. 2.1).

В інтервалі 911 – 1392 °С *Fe* має ГЦК, а в інтервалі від 0 до 911 °С і від 1392 °С до 1539 °С – ОЦК. Змінюються також магнітні властивості при температурі 768 °С.

–  $Fe_{\delta}$  – ОЦК  $a = 2,93A^{\circ}$  ;

–  $Fe_{\gamma}$  – ГЦК  $a = 3,64A^{\circ}$  – немагнітні;

–  $Fe_{\beta}$  – ОЦК  $a = 2,90A^{\circ}$  – немагнітні.

–  $Fe_{\alpha}$  – ОЦК не супроводжується змінами решітки, але змінюються магнітні властивості.

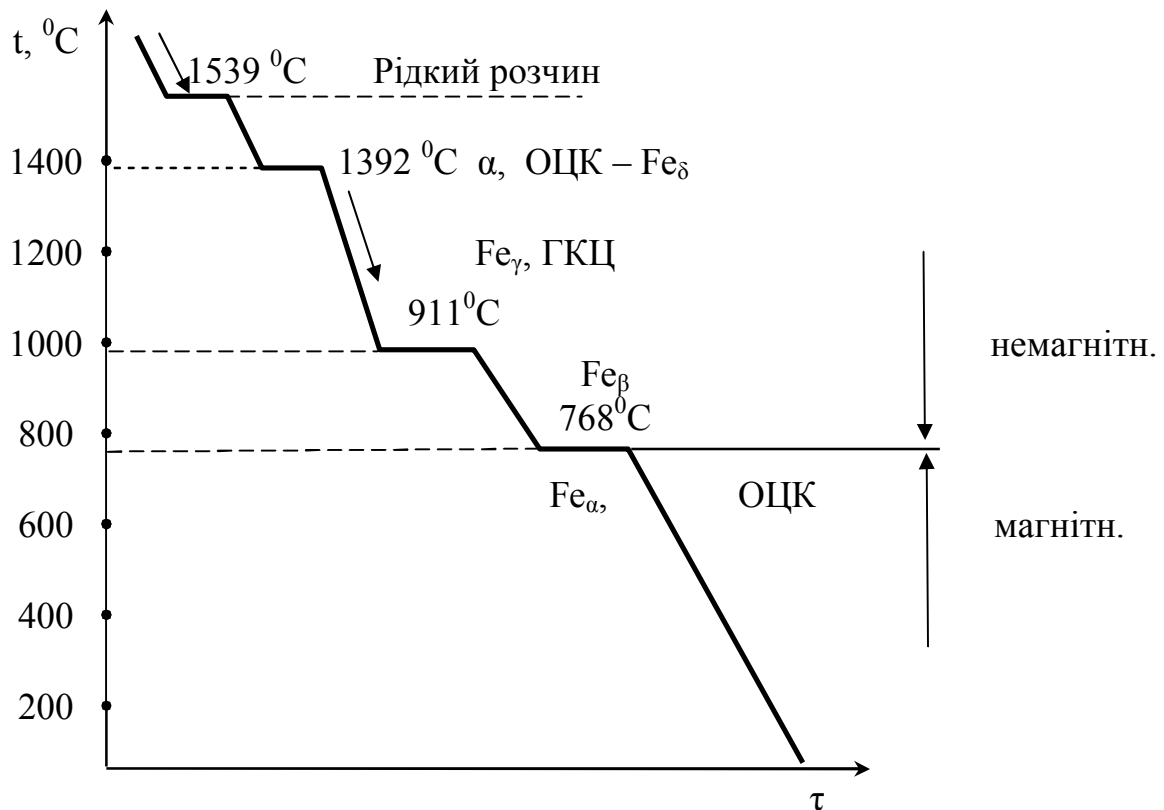


Рисунок 2.1 – Крива охолодження заліза

### Контрольні питання

1. Що таке усадочна раковина?
2. Які зони розрізняють в структурі зливка?
3. Що таке алотропія або поліморфізм?
4. Що означає крива охолодження заліза?
5. Які бувають типи кристалічних решіток?

## 3 МЕТАЛЕВІ СПЛАВИ

Металевий сплав отримують сплавом двох або більш металів; сплавом переважно металів з неметалами; спіканням порошків декількох металів. Отримане з'єднання володіє вищими властивостями, ніж чисті метали.

Елемент, що входить до складу сплаву, називається *компонентом*. Компонент, переважаючий в сплаві кількісно, називається *основним*. Компоненти, що вводяться в сплав для додання йому потрібних властивостей, називаються *легуючими*. Сукупність компонентів сплаву називається *системою*.

Сплави класифікують за кількістю компонентів – на подвійні (бінарні), потрійні, четверні і багатоконпонентні; за основним елементом – залізні, алюмінієві, магнієві, титанові, мідні і т. д.; за використанням – конструкційні,

інструментальні, жароміцні, антифрикційні, пружинні, шарикопідшипникові і т. д.; за щільністю – важкі (на основі вольфраму, ренію, свинцю та ін.), легкі (алюмінієві, магнієві, берилієві та ін.); за температурою плавлення – тугоплавкі (на основі ніобію, молібдену, танталу, вольфраму та ін.), легкоплавкі (припої, бабіти, друкарські сплави та ін.); за технологією виготовлення напівфабрикатів і виробів – ливарні, деформовані, спечені, гранульовані, композиційні і т.д.

Залежно від природи компонентів і від співвідношення їх масових кількостей сплави після твердіння можуть утворювати механічні суміші, тверді розчини і хімічні сполуки. Завжди виходять з випадку необмеженої розчинності металів в рідкому стані.

### 3.1 Взаємодія металів у твердому стані

1. *Механічні суміші* утворюються, коли з рідкого розплаву одночасно випадають кристали складових його компонентів. Це має місце, коли компоненти не здібні до взаємного розчинення у твердому стані або володіють обмеженою розчинністю.

2. *Тверді розчини* утворюються тоді, коли кристали сплаву містять одночасно декілька компонентів, які можуть входити до складу кристалів у довільних вагових кількостях. При утворенні твердих розчинів кристалічна решітка розчинника зберігається, змінюються тільки її параметри. Якщо кристалічні решітки компонентів однакові і атомні розміри відрізняються не більше, ніж на 15%, то такі компоненти утворюють тверді розчини (необмежений розчин).

*Розрізняють три типи твердих розчинів:*

- 1) заміщення;
- 2) впровадження;
- 3) віднімання.

*Тверді розчини заміщення мають три різновиди:*

- 1) тверді розчини заміщення необмеженої розчинності;
- 2) тверді розчини заміщення обмеженої розчинності (хоча б одна з перерахованих умов не виконується);
- 3) впорядковані тверді розчини або надструктури, в яких атоми речовини, які розчиняються, займають тільки певні місця в решітці розчинника ( $CuAg, Cu_3Au$ ).

*Тверді розчини впровадження* – атоми речовини, які розчиняються, впроваджуються в просторову решітку розчинника. При цьому атоми розчинюючої речовини значно менші за атоми розчинника:

$$\frac{d_{\text{розчинююч.}}}{d_{\text{розчинника}}} \leq 0,59,$$

$Fe, C, N$  можуть бути тільки обмеженої розчинності.



2) переважне число інтерметалевих з'єднань не підкоряються законам валентності і ці хімічні сполуки виділяють в особливу групу – група проміжних фаз (їх багато типів).

*Правило фаз* – встановлює залежність між числом компонентів, числом змінних зовнішніх факторів рівноваги і числом фаз.

$$C = K + P - \Phi,$$

де  $C$  – число ступенів свободи – це число зовнішніх і внутрішніх чинників рівноваги, які можна змінювати, не змінюючи стан системи.

1.  $X$  – внутрішні фактори (концентрація або склад);

2.  $t^\circ$   
3.  $P$  } зовнішні фактори.

*Фаза* – це однорідна складова в неоднорідній системі, відокремлена фізичною щільністю розділу.

*Компонент* – складова системи. Можуть бути чисті метали й стійкі хімічні сполуки.

$$C = K + 1 - \Phi \text{ – для металів.}$$

### **Контрольні питання:**

1. Визначення понять система, компонент, фаза?
2. Що таке правило фаз?
3. Що таке тверді розчини впровадження?
4. Що таке хімічні сполуки?
5. На які групи ділять хімічні сполуки?

## **5 ОСНОВНІ ТИПИ ДІАГРАМ СТАНУ СПЛАВІВ**

Для характеристики змін структури сплавів залежно від складу і температури будують діаграми стану. Вони є графічним зображенням рівноважного або нерівноважного стану сплавів і будують їх в координатах температура – стан.

Знання діаграм стану дозволяє науково обґрунтовано вибирати сплави із заданими властивостями, режими литва, термічної обробки і обробки тиском.

Діаграми стану звичайно будують за допомогою термічного методу аналізу. Суть цього методу – визначення критичних точок.

Будують криві охолодження, які виражають графічну залежність між зміною температури металу (сплаву) при охолодженні й часом, протягом якого ці зміни відбуваються. Ці криві будують в координатах:  $t^\circ C$  – вісь ординат,  $\tau$  (час охолодження) – вісь абсцис.

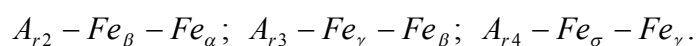
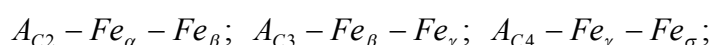
Фазові перетворення в металах і сплавах супроводжуються тепловими ефектами і на кривих охолодження можна спостерігати зупинки (площадки) або перегини. Поява площадок говорить про те, що фазові перетворення відбуваються при постійній температурі. Перегини з'являються в результаті зміни швидкості охолодження, в цьому випадку фазові перетворення протікають в інтервалі температур.

Деякі критичні точки, будучи визначені при нагріві й охолодженні, мають різну температуру. Тому вводять два умовних знаку:

$r$  – якщо критичні точки визначені при охолодженні;

$C$  – при нагріві.

Критичні точки в сплавах заліза з вуглецем позначають буквою  $A$  із значком  $C$  або  $r$ :



Початок і кінець фазових перетворень температури, визначувані по кривих охолодження, називаються *критичними*. Відповідні ним точки на кривих охолодження називаються *критичними точками*. На основі кривих охолодження будується діаграма стану сплавів.

Діаграма стану подвійних сплавів першого типу, які створюють при твердінні механічну суміш, характеризує сплави, компоненти яких в рідкому стані необмежено розчинні один в одному, а в твердому стані не розчинні і не утворюють хімічної сполуки. Приклади:  $Pb - Sb$ ;  $Pb - Sn$ ;  $Zn - Sn$  (рис.6). Ці діаграми утворюють *евтектику*.

**Евтектика** – це механічна суміш кристалів, що утворилася в результаті їх одночасної кристалізації.

Евтектика володіє трьома основними властивостями:

- 1) постійна концентрація або склад;
- 2) постійна температура кристалізації;
- 3) найнижча температура кристалізації в даній системі сплаву.

*Лінія ABC (ліквідус)* – геометричне місце точок початку кристалізації.

*Лінія EBD (солідус)* – геометричне місце точок кінця кристалізації сплаву.

Це ж лінія евтектики.

Сплави, що кристалізувалися по такій діаграмі, діляться на три групи:

- 1) *евтектичні* – концентрація точки В. Їх структура – евтектика;
- 2) *доевтектичні* – сплави, розташовані зліва від точки В. Їх структура – кристали  $Pb$  + евтектика;
- 3) *заевтектичні* – сплави, розташовані праворуч від точки В. Їх структура – кристали  $Sb$  + евтектика.

Приклад побудови діаграми Pb - Sb

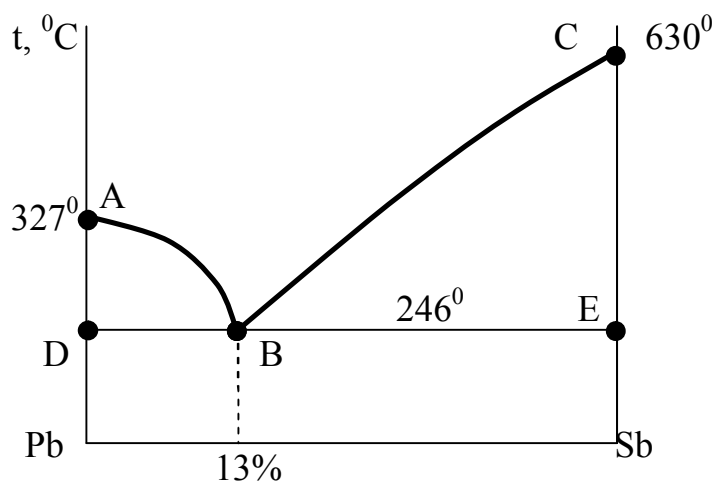


Рисунок 6 – Діаграма стану сплавів I типу

Кристали *Pb* і *Sb*, випадні самостійно, називаються структурно-вільними, а що випали одночасно в евтектиці називаються структурно-зв'язаними, оскільки вони разом утворюють одну структуру.

*Структурна складова* – це окрема відособлена частина сплаву, що має під мікроскопом певну будову з властивими їй особливостями.

*Структура і фаза* – це різні поняття, правда, вони іноді співпадають.

Діаграма стану подвійних сплавів другого типу - характеризує сплави, компоненти яких володіють повною взаємною розчинністю, як в рідкому, так і в твердому стані і не утворюють хімічних сполук. Приклад: *Cu - Ni*; *Fe - Ni*; *Fe - Cr*; *Bi - Sb* та інші (рис.7). Розглянемо *Cu - Ni*.

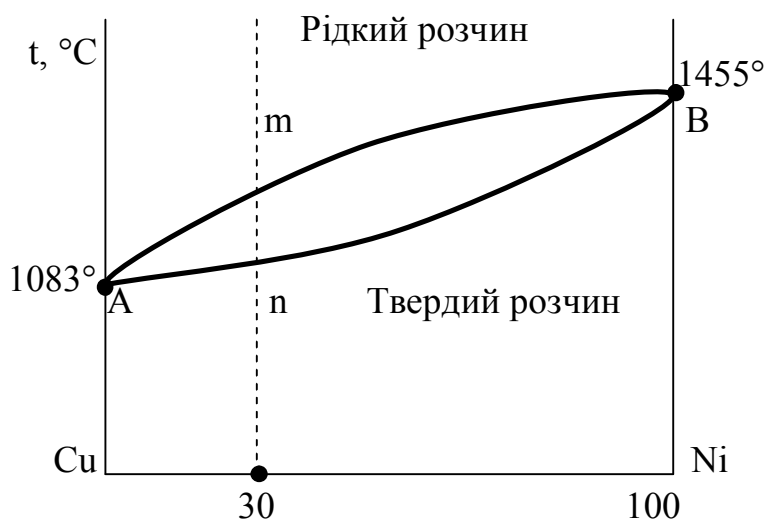


Рисунок 7 – Діаграма стану сплавів II типу

*Лінія AmB* – лінія ліквідус, *лінія AnB* – лінія солідус, нижче за цю лінію сплави знаходяться у вигляді твердого розчину. Між лініями ліквідус і солідус знаходиться двофазна область, в якій одночасно існують кристали твердого розчину і рідкі розчини. Бувають випадки розпаду твердих розчинів з

утворенням евтектоїда і перетектоїда, а також інші випадки, які вказують на перетворення в твердих сплавах (поліморфні) (рис.8).

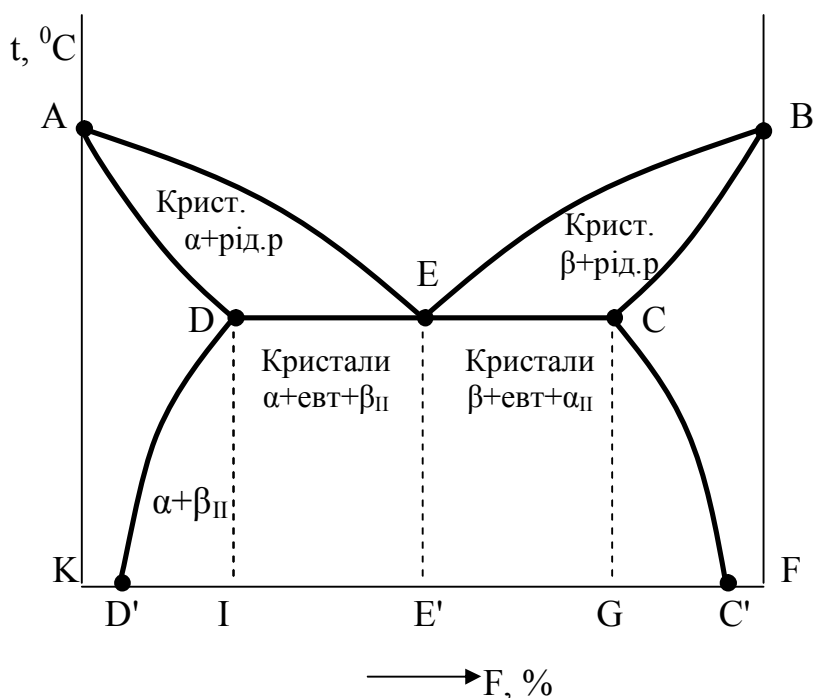


Рисунок 8 – Діаграма стану сплавів III типу

Діаграма стану сплавів з обмеженою розчинністю у твердому стані третього типу характеризує сплави, в яких обидва компоненти необмежено розчинні в рідкому стані, обмежено – в твердому і утворюють при кристалізації евтектику. Приклад:  $Al - Cu$ ;  $Fe - C$ ;  $Mg - Al$ ;  $Mg - Zn$  та ін.

Лінія  $AEB$  – лінія ліквідус, вище за неї всі сплави в рідкому стані. Лінія  $ADCEB$  – лінія солідус, нижче за цю лінію всі сплави в твердому стані.

По лінії  $AE$  виділяються кристали твердого розчину компонента  $F$  в  $K$ , якому привласнена назва твердого  $\alpha$  – розчину. По лінії  $BE$  виділяються кристали твердого розчину  $K$  в  $F$ , який позначають  $\beta$  – розчин. Гранична розчинність  $F$  в  $K$  визначається лінією  $DD'$ , а гранична розчинність  $K$  в  $F$  – лінією  $CC'$ .

Як видно з діаграми, розчинність  $F$  в  $K$  і  $K$  в  $F$  міняється із зміною температури. Може бути такий випадок, коли компонент  $F$  розчинимо в  $K$ , і розчинність змінюється із зміною температури (лінія  $DD'$ ), розчинність  $K$  в  $F$  не змінюється із зміною температури (лінія  $CG$ ). Область  $ADEA$  є рідкий розчин і кристали твердого  $\alpha$  – розчину; область  $BECB$  – рідкий розчин і кристали твердого  $\beta$  – розчину; область  $ADD'KA$  – кристали твердого  $\alpha$  – розчину; область  $BCC'FB$  – кристали твердого  $\beta$  – розчину; область  $DEE'I$  – евтектика, кристали  $\alpha$  – розчину і  $\beta_{II}$  – фази; область  $ECGE'$  – евтектика, кристали  $\beta$  – розчину і  $\alpha_{II}$  – фази.

Діаграма стану із стійкою хімічною сполукою четвертого типу – характеризує сплави, компоненти яких необмежено розчинні в рідкому стані, не розчинні в твердому і утворюють стійку хімічну сполуку.



Приклад:  $Mg - Cu$  (рис.9).

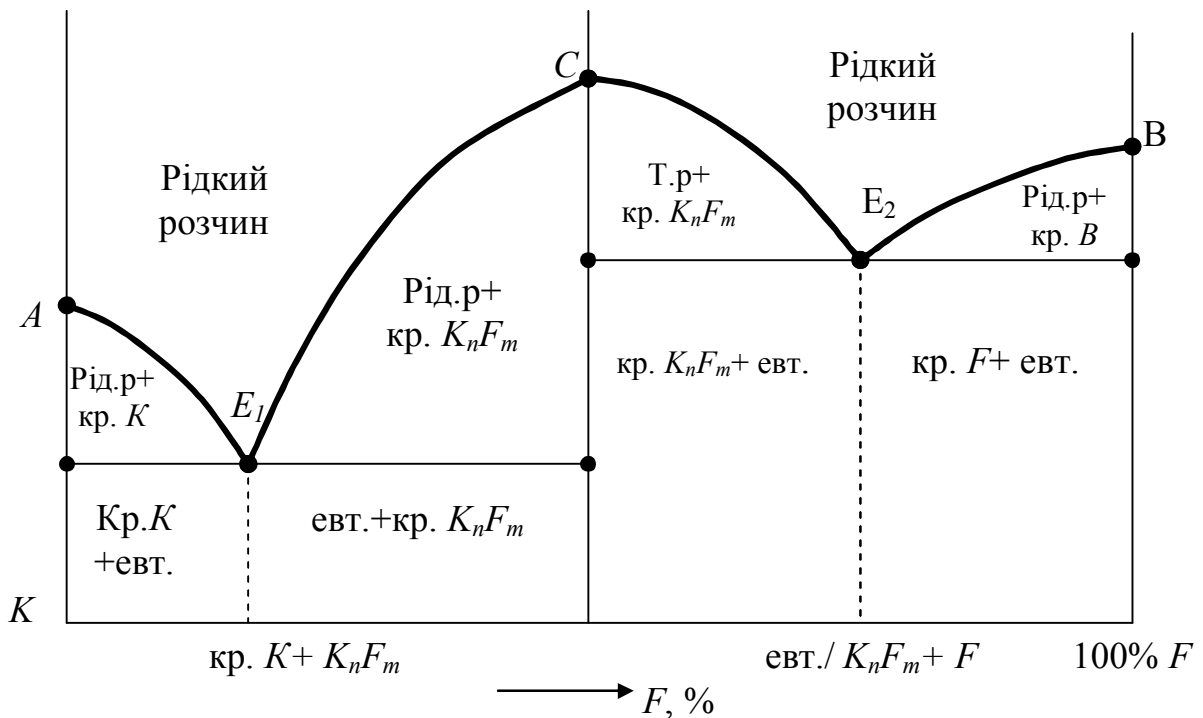


Рисунок 9 – Діаграма стану сплавів IV типу

Лінія  $AE, CE_2B$  – лінія ліквідус. Ця діаграма складена з двох діаграм першого типу. Хімічний сполуці  $K_n F_m$  відповідає точка  $C$ . На діаграмі евтектичний сплав, відповідний точці  $E_1$ , є механічною сумішшю кристалів  $K$  хімічної сполуки  $K_n F_m$ , а евтектичний сплав, відповідний точці  $E_2$ , – суміш кристалів  $F$  і хімічної сполуки  $K_n F_m$ . Фазовий склад за діаграмою визначається за аналогією з діаграмою 1-го типу.

### 5.1 Правило фаз і відрізків

Коли прийняти, що всі перетворення відбуваються при постійному тиску, рівняння прийме вигляд:  $C = K + 1 - \Phi$ , де  $1$  – зовнішній змінний фактор (температура).

Користуючись правилом фаз, розглянемо, як відбувається зміна числа ступенів свободи однокомпонентної системи для випадку розплавленого чистого металу ( $K = 1$ ;  $\Phi = 1$ ):  $C = 1 - 1 + 1 = 1$ , тобто температуру можна змінювати, не міняючи числа фаз. Такий стан системи називають «моноваріантним» (одноваріантним).

У процесі кристалізації  $\Phi = 2$  (дві фази – рідка і тверда), а  $K = 1$ , тоді  $C = 1 + 1 - 2 = 0$ . Це означає, що дві фази знаходяться в рівновазі при строго певній температурі (температура плавлення), і вона не може бути змінена, поки одна з фаз не пропаде. Такий стан системи називають «нонваріантним» (безваріантним). Для двокомпонентної системи, що знаходиться в рідкому стані ( $K = 2$ ;  $\Phi = 1$ ), правило фаз Гіббса має вигляд:  $C = 2 + 1 - 1 = 2$ , така система називається «біваріантною» (двоваріантною). У цьому випадку можлива зміна

двох факторів рівноваги (температури і концентрації), число фаз при цьому не міняється.

Для цієї ж системи при існуванні двох фаз (рідкої або твердої)  $K=2$ ;  $\Phi=2$ , згідно з правилом фаз  $C = 2 + 1 - 2 = 1$ , тобто із зміною температури концентрація повинна бути строго визначеною.

Для характеристики будови сплавів важливим є кількісне визначення їх складових. Якщо подивитися діаграму  $Pb - Sb$ , то видно, що всі заевтектичні сплави в твердому стані складаються з кристалів  $Sb$  і евтектики, але їх кількість залежно від складу буде різною, отже і властивості цих сплавів будуть різними.

Для визначення кількості складових користуються «правилом відрізків» (рис. 10). З точки  $K$  проводять перпендикуляр, відповідний сплаву 80%  $Sb$  і 20%  $Pb$ . Потім при заданій температурі  $t$  через точку  $d$  проводять горизонтальну пряму до перетину з лініями, що обмежують дану область діаграм, отримуючи точки  $e$  і  $b$ . Якщо позначити масу рідини буквою  $Ж$ , а масу всього сплаву буквою  $B$ , то можна записати:

$$\frac{Ж}{B} = \frac{db}{eb}.$$

Якщо масу всього сплаву прийняти за 100%, то кількість рідкої фази визначається співвідношенням

$$Ж = 100\% \cdot (db / eb).$$

Аналогічно для твердої фази:  $T = 100\% \cdot (ed / eb)$ . Перпендикуляр  $I - I$  ділить лінію  $eb$  на 60 одиниць (від 40 до 100%) по осі концентрацій на відрізки  $ed = 40$  од. і  $db = 20$  од. Таким чином, з наведених виразів знаходимо, що шуканий сплав при температурі  $t$  містить 33% рідкого сплаву і 67% твердої фази.

Правило відрізків дозволяє визначити також і концентрацію компонентів у фазах. Так, вище за точку  $L$  сплав знаходиться в однофазному стані, і концентрація компонентів у рідкому сплаві визначається проекцією цієї точки на вісь концентрацій. При температурі  $t$  концентрація  $Sb$  в рідині визначається проекцією точки  $L$ . Кристали, які виділяються, є чистою сурмою, оскільки точка  $b$  лежить на вертикальній осі  $Sb - 100\%$ .

Таким чином, «правило відрізків» дозволяє вирішити:

- 1) які існують фази двох- і багатофазних областей;
- 2) визначити хімічний склад або концентрацію фаз для певних температур;
- 3) встановити кількісне співвідношення між фазами.

Для визначення того, які існують фази, з точки  $K$  треба по горизонталі (по ізотермі) піти вліво і вправо до перетину з першими лініями діаграми і подивитися, які однофазні області визначають ці лінії. Ці фази і існуватимуть. Хімічний склад фаз: точка перетину ізотерми з лінією ліквідус  $L$  показує хімічний склад рідкої фази і визначається кількісним співвідношенням:

$$\frac{Q_l}{Q_s} = \frac{kS}{kl}$$

де  $Q$  – вага всього сплаву;  
 $Q_l$  – вага рідкої фази;  
 $Q_s$  – вага твердої фази.

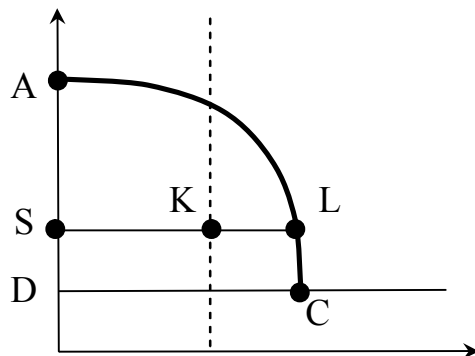


Рисунок 10 – «Правило відрізків»

Кількісне співвідношення між фазами обертово пропорційно до прилеглих відрізків:

$$Q_l = Q \cdot \frac{kS}{kl};$$

$$Q_s = Q \cdot \frac{kl}{kS}.$$

## 5.2 Зв'язок властивостей сплавів з типом діаграм станів

Зв'язок властивостей сплавів з типом діаграм стану вперше показав Н.С. Курніков, далі роботи в цьому напрямку проводив А.А. Бочвар (рис.11).

По осях ординат на графіках відкладають властивості сплавів (твердість, міцність, електропровідність та ін.), а по осях абсцис – зміст компонента F%.

I. У разі утворення механічної суміші властивості сплавів міняються за лінійним законом.

II. У разі утворення твердих розчинів властивості змінюються за криволінійною залежністю. При невеликих добавках другого твердого компонента електроопір стає вищим, ніж властивості компонентів, електропровідність і магнітна проникність знижуються.

III. Обмежені тверді розчини. Властивості однофазних твердих розчинів змінюються за криволінійною залежністю, а двофазних – за прямолінійним законом.

IV. Утворення хімічних сполук – властивості змінюються стрибком. Хімічна сполука відповідає *max* або *min* властивостям на прямій. Ця точка називається «сингулярною точкою».

Знаючи діаграму стану, можна визначити і технологічні властивості сплаву (ливарний, обробка різанням та ін.). Наприклад, тверді розчини мають низькі ливарні характеристики, а двофазні, особливо евтектичні, мають хороші ливарні властивості. Краще деформуються в холодному і гарячому стані однофазні сплави. Двофазні сплави легко обробляти різанням. У однофазних сплавів краща координатна стійкість.

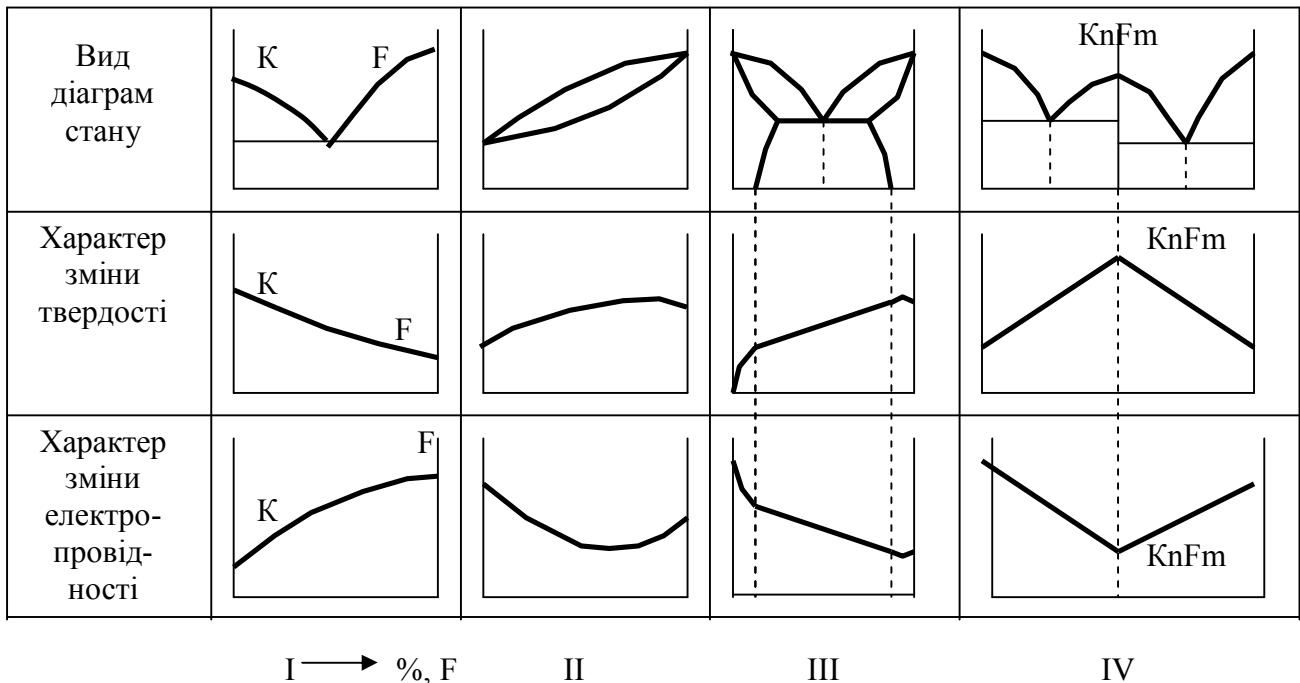


Рисунок 11 – Зв'язок властивостей сплавів з типом діаграм станів

### Контрольні питання:

1. Що таке лінія (ліквідус) та лінія (солідус)?
2. Дайте визначення правилу фаз Гіббса ?
3. Хто вперше показав зв'язок властивостей сплавів з типом діаграм стану?
4. За якими залежностями змінюються властивості однофазних твердих розчинів?
5. Що таке сингулярна точка?
6. Які негативні та позитивні властивості мають однофазні та двофазні сплави?
7. Які діаграми стану «залізо-вуглець» існують? У чому їх сутність?

### 6 ДІАГРАМА СТАНУ “Fe - C”

Залізо (*Fe*) належить до металів, що зазначають алотропічні перетворення, в цьому його цінність. 1539 °С – температура плавлення заліза, щільність 7,8 мг/м<sup>3</sup>.

Залізо з вуглецем утворює хімічну сполуку Fe<sub>3</sub>C – цементит – 6,67%С, це метастабільна фаза, може розпадатися з виділенням вільного вуглецю.

Температура кристалізації цементиту  $1535^{\circ}\text{C}$ . Решітка цементиту ромбічна ( $a \neq b \neq c$ );  $\alpha = \beta = \gamma = 90^{\circ}$

Вуглець в деяких модифікаціях  $Fe$  обмежено розчиняється. 1-й розчин – ферит – твердий розчин  $C$  в  $Fe_{\alpha}$  (рис. 12).

Максимальна розчинність  $C$  в  $Fe_{\alpha}$  –  $0,02\%$  при  $t=723^{\circ}\text{C}$ .

При кімнатній температурі ( $20^{\circ}\text{C}$ ) розчинність падає до  $0,006\%$ .

2-й розчин  $Fe_{\beta}$  – практично не розчиняє вуглець.

3-й розчин  $A$  – аустеніт – твердий розчин  $C$  в  $Fe_{\gamma}$ .

$2\%C$  - максимальна розчинність при  $t=1130^{\circ}\text{C}$ .

4-й розчин –  $Fe_{\delta}$ , максимальна розчинність  $C \approx 0,1\%$  при  $1485^{\circ}\text{C}$ .

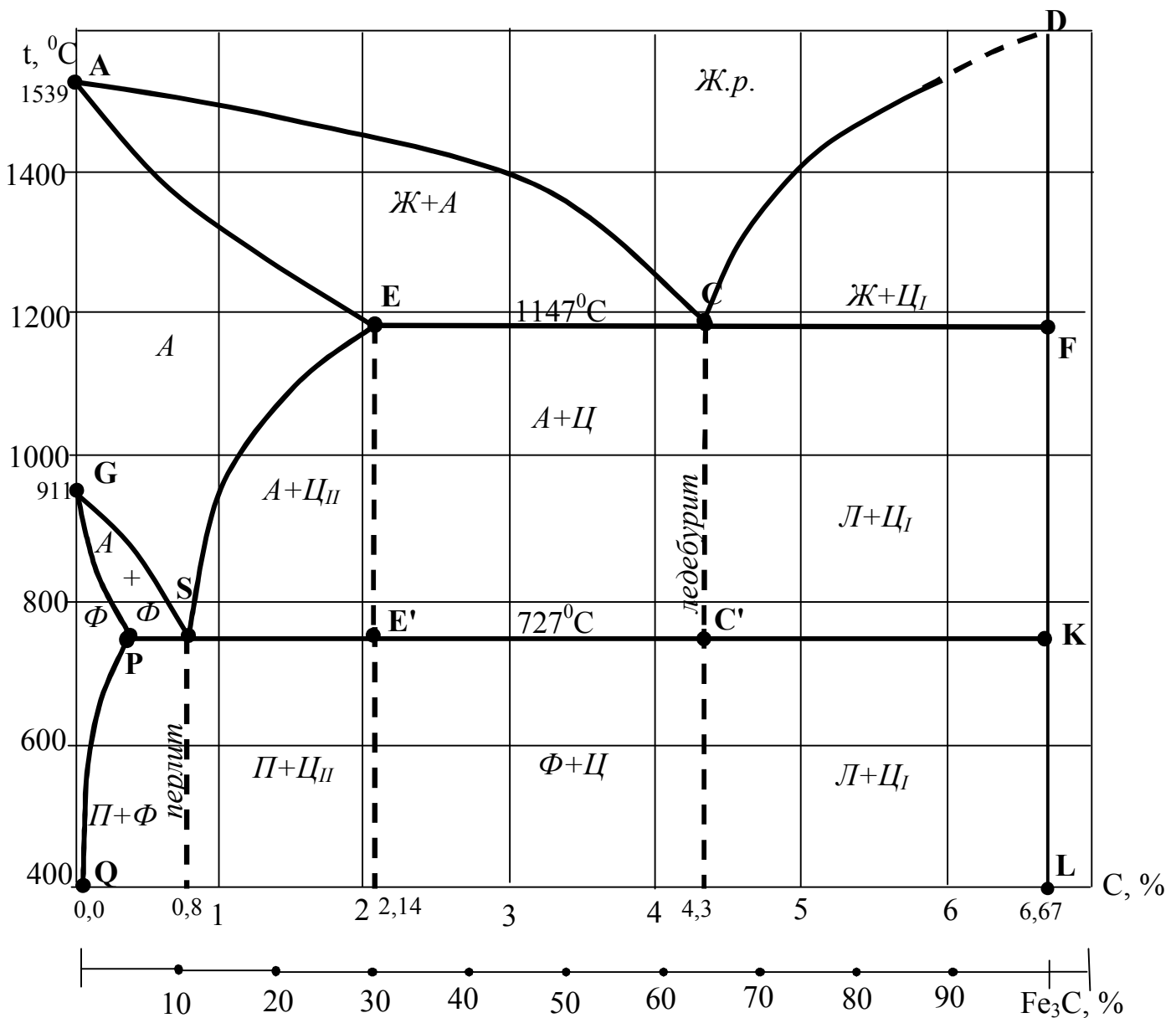


Рисунок 12 – Діаграма стану “ $Fe - C$ ”

Основою для визначення структури і властивостей залізовуглецевих сплавів є діаграма стану “залізо-вуглець” (цементит). Представимо її

спрощений варіант, вісь концентрацій подвійна, вона відображає вміст вуглецю і цементиту.

Діаграма Fe-Fe<sub>3</sub>C є діаграмою метастабільної рівноваги. Залежно від вмісту C і температури залізовуглецеві сплави утворюють ряд структурних складових (фаз) – ферит (Ф), аустеніт (А), цементит (Ц), графіт (Гр), перліт (П), ледебурит (Л).

**Графіт** є вільний вуглець, він м'який, володіє низькою міцністю і електропровідністю. У чавунах і графітізованих сталях міститься у вигляді включень. Форми графітових включень впливають на механічні й технологічні властивості сплавів.

**Перліт** – евтектоїдна механічна суміш фериту і цементиту, яка містить 0,83%С; утворюється при 727 °С в результаті розпаду аустеніту в процесі його охолодження  $Fe_{\gamma}(C) \rightarrow Fe_{\alpha}(C) + Fe_3C$ . Перліт буває пластинчастий і зернистий, що визначає механічні властивості сплавів заліза.

При кімнатній температурі зернистий перліт має міцність  $\sigma_B = 800 \text{ МПа}$ , пластичність  $\delta \approx 15\%$ , твердість HB160-200.

**Ледебурит** – механічна суміш (евтектика) аустеніту і цементиту, що утворюється з рідкого розплаву при 1147 °С і при вмісті 4,3%С. Твердість HB600-700, крихкий. Оскільки при температурі нижче евтектоїдної (нижче 727 °С) аустеніт перетворюється на перліт, то ледебурит нижче евтектоїдної прямої ЕК складається з цементиту і перліту.

Окрім згаданих складових у сплавах Fe–C можуть бути неметалічні включення (з'єднання CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, S, P та ін.), які із залізом утворюють різні фази.

Критичні точки на лініях діаграми прийнято позначати буквою А з індексом - r (при охолодженні) і С (при нагріві). При індексах ставлять цифру, що вказує положення цієї точки на лініях 211 °С - АС<sub>3</sub> - при нагріві і Ar<sub>3</sub> - при охолодженні.

Точка А на діаграмі відповідає температурі плавлення заліза, точка Д - цементиту. У точці С (4,3%С і 1147 °С) утворюється евтектика (ледебурит).

Лінія АСD - лінія ліквідус (вище за неї існує рідкий розчин L) показує початок первинної кристалізації; по лінії АС з рідкого розчину починає кристалізуватися аустеніт, а по лінії CD – цементит. Тому в області АСЕ існує рідкий розчин і кристали аустеніту (L+A), а в області CDF – рідкий розчин і кристали цементиту (L+Цi).

Точка Е показує максимальну розчинність вуглецю в аустеніті при 1147 °С, вона прийнята межею ділення залізовуглецевих сплавів на сталі (до 2,14%С) і чавуни (зверху 2,14%С).

Лінія АЕCF – лінія солідус – характеризує кінець первинної кристалізації. Вона також є початком вторинної кристалізації (перекристалізації), характерна для твердої фази. Пряма ЕСF називається лінією евтектичних перетворень.

Алотропія (поліморфізм) заліза визначає перетворення у сталях при їх охолодженні від аустенітного стану. Точка G діаграми відповідає температурі алотропічного перетворення чистого заліза (911 °С). З підвищенням вмісту вуглецю до 0,8% температура перетворення аустеніту у ферит, поступово

знижуючись, досягає  $727^{\circ}\text{C}$ . Лінія  $GS$  – початок, лінія  $GP$  – кінець перетворення аустеніту у ферит ( $\Phi$ ). Лінія  $GS$  може розглядатися як геометричне місце точок  $AC_3$ ,  $Ar_3$ . У точці  $S$  (з концентрацією  $0,8\%C$  і температурою  $727^{\circ}\text{C}$ ) протікає реакція розпаду аустеніту, продуктом якої є евтектоїдна суміш, що називається перлітом. Тому пряма  $PSK$  називається прямою евтектоїдних перетворень, крім того, вона є геометричним місцем точок  $AC$ , і  $Ar$ . В області  $GSP$  існує аустеніт і ферит ( $A+\Phi$ ), а в області  $QPS$  – перліт і ферит ( $P+\Phi$ ).

Лінія  $SE$  є лінією обмеженої розчинності вуглецю в аустеніті; із зниженням температури розчинність падає з  $2,14$  до  $0,8\%C$ . У зв'язку з цим у сплавах при їх охолодженні надмірний вуглець виділяється з аустеніту у вигляді карбїду заліза  $Fe_3C$ . Тому в області  $SEE'$  існують аустеніт і цементит вторинний ( $A+Ц_{II}$ ). Він називається вторинним тому, що утворюється з твердої фази. Крива  $SE$  також є геометричним місцем точок  $Acm$ ,  $Arm$ . В області  $0,8 SE' 2,14$  існує перліт і цементит ( $P+Ц_{II}$ ).

Залежно від вмісту вуглецю сталі ділять на доевтектоїдні ( $C<0,8\%$ ), їх можна також назвати конструкційними; евтектоїдні ( $C=0,8\%$ ) і заевтектоїдні ( $C>0,8\%$ ), останні дві групи можна назвати інструментальними сталями.

Структура доевтектоїдних сталей складається з фериту (білі включення) і перліту (темні включення). Із збільшенням вмісту вуглецю кількість фериту зменшується, а перліту – збільшується. Структура евтектоїдної сталі складається з перліту, а заевтектоїдних – з перліту (темні ділянки) і цементиту (світлі ділянки у вигляді сітки або голок).

У чавунах первинний аустеніт і аустеніт у складі евтектики до кінця кристалізації містять максимальну кількість вуглецю  $2,14\%$ . Із зниженням температури до  $1147^{\circ}\text{C}$  і більш надмірний вуглець (по лінії  $SE$ ) випадає з аустеніту у вигляді вторинного цементиту. Тому в області  $ECC'E'$  існує аустеніт, ледебурит і вторинний цементит ( $A+Л+Ц_{II}$ ), а в області  $CFKC'$  – ледебурит і первинний цементит ( $Л+Ц_I$ ). По прямій  $PSK$  і в чавунах аустеніт характеризується перлітовим перетворенням. Звідси в області  $2,14 E'C'$ ,  $4,3$  існує перліт, ледебурит і вторинний цементит – ( $П+Л+Ц_{II}$ ), а в області  $C'K 6,67 4,3$  – ледебурит і первинний цементит ( $Л+Ц_I$ ). Лінія  $GPSK$  є кінцем вторинної кристалізації залізовуглецевих сплавів.

Залежно від вмісту  $C$  чавуни діляться на доевтектичні ( $2,14<C<4,3$ ) евтектичні ( $C=4,34\%$ ) і заевтектичні ( $C>4,3\%$ ).

Структура білих чавунів складається з перліту, ледебуриту і цементиту. Свою назву білі чавуни отримали за виглядом зламу - матово-білий колір.

Структура доевтектичного чавуну при кімнатній температурі складається з ледебуриту, перліту і вторинного цементиту (ледебурит – світлі ділянки з розташуванням на них зерен перліту; перліт – крупніші темні зерна; вторинні цементит – світлі ділянки, що зливаються з цементитом ледебуриту).

Структура евтектичного чавуну складається з перліту і первинного цементиту (у вигляді крупних світлих довгастих кристалів). Структура заевтектичного чавуну складається з ледебуриту і первинного цементиту (у вигляді крупних сірих смуг).

## Контрольні питання:

1. Що називають перлітом, цементитом, ледебуритом, аустенітом, феритом?
2. Що таке евтектика та евтектоїд?
3. Чим відрізняються перетворення в твердому стані у доевтектоїдної і заевтектоїдної сталі?
4. Структура сплаву, що містить 0,005% вуглецю (по масі) при кімнатній температурі?
5. Фазовий склад сплаву, що містить 0,8% С по масі при температурі 900 °С?
6. Фазовий склад сплавів, що містять > 2,14% с, після завершення первинної кристалізації?
7. Фазовий склад сплаву, що містить 3% С, при температурі 900 °С?
8. Зміст вуглецю (по масі в процентах) в сплаві евтектоїдного складу?

## 7 ОСНОВИ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ

### 7.1 Термічна обробка

Термічною обробкою (Т.о.) називають процеси, пов'язані з нагрівом і охолодженням металу, що знаходиться в твердому стані, з метою зміни структури і властивостей без зміни хімічного складу.

Т.о. характеризують основні параметри: нагрів до певної температури, витримка при цій температурі, швидкість нагріву і швидкість охолодження.

Залежно від температурних режимів Т.о. підрозділяється на види: відпал, нормалізація, гарт, відпуск, хіміко-термічна обробка; термомеханічна обробка.

Залежно від схильності до зростання аустенітного зерна при нагріві сталі бувають дрібно- і грубозернистими. Дрібнозернисті сталі в інтервалі температур нагріву 950-1000 °С майже не змінюють величину зерна. У грубозернистих сталей зростання зерна починається відразу після переходу через критичну точку.

Можливість зміцнення сталей шляхом Т.о. обумовлена наявністю у них алотропічних перетворень у твердому стані. Охолоджуючи аустеніт з різними швидкостями і викликаючи тим самим різний ступінь переохолодження, можна отримати продукти розпаду аустеніту, що різко відрізняються за будовою і властивостями.

Уявлення про перетворення переохолодженого аустеніту можна отримати з діаграми його ізотермічного перетворення (рис.13).

Крива 1 відповідає початку розпаду аустеніту при різних ступенях переохолодження; лівіше за неї знаходиться переохолоджений аустеніт (область А).

Крива 2 показує закінчення процесу розпаду аустеніту на феритоцементитну суміш (область П).

Горизонтальна пряма *Мн* характеризує початок, а пряма *Мк* – кінець бездифузійного перетворення аустеніту в мартенсит. На діаграмі показані криві



швидкостей охолодження сталі. Мала швидкість охолодження  $V_1$  приводить до утворення грубої суміші фериту і цементиту. Чим більше швидкість охолодження, тим більше утворююча дрібнодисперсійна феритоцементитна суміш.

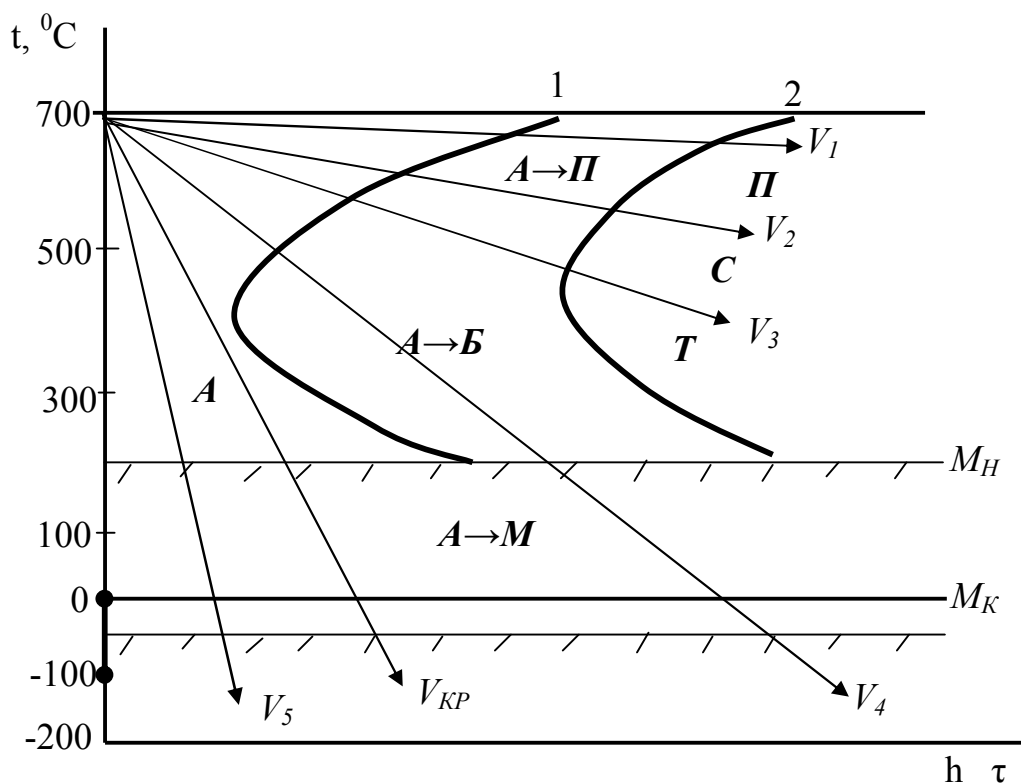


Рисунок 13 – Діаграма ізотермічного перетворення аустеніту

**Сорбіт** (перша гартівна структура), який отримують при швидкості охолодження сталі  $V_2$ , є сумішшю фериту і цементиту; він відрізняється від перліту більш тонкодисперсною будовою, його твердість HRC20. Сталі із структурою сорбіту більш зносостійкі, використовуються для виготовлення навантажених деталей машин.

**Троостіт** (друга гартівна структура) отримують при швидкості охолодження  $V_3$  в результаті розпаду переохолодженого аустеніту при 500-550 °C, володіє значною пружністю; є тонкодисперсною сумішшю фериту і цементиту. Твердість його HRC~30. Сталі з такою структурою відрізняються високими значеннями міцності й пружності. Їх використовують для виготовлення пружин і ресор.

Перетворення аустеніту на мартенсит відбувається при дуже швидкому охолодженні ( $V_5 > V_{KP}$ ). При цьому фіксується типова для мартенситу голчаста структура.  $Mrt$  – є пересичений твердий розчин вуглецю в залізі  $\alpha$ . Процес йде за бездифузійним механізмом. Це тверда і крихка складова структур, HRC ~ 62-66. При швидкості  $V_4$  структура сталі складається з троостіту і мартенситу.

## 7.2 Відпал. Нормалізація

**Відпал** – нагрів сталі вище за критичні температури ( $A_{C1}; A_{C3}$ ), витримці при даній температурі і повільному охолодженні (звичайна разом з піччю).

Залежно від вимог, що пред'являються до властивостей сталі, розрізняють наступні види відпалу: дифузійний (гомогенізація), повний, неповний (для заевтектоїдних сталей називається *сфероїдизацією*), ізотермічний, низький.

*Мета відпалу* – усунути внутрішнє напруження, подрібнити зерно, додати сталі пластичність перед подальшою обробкою і привести структуру в рівноважний стан.

Дифузійний відпал проводиться при  $t^0$  1100-1200 °С протягом 30-50 год. для усунення дендритної ліквіації.

Повний відпал застосовують для конструкційних сталей. Нагрів на 30-50 °С вище за точку  $A_{C3}$  з подальшим повільним охолодженням, що забезпечує перетворення аустеніту на феритоцементитну суміш в області температур, близьких до  $A_{C1}$ .

Інструментальні сталі нагрівають на 30-50 °С вище  $A_{C1}$  – неповний відпал (для заевтектоїдних сталей). Цей відпал на зернистий перліт проводиться з метою зниження твердості для кращої обробки різанням і підготовки структури до гарту.

При ізотермічному відпалі конструкційну сталь нагрівають до  $t^0$  на 30-50 °С вище  $A_{C3}$ , а інструментальну – вище  $A_{C1}$  на 50-100 °С, потім йде витримка і повільне охолодження в розплавленій солі до  $t^0$  що нижче  $A_{r1}$  (680-700 °С). При цій температурі сталь піддають ізотермічній витримці, при якій відбувається повне перетворення аустеніту на перліт з подальшим охолодженням на повітрі.

При холодній пластичній деформації сталь зміцнюється за рахунок наклепу (нагартовки). При цьому відбуваються структурні зміни, утворюються спотворення кристалічної решітки. При необхідності для зняття наклепу проводять *відпал рекристалізації*, що є різновидом *низького відпалу*. А.А. Бочвар встановив зв'язок між  $t^0$  рекристалізації і температурою плавлення, а саме:

$$t_{pk} = \alpha \cdot t_{пл} ,$$

де  $t_{pk}$  – абсолютна температура рекристалізації;

$t_{пл}$  – абсолютна  $t$  плавлення;

$\alpha$  – коефіцієнт (для технічно чистих металів складає 0.3-0.4, а для сплавів – 0.5-0.6).

**Нормалізацією** сталі називається нагрів доевтектоїдної сталі вище за точку  $A_{C3}$ , евтектоїдної вище  $A_{C1}$ , заевтектоїдної вище за точку  $A_{cm}$  на 30-50 °С, витримка і подальше охолодження на повітрі.

Після нормалізації вуглецеві сталі мають ту ж структуру, що і після відпалу, але перліт більш дисперсний. Мета нормалізації доєвтектоїдних і евтектоїдних сталей та ж, що і повного відпалу. Проте після нормалізації твердість і міцність сталі будуть вище, ніж при відпалі. Нормалізація застосовується для усунення грубозернистої структури, вирівнювання механічних властивостей. У заєвтектоїдних сталях нормалізація усуває цементитну сітку.

Нормалізація – дешевший і простий вид Т.о. На машинобудівні заводи вуглець сталі поставляють з відносно невисокою твердістю для того, щоб забезпечити хорошу обробку різанням. Конструкційні сталі поставляють в відпаленому або нормалізованому стані, інструментальні – після сфероїдируючого відпалу.

### 7.3 Гарт і відпуск

Зміцнююча термічна обробка – гарт, для вуглецевих сталей із вмістом вуглецю більше 0,3% з подальшою відпуском.

**Гарт** – процес нагріву сталі вище за точку  $A_{C3}$ , (повний гарт) або  $A_{C1}$  (неповний) на 30-50 °С з подальшим швидким охолодженням. **Мета гарту** – отримання високої твердості і заданих фізико-механічних властивостей. Здатність сталі приймати гарт зростає із збільшенням вмісту в ній вуглецю. При вмісті менше 0,2%С сталь практично не гартується (рис.14).

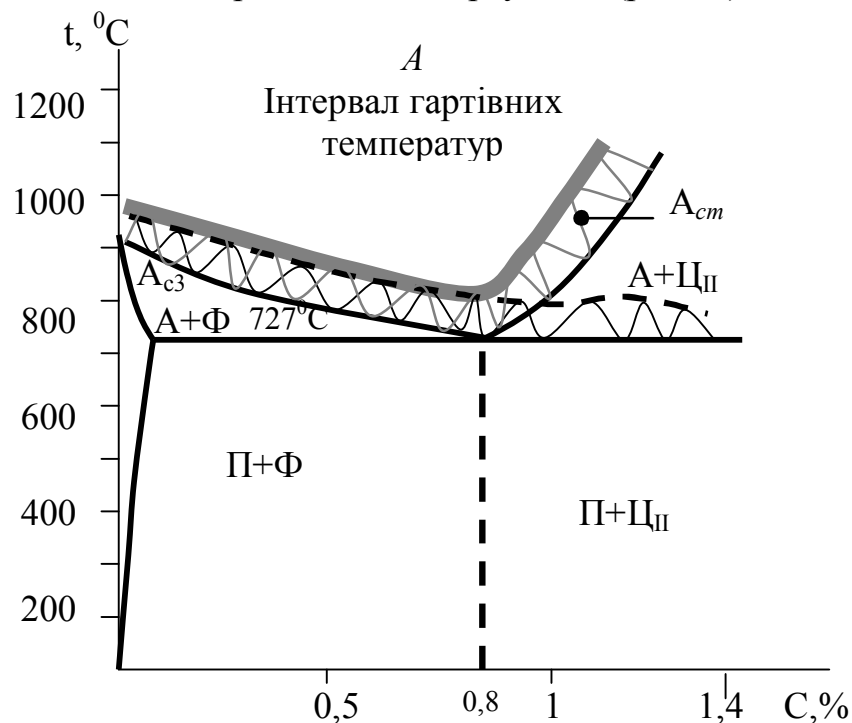


Рисунок 14 – Діаграма інтервалів гартівних температур для гарту залізобуглецевих сталей

Доєвтектоїдні сталі піддаються повному гарту. Після охолодження у воді в структурі утворюється дрібногольчастий мартенсит і невелика кількість

залишкового аустеніту (1-2%). Нагрів сталі при гарті значно вище критичної точки  $A_{C3}$  (на 150-200 °С) приводить до її перегріву. В результаті виходить великогольчастий мартенсит, і сталь набуває зниженої ударної в'язкості. Нагріваючи доевтектоїдні сталі вище за точку  $A_{C1}$ , але нижче за точку  $A_{C3}$  приходиться до неповного гарту. У структурі такої сталі разом з мартенситом присутні ділянки фериту.

Якщо заевтектоїдну сталь нагрівати вище за точку  $A_{cm}$ , то в структурі її буде великогольчастий мартенсит з підвищеною кількістю залишкового аустеніту, що приведе до зниження твердості сталі. Тому всі заевтектоїдні сталі піддають неповному гарту, отримуючи в структурі мартенсит і цементит.

Швидкість нагріву і час витримки деталей залежать від розмірів, маси деталей, їх конфігурації, хімічного складу, від типу нагрівальних пристроїв і нагрівальних середовищ.

При гарті як охолоджуючий засіб використовують воду, мастила, розплавлені солі й метали. Для гарту суттєве значення має швидкість охолодження в інтервалі температур, де аустеніт найменш стійкий (650-550 °С). Цей інтервал треба пройти швидко. Важливе значення має і інтервал 300-250 °С, коли відбувається утворення мартенситу. У цьому районі температур потрібне повільне охолодження, щоб уникнути виникнення напруження і гартівних тріщин.

**Способи гарту:** Гарт в одному охолоджувачі, застосовують для нескладних деталей з вуглецевих і легованих сталей.

Гарт у двох середовищах (переривчастий гарт). Спочатку в швидко охолоджуючому середовищі (вода), а потім переносять в інше середовище (мастило, селітра, повітря), де відбувається охолодження до кімнатної температури. Застосовують для інструменту з високолегованої сталі.

Ступінчастий гарт – нагріта деталь охолоджується в середовищі при  $t^0$  230-250 °С, а потім після невеликої витримки охолоджується на повітрі.

Ізотермічний гарт – аустеніт розпадається на високодисперсну суміш фериту і карбід заліза – бейніт.

Гарт з обробкою холодом – охолодження нижче 0 °С деталей із загартованої сталі, що має в структурі залишковий аустеніт ~70 °С. Застосовується для високовуглецевих >0,6%С і спеціальних сталей (інструмент, шарикопідшипникові сталі).

**Дефекти гарту:** недогрів, перегрів, перепал, зневуглецювання, викривлення, тріщини.

Є дефекти, що усуваються (відпал, перегартування, рихтування і т.д.), і є непоправні – перепал, тріщини і т.п.

**Відпуск** – нагрів сталі нижче за температуру точки  $A_{C1}$  з витримкою при даній температурі і подальшим охолодженням. *Мета відпуску* – перевести структури в більш рівноважний стан, зменшити напруження, отримати необхідне поєднання фізико-механічних властивостей.

Основне перетворення при відпуску – розпад мартенситу, тобто виділення вуглецю з пересиченого твердого розчину у вигляді найдрібніших кристалів карбїду залїза.

Розпад мартенситу завершується при температурі  $\sim 400$  °С, утворену феритоцементитну суміш називають *трооститом відпуску*. При вищій температурі нагрїву відбувається коагуляція кристалів карбїду залїза, дисперсність феритоцементитної суміші знижується і при  $t^0$  500-650 °С утворюється сорбіт відпуску. Крім цих перетворень в інтервалі  $t^0$  200-300 °С відбувається розпад залишкового аустенїту з утворенням відпущеного мартенситу.

*Існують три види відпуску залежно від  $t^0$  нагрїву.*

Низький відпуск при  $t$  120-150 °С (відпуск на відпущений мартенсит). Застосовують після гарту інструменту, цементованих виробів, а також після поверхневого гарту. При цій Т.о. зменшується залишкове гартівне напруження, твердість практично не знижується.

Середній відпуск (відпуск на троостит) при  $t^0$  350-450 °С твердість знижується. Рекомендують для пружин і ресор.

Високий відпуск (відпуск на сорбіт) при температурі 500-650°С. Застосовують для виробів з конструкційних сталей з метою забезпечення достатньої міцності, в'язкості й пластичності. Поєднання гарту з високим відпуском на сорбіт називається «поліпшенням». Застосовують для середньовуглецевих сталей (0,35-0,6%С).

Для підвищення твердості, межі витривалості й зносостійкості деталі машин піддають поверхневому зміцненню – поверхневий гарт, для якого використовують газоплазмовий гарт, гарт струмом високої частоти (СВЧ), лазерну обробку і т.п.

**Гартованість** – здатність сталі піддаватися гарту.

**Прокалюваність** – здатність сталі гартуватися на певну глибину. Прокалюваність залежить від хїмічного складу, розмірів деталі і умов охолодження. Чим більше стійкість переохолодженого аустенїту, тим більше прокалюваність. Характеристикою прокалюваності є критичний діаметр, тобто максимальний діаметр циліндрового прутка, який повністю гартується в охолодженому середовищі.

Приклад: для вуглецевих сталей критичний діаметр складає 10-20мм. Леговані сталі можуть прокалюватися в перетині до 250-300мм.

Термомеханїчна обробка (ТМО) – це сукупність операцій пластичної деформації і термічної обробки – нагрїв, пластична деформація і охолодження. Підвищуються механїчні властивості за рахунок підвищення густини і правильнішого розташування недосконалої кристалїчної решітки металів.

Розрізняють високотемпературну термомеханїчну обробку (ВТМО) і низькотемпературну (НТМО): ВТМО при температурі вище за температуру рекристалїзації, деформація 20-30%, гарт і низький відпуск. НТМО при  $t^0$  нижче за температуру рекристалїзації 400-600°С, деформація 75-95%, гарт, низький відпуск.

## 7.4 Хіміко-термічна обробка

**Хіміко-термічна обробка (ХТО)** – процес поверхневого насичення сталі різними елементами з метою додання їй відповідних властивостей. Окрім структурних змін відбувається зміни складу і будови поверхні за рахунок дифузії в неї елементів в атомарному стані із зовнішнього середовища при високих температурах. *Мета* – зміцнення поверхні, підвищення твердості, зносостійкості, втомленої міцності і т.д.

Відносяться: цементація, азотування, нітроцементація, ціанування, алітування, хромування, силицювання, борування.

*Існують три одночасних процеси:*

1 – дисоціації молекул  $2CO \rightarrow CO_2 + C$  атомарн.

$2NH_3 \rightarrow 3H_2 + 2N$  атомарн.

2 – абсорбції;

3 – дифузії.

**Цементація** – процес насичення поверхні сталі вуглецем. Тверда поверхня, м'яка серцевина. Піддають низьковуглецеві сталі – не більше 0,25%С. Товщина шару 0,1-3-4мм,  $t^0$  - 900-970 °С. Проводять у твердих, рідких і газоподібних середовищах – карбюраторах. У шарі 0,8-1%С.

**Азотування** – процес насичення сталі азотом. *Мета* - підвищення твердості, зносостійкості, втомленої міцності,  $t^0$  процесу 500-600 °С. Азотований шар за рахунок нітридів володіє твердістю до HRC70 і зберігає її до 400-600 °С. Товщина шару 0,25-0,75мм. Азотуванню підлягають леговані сталі. Перед азотуванням – «поліпшення». Час процесу до 60год.

### Контрольні питання:

1. З якою метою інструментальні вуглецеві сталі піддають відпалу на зернистий перліт?
2. Для яких сталей відпал можна замінити більш дешевою термічною обробкою – нормалізацією?
3. Як змінюються механічні властивості в результаті гарту?
4. Що таке критична швидкість загартування?
5. Що таке мартенсит?
6. Вплив масової частки вуглецю на загартуваність сталі?
7. Які умови отримання крупногочастого і дрібногочастого мартенситу?
8. Що таке відпуск, види відпуску?
9. Основне перетворення, що протікає при відпуску?
10. Який комплекс термічної обробки називають поліпшенням?
11. Що підвищує азотування деталі?
12. Які сталі зазвичай піддають цементації?

## 8 МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

### 8.1 Класифікація сталей (загальна)

#### *I Класифікація за хімічним складом, на дві групи:*

- 1) прості вуглецеві сталі, в яких окрім  $Fe$  і  $C$ ,  $Mn < 1\%$  і  $Si < 0,5\%$ ;
- 2) леговані сталі, в яких спеціально вводять різні елементи для додання певних властивостей:  $Mn > 1\%$ ;  $Si \geq 0,5\%$ ,  $Ni, Cr, W, V, Mo, Cn, Al, Ti, Co, B$ .

#### *II За способом виробництва, на три групи:*

- 1) Сталі звичайної якості, які виплавляють в конвертерах, або в кислих крупних мартенівських печах. У них допускається підвищений вміст  $S$  і  $P$ .  $S$  до  $0,065\%$ ;  $P$  до  $0,085\%$ .
- 2) Якісні сталі – виплавляють в малих і середніх основних мартенівських печах, вони чистіші по  $S$  і  $P$  - до  $0,05\%$ .
- 3) Високоякісні сталі – виплавляють в електропечах, в них обмежується вміст шкідливих домішок  $S$  і  $P$  до  $0,03\%$ .

#### *III За застосуванням, дві групи :*

- 1) конструкційні сталі –  $C$  до  $0,7\%$ ,
  - 2) інструментальні сталі –  $C$   $0,7-2,0\%$
- Вуглецеві конструкційні сталі:* Мартенівські (М), конверторні (К), бесімерівські (Б).

#### *Конструкційні сталі звичайної якості діляться на три групи:*

- 1) групу А приймають від заводів за механічними властивостями.
- 2) групу Б приймають від заводів за хімічним складом.
- 3) групу В приймають і за хімічним складом і за механічними властивостями.

#### *Сталі групи А.* Від $Ст0$ до $Ст7$ .

$Ст0$  – різні конструкції без напруження.

$Ст1$  – покрівельне залізо,

$Ст2$  – котельна сталь (товстий лист),

$Ст3$  – швелери, балки, крани,

$Ст4$  – кріплення, шпонки,

$Ст5$  – осьова,

$Ст6$  – рейкова сталь,

$Ст7$  – ресори, пружини.

#### *Сталі групи Б* – на машинобудівних заводах проходять теплову обробку.

Сталі мартенівські і конверторні (М і К).  $Мсм1-Мсм7$   $P > 0,045\%$   $S > 0,055\%$ .  
Бесімерівські:  $Бсм0-Бсм6$ .

У сталях групи В лімітується ударна в'язкість  $a_n$ . Бесімерівські сталі цієї групи не випускають  $ВМсм1$ ,  $ВКсм1$ .

**Вуглецеві сталі якісні.** Всі якісні сталі звичайно маркують за вмістом вуглецю. Вони можуть бути або мартенівської плавки, або електроплавлення. За хімічним складом якісні вуглецеві сталі ділять на дві групи:

- 1) з нормальним вмістом  $Mn < 1\%$ ;

2) з підвищеним вмістом  $Mn$  1,4–1,8%

Сталь 0,8; 10; 15; 20 і т.д. – вміст  $C$  в сотих %.

Інтервал 5 сотих до марки сталь 70 - ці сталі із звичайним вмістом  $Mn$ . З підвищеним вмістом  $Mn$ : Сталь 10Г, Сталь 15Г.

За вмістом  $C$  якісні вуглецеві сталі умовно ділять на чотири групи:

1 – низьковуглецеві конструкційні сталі з великою пластичністю і малою міцністю – сталі 0,8 і 10. З них роблять листи, стрічки, дріт, тобто невідповідальні деталі, які виготовляються шляхом холодного штампування;

2 – низьковуглецеві конструкційні сталі невисокої міцності, але достатньої в'язкості: сталі 15, 20, 25, 15Г, 20Г, 25Г. З них виготовляють деталі, які потім піддаються цементації;

3 – від марки 30 до 55, як з магнієм, так і без нього. Це покращені сталі, тобто вони піддаються гарту і високому відпуску. Можуть гартуватися ТВЧ;

4 – високої міцності, зносостійкості, з високими пружними властивостями від 60 до 85, як з магнієм, так і без нього.

Після поліпшення, нормалізації і відпуску піддаються гарту ТВЧ. Деталі працюють в умовах тертя за наявності вібрацій.

**Листова сталь для холодного штампування.** Для холодного штампування і витяжки застосовують киплячі сталі, вони володіють високою пластичністю через знижений вміст  $C$  і  $Si$ . Здатність сталі до витяжки визначається:

$$\frac{\sigma_T}{\sigma_B} = 0,65 \div 0,70.$$

Витяжка буває: глибока (ВГ), глибока (Г), нормальна (Н). Маркування сталі 0,5КП; 0,8КП.

**Автоматні сталі.** З них виготовляють вироби на автоматичних верстатах. Дають довгу стружку. Потрібно, щоб вони володіли оброблювальною крихкістю, тобто давали дрібну стружку, яка ламається. Підвищують вміст  $S$  до 0,2%. Отримують включення  $MnS$  – крихкі, які забезпечують ломку стружки, або додають  $Pb$  – за рахунок його включень стружка ламається. Маркування за вмістом  $C$  в сотих %: А12, А15 до А35 0,12%С; 0,15%С.

**Сталі для фасонного литва.** Маркують за вмістом  $C$  в сотих %, додають літеру Л: 15Л до 55Л.

**Маркування легованих конструкційних сталей.** Буквено-цифрове. Буквами позначається – легуючий елемент, цифрами – вміст елемента.

Кожен легуючий елемент має своє буквене позначення, як правило, це початкова буква російської назви елемента:

$Cr - X$ ;  $W - B$ ;  $Mo - M$ ;  $Cu - D$ ;  $Ni - H$ ;  $V - \Phi$ ;  $Mn - Г$ ;  $Co - K$ ;  $Al - Ю$ ;  $B - P$ ;  $Si - C$ ;  $Ti - T$ .

Приклад: 20Х2Н4А.

Вміст  $C$  0,2;  $Cr$  -2%;  $Ni$  4% – високоякісна – понижений вміст  $S$  і  $P$ . Коли після букви немає цифри, це означає що елемента менше 1%.



**Шарикопідшипникові сталі.** ШХ6, ШХ9, ШХ15. Всі мають 1%С, а Cr відповідно 0,6; 0,9; 1,5%.

**Вуглецеві інструментальні сталі.** У7А - 0,7%С високої якості;

У – вуглецева інструментальна сталь;

У7А – ударний інструмент (молотки, зубила, штампи гарячого штампування);

У8А – для ударних виробів (букви - клейма, для холодного штампування - пуансони, матриці);

У9А – твердіша, для інструменту з обробки дерева (пили, долота, стамески);

У10А; У11А – напилки, різці, свердла, плашки;

У12А – крихка сталь для виготовлення фрез і хірургічного інструменту, 1,2%С;

У13А – волочильні інструменти, 1,3%С.

## 8.2 Чавуни

Сплав в змістом вуглецю від 2,14 до 6,67% називається чавунами. Залежно від стану вуглецю діляться на три групи:

1 – білі чавуни, в яких весь вуглець знаходиться у зв'язаному стані у вигляді  $Fe_3C$  – цементиту,

2 – сірі чавуни – основна маса вуглецю знаходиться у вільному стані у вигляді графіту,

3 – половинчасті чавуни - проміжні, в них є і цементит і графіт.

**Білі чавуни.** Повне уявлення про структуру білого чавуну дає діаграма  $Fe - Fe_3C$ . Підрозділяють:

1. *Доевтектичні чавуни* –  $C=2-4,3\%$ . Їх структура – ледебурит  $(\Pi + Fe_3C) + Fe_3C_{II} + \Pi$ .

2. *Евтектичні чавуни.*  $C=4,3\%$ . Структура ледебурит  $(\Pi + Fe_3C)$ .

3. *Заевтектичні чавуни.*  $C=4,3-6,67\%C$ . Їх структура – ледебурит  $(\Pi + Fe_3C) + Fe_3C_I$ .

*Білі чавуни* - твердий і крихкий матеріал, в машинобудуванні має обмежене застосування. Застосовують там, де деталям потрібна висока твердість, а інші механічні властивості не цікавлять. Механічній обробці майже не піддається (колеса вагонів, лемеша плугів). Ці чавуни є граничними – переробляють у сталь або в *ковкі чавуни (КЧ)*.

**Сірі чавуни.** Основна маса вуглецю знаходиться у вигляді графіту. Всі сірі чавуни - сталева основа + графіт.

**Половинчасті чавуни.** У них мережа структури характерна як для білого чавуну, так і для сірого. *Ледебурит+Гр+Π*.

**Структура і властивості сірих чавунів.** Твердість чавуну залежить від структури металевої основи, тобто від кількості зв'язаного вуглецю. На механічні властивості цих чавунів впливає розмір графіту, тому механічні



(модифікаторів) в чавуні утворюється графіт кулястої форми. Процес модифікації супроводжується піроефектом, тому для введення модифікаторів у рідкий чавун використовують спеціальні пристрої або обладнання (автоклави). ВЧ мають вищі механічні властивості, вони можуть бути використані замість поковок і відливок з вуглецевої сталі для деталей машин, що працюють в тяжких умовах.

Позначення: ВЧ, потім йдуть цифри, перші вказують межу міцності при розтягуванні, а другі – відносне подовження при розтягуванні. ВЧ 45-5 –  $\sigma_B = 450 \text{ МПа}$ ,  $\pi = 5\%$ .

З ВЧ виготовляють колінчасті вали і поршні автомобільних, тракторних і двигунів тепловозів, шестерні, гальмівні диски, деталі прокатних верстатів, корпуси насосів, вентиля і т.д. ВЧ використовують у вузлах тертя з високими коловими швидкостями.

*Ковкий чавун* отримують з білого шляхом тривалого нагріву при високих температурах (відпал, томління). У результаті виходить графіт хлоп'євидної форми. Маркують буквами КЧ і цифрами. Перші дві цифри вказують межу міцності чавуну при розтягуванні, а другі – відносне подовження. КЧ застосовують в автомобільній, сільськогосподарській, текстильній та ін. галузях машинобудування. З нього виготовляють деталі, які працюють при середніх і високих статичних і динамічних навантаженнях (підшипники, кронштейни, картери редукторів, поршні, маточини).

Його широке застосування пов'язане з тим, що він дешевше сталі і володіє високою стійкістю проти корозії.

### 8.3 Пластична деформація і рекристалізація металів

**Пластична деформація.** Якщо до тіла прикласти силу не перпендикулярну до перетину, то загальне виникаюче напруження теж буде не перпендикулярне до перетину.

*Існують три типи напруження:*

- 1) загальне напруження,
- 2) нормальне напруження,
- 3) дотичне напруження.

Під дією напруження тіла деформуються. Деформацією називається зміна форми і розмірів тіла під впливом або зовні прикладених сил або внутрішніх сил або напруження, що виникають у матеріалах з тих чи інших причинах.

*Існують три типи деформації:*

- 1) пружна,
- 2) пластична,
- 3) руйнуюча.

Пружна деформація – це деформація, що усувається після зняття навантаження, виникає під впливом нормального напруження. При пружній деформації металів відбувається зміна відстані між атомами, спотворення просторових решіток, але мікроструктура при цьому не змінюється. Для

металів в області пружної деформації між напруженням і деформацією існує лінійна залежність згідно із законом Гука:  $G = E \cdot \sigma$ . Пружні властивості є структурно нечутливими, вони закладені в природі самого металу.

Межу пружності не можна відносити до пружних властивостей, оскільки вона характеризує перехід від пружної деформації до пластичної, тобто опір малим пластичним деформаціям, а ця величина є структурно чутливою.

Пластична деформація – це залишкова деформація або та, що зберігається в металах після зняття навантаження. Відбувається під впливом дотичного напруження.

Руйнування металів – це залишкова деформація, що приводить до порушення суцільності металу і до розриву зв'язків між атомами. Руйнування настає тоді, коли зовнішні сили перевищать сили міжатомного тяжіння.

Розрізняють два види руйнувань: *крихке і в'язке*.

*Крихке руйнування* не супроводжується помітною пластичною деформацією, отже такий вид руйнування настає раніше, ніж буде досягнута межа текучості матеріалу. Крихке руйнування – це розрив зв'язків між атомами під впливом нормального напруження якоїсь площини.

*В'язке руйнування* супроводжується певною пластичною деформацією. Отже в'язке руйнування настає після того, коли буде перевищена межа текучості, відбудеться якоюсь мірою пластична деформація, а після цього настає розрив зв'язків між атомами. У зв'язку з тим, що пластична деформація відбувається під впливом дотичного напруження, то спочатку останнє перевищує межу текучості, відбувається певна пластична деформація і після цього здійснюється розрив зв'язків між атомами.

Навантаження металу вище за межу текучості приводить до його пластичної деформації під впливом дотичного напруження. При кімнатній температурі характерними особливостями поведінки металів при пластичній деформації є наступні :

1 – у міру збільшення ступеня пластичної деформації опір металу пластичній деформації збільшується;

2 – у міру збільшення ступеня пластичної деформації здатність металів пластично деформуватися зменшується. Ці два явища називаються **наклепом** або **зміцненням**;

3 – під впливом пластичної деформації відбувається суттєва зміна мікро- і субструктури металу.

Пластична деформація монокристалів у переважній більшості випадків відбувається шляхом ковзання. Ковзання полягає в тому, що монокристал розбивається на шари або пластини, або пачки ковзання, які зміщуються або ковзають один відносно до одного.

1. Ковзання відбувається по певних кристалографічних площинах - площинах найменшого опору.

2. Площинами ковзання є площини найгустіше усяні атомами.

3. Ковзання зовні виявляється в тому, що на поверхні кристала виникає ступінчаста неоднорідність, так звані смуги ковзання.

4. Смуги ковзання співпадають з дефектами в кристалічній решітці, тобто в місцях скупчення точкових дефектів, дислокацій і т.д.

5. Одночасно з ковзанням одних об'ємів по відношенню до інших відбувається поворот площин ковзання навколо осі, перпендикулярній до напряму діючого зусилля.

Двійникування. Пластична деформація не завжди відбувається шляхом ковзання. У деяких випадках воно відбувається шляхом *двійникування*, яке полягає в тому, що частина кристалу зміщується щодо якоїсь площини в нове положення, симетричне залишеній частині кристалу. Ці дві частини кристалу є віддзеркаленням один одного. Пластична деформація шляхом двійникування відбувається в тих випадках, коли шляхом ковзання вона не може реалізуватися. Це такі випадки :

1 – при дуже швидкому додаванні навантаження (удари);

2 – при багатовісному напруженому стані,

3 – при низьких температурах (нижче  $0^{\circ}\text{C}$ ),

4 – коли прикладене навантаження не може викликати критичного напруження, необхідного для ковзання.

При двійникуванні має місце зсув цілої групи атомних шарів. Це відбувається при відносно малій пластичній деформації. Звичайно це залишкова деформація порядку першої між атомної відстані.

У процесі пластичної деформації реальних металів можна розрізнити такі зміни структури і властивостей:

1. при відносно малих ступенях пластичної деформації відбувається загустіння металу, йде запресування порожнеч і пар, порушуються межі зерен, але зерно ще не міняє свою форму;

2. при вищому напруженні відбувається витягування зерен, при цьому існують два типи ліній:

а) лінії Розенгайна – це смуги ковзання, розташовані в межах окремих зерен,

б) лінії Чернова-Людерса, що характеризують процеси ковзання в мікрооб'ємах, які найчіткіше виявляються при напрузі відповідних  $\sigma_T$ ;

3. відбувається при вищому напруженні дроблення зерна на дрібні осколки;

4. при ще більшому напруженні відбувається поворот кристалів щодо діючого зусилля і створюється «текстура» - переважна орієнтація кристалів по відношенню до сил, що діють. При цьому починає виявлятися анізотропія властивостей;

5. під впливом пластичної (холодної) деформації відбуваються суттєві зміни субмікроструктури, що полягають в подрібненні фрагментів та блоків і збільшенні кутів їх роз орієнтації;

6. виникає суттєве внутрішнє напруження під впливом нерівномірності пластичної деформації в окремих зернах.

Таким чином під впливом холодної пластичної деформації відбувається «наклеп» – підвищення міцності і зниження пластичності.

**Рекристалізація.** Рекристалізацією називається процес зняття в холоднодеформованому металі спотворень і недосконалості його кристалічної будови, який супроводжується зняттям внутрішнього напруження, зародженням нових зерен і повним оновленням зерна і його подальшим зростанням. При цьому властивості повертаються до результатних, тобто знімається наклеп. Наклепаний метал знаходиться в метастабільному – нестійкому стані. Для переведення його в стабільний стан необхідно збільшити рухливість атомів, це досягається підвищенням температури, зміною структури і властивостей холоднодеформованому металу в процесі його нагріву.

I повернення 1-го роду (відпочинок). Для *Fe* цей період 100-200 °С. Зміна властивостей не відбувається, не змінюються також мікро- і субструктури металу. Відбувається зменшення кількості точкових дефектів. Змінюється тільки одна властивість - електропровідність різко збільшується.

II повернення 2-го роду (полігонізація) 200-300 °С. Властивості не змінюються. Відбувається планомірне переміщення дислокацій і угруповання їх в ряди, ці ряди утворюють межі блоків.

III – первинна рекристалізація (обробка рекристалізації). В інтервалі 300-500 °С. Повністю оновлюється зерно. Механічні властивості повертаються до результатних. Встановлено, що температура рекристалізації металів залежить від температури їх плавлення. Формула А.А. Бочвара є такою

$$T_p = K \cdot T_s,$$

де  $T_p$  – абсолютна температура рекристалізації, в градусах Кельвіна;

$T_s$  – абсолютна температура плавлення, в градусах Кельвіна;

$K = 0,2$  – для хімічно чистих металів ( $K \approx 0,4$  – для технічно чистих металів  $K = 0,5 \div 0,6$  – для сплавів заліза).

*Приклад:* *Pb*:  $T_s = 327^\circ C = 600K$ ;  $T_p = 0,4 \cdot 600 = 240K \cdot t_p^0 = -33^\circ C$ .

IV. Вторинна або збірна рекристалізація. Для *Fe* > 500°С. Властивості не міняються, але укрупнюються зерна, відбувається інтенсивне зростання зерен.

**Гаряча пластична деформація.** Це пластична деформація, що відбувається при температурі вище за температуру рекристалізації. Поняття холодної і гарячої пластичної деформації є відносним. Одна і та ж температура може для одних металів бути температурою холодної пластичної деформації, а для інших температурою гарячої пластичної деформації.

*Приклад:*

|   |   |
|---|---|
| <u>20 °С</u>                                    | <u>20 °С</u>                                |
| Fe $t_p^0 \sim 450^\circ C$   холодна пластична | Pb $t_p^0 = -33^\circ C$   гаряча пластична |
| Sn $t_p^0 = 270^\circ C$   деформація           | деформація                                  |

**Механічні властивості.** До них відносяться: твердість; властивості визначувані при статичному розтягуванні; ударна в'язкість, межа витривалості.

**Твердість** – це здатність матеріалу чинити опір проникненню в нього стороннього тіла.

**Метод Брінеля** – під дією сили  $F$  у випробовуване тіло впроваджується кулька діаметром  $D$ . Число твердості  $HB$  представляє відношення сили  $F$  до площі відбитку діаметром  $d$ .

**Метод Роквелла** – у випробовувану поверхню вдавлюється індентор - діамантовий конус з кутом при вершині  $120^0$  або сталева кулька малого діаметра. Число твердості  $HR$  зворотно пропорційне до глибини впровадження індентора. Шкали приладу  $HRA$ ;  $HRB$ ;  $HRC$ . Шкала  $C$  і  $A$  – для твердих тіл, шкала  $B$  – для м'яких.

**Метод Віккерса** - вимірює як м'які, так і дуже тверді матеріали. Твердість  $HV$  визначається за діагоналлю відбитку  $d$  від вдавлюваної діамантової піраміди.

**Зміцнені характеристики.** Напруження  $\sigma_T (F_T / S_o)$  відповідає виникненню площадки текучості на записаній у процесі випробувань діаграмі в координатах  $\sigma - \delta$  і  $E$  називається фізичною межею текучості.

За відсутності площадки визначають умовну межу текучості  $\sigma_{0,2}$ , яким є напруження, що приводить до залишкової деформації 0,2% від довжини зразка.

Напруження, попереднє руйнуванню зразка, називається тимчасовим опором або межею міцності  $\sigma_B$ .

**Пластичні характеристики.** Їх знаходять, вимірюючи зразки до і після випробувань. Визначають попередню руйнуванню пластичну деформацію, що виражається відносним подовженням чи відносним звуженням  $\delta = \frac{l_k - l_o}{l_o} \cdot 100\%$ .

Крім статистичних проводять динамічні випробування на ударний вигин. Спеціальні зразки руйнують на маятниковому копії за один удар.

**Ударна в'язкість**  $a_n$  уявляє собою роботу (необхідну для руйнування), віднесена до робочої площі поперечного перерізу зразка. Випробування ударним вигином при негативних температурах визначають температури порогу холодноламкості.

Властивості металів протистояти втомі називають витривалістю. Межа витривалості  $\sigma_{-1}$  відповідає максимальному напруженню, що не викликає руйнування зразка при нескінченно великому числі циклів навантаження  $N$ . Введені бази випробувань: для сталі  $N \geq 10 \cdot 10^6$  для кольорових сплавів  $N \geq 100 > 10^6$  циклів.

### Контрольні питання:

1. Компоненти вуглецевих сталей?
2. Як поділяються вуглецеві сталі за якістю?
3. Що означає цифра в марці сталі 3?
4. Що означає цифра в марці сталі 30?
5. За яким критерієм сталі ділять: на сталі звичайної якості, якісні і високоякісні?

6. Шкідливе явище, яке розвивається через підвищений вміст домішок сірки фосфору і водню в сталі?
7. Як маркуються конструкційні та інструментальні вуглецеві сталі?
8. Поняття легована сталь?
9. Поняття легуючий елемент?
10. Який сумарний вміст легуючих елементів мають низьколеговані сталі?

## 9 КОЛЬОРОВІ МЕТАЛИ

Умовно всі метали діляться на дві групи – *чорні й кольорові*.

**Чорні метали** – темно-сірий колір, велика щільність, висока температура плавлення, висока твердість, володіють поліморфізмом. Типовим представником є залізо.

**Кольорові метали** – характерне забарвлення: червоне, жовте, біле. Велика пластичність, мала твердість, низька температура плавлення, відсутність поліморфізму. Найбільш типовим представником є мідь.

Їх підрозділяють на :

- 1) легкі метали – берилій, магній, алюміній, з малою щільністю до 3 г/см<sup>3</sup>;
- 2) благородні метали – золото, срібло, платина – група і мідь – напівблагородний метал. Висока стійкість проти корозії;
- 3) легкоплавкі метали – цинк, кадмій, ртуть, олово, свинець, вісмут, талій, сурма.

Відносна вартість кольорових металів:

|                |                   |
|----------------|-------------------|
| <i>Fe</i> -1   | <i>Cr</i> -25     |
| <i>Pb</i> -2,5 | <i>Hg</i> -65     |
| <i>Al</i> -3   | <i>Ti</i> -160    |
| <i>Cu</i> -7,5 | <i>Ag</i> -270    |
| <i>Mg</i> -8   | <i>Au</i> -11000  |
| <i>Ni</i> -17  | <i>Pt</i> -27000. |
| <i>Sn</i> -22  |                   |

### 9.1 Алюміній і його властивості

Густина – 2,7 г/см<sup>3</sup>; температура плавлення – 660°C. Об'єм виробництва – друге місце після заліза. Входить до складу глини. Запропонований в 1808 р. англійцем Деві, який і дав назву елементу. У Росії в XIX ст. називався глінієм.

У 1825 р. датчанин Ерстед отримав перші крупиці алюмінію. Автором сучасного способу виробництва алюмінію (електроліз розплавлених солей) були американський вчений Хол і французький учений Еру. У 1886 р. вони отримали незалежно один від одного патент на промисловий метод отримання алюмінію.



До 1890 р. у всьому світі було виготовлено 200т алюмінію. Тепер, в основному застосовують не чистий  $Al$ , а його сплави (дюралюміній). До 1906 р. алюміній застосовували в чистому вигляді. Вільям випадково знайшов спосіб зміцнення сплаву  $Al-Cu$  в результаті гарту і старіння, а запропонований ним сплав (4%  $Cu$ , 0,5%  $Mg$ , 0,5%  $Mn$ ) дюралюміній і зараз є найпоширенішим ( $\gamma = 2,6 \div 3 \text{ г/см}^3$ ,  $\sigma_B = 300 \div 600 \text{ МПа}$ ).

Алюміній широко застосовується там, де потрібна мала густина і велика питома міцність ( $\sigma_{B/p}$ ).

Прокатаний і відпалений алюміній високої чистоти має  $\sigma_B = 60 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_{0,2} = 0,2 \div 20 \text{ МПа}$ , НВ - 25,  $\Psi$  - 85%,  $\delta$  - 40%.  $Al$  – гранецентровані решітки. Не має алотропічних модифікацій. Має високу теплопровідність, електропровідність і приховану теплоту плавлення. Слабко піддається корозії, оскільки утворюється щільна плівка  $Al_2O_3$ .

$Al$  особливої чистоти: А 999 - 99,999%  $Al$ ;  $Fe + Si = 0,001$ .

$Al$  високої чистоти: А 995; А 99; А 37; А 95.

$Al$  технічної чистоти: А 85; А 8; А 7; А 6; А 5; А 0.

Існує три напрями застосування технічного  $Al$ :

1) висока пластичність дозволяє проводити з  $Al$  глибоке штампування, плющення дуже тонкої товщини;

2) висока електропровідність (65% від  $Cu$ ) для технічних цілей (провідниковий метал);

3) висока корозійна стійкість за рахунок плівки  $Al_2O_3$  (100А). Стійкий в органічних кислотах (застосовується в побуті, для транспортування і зберігання продуктів живлення). У неорганічних кислотах  $Al$  стійкий лише при невеликих концентраціях.

Сплави на основі  $Al$  за способом виробництва розділяють на дві групи:

1) що деформуються (в т.ч. спечені), йдуть на виготовлення напівфабрикатів - лист, профіль, поковки;

2) ливарні, призначені для фасонного литва.

Ті, що деформуються, складають 80% об'єму виробництва. Вони діляться на зміцнювані і незміцнювані термічною обробкою.

До термічних не зміцнюваних сплавів відносяться сплави  $Al$  з марганцем ( $AlMn$ ) і магнієм – магнеліт ( $AlMg2$ ,  $AlMg3$ ,  $AlMg6$  та ін.). Ці сплави володіють середньою міцністю, хорошою пластичністю і зварюваністю, а також високою корозійною стійкістю. Вони застосовуються в судно-, авіабудуванні, у виробництві зварних ємкостей, холодильників і т.д.

Механічні властивості  $AlMn$ . Марганець покращує корозійну стійкість алюмінієвого сплаву.  $Al-Mn$  сплави перевершують чистий алюміній більшою міцністю і корозійною стійкістю.

Магній – корисний легований метал, який підвищує корозійну стійкість і зменшує щільність алюмінієвого сплаву (оскільки він легше  $Al$ ), підвищує міцність, не знижуючи пластичності.

Ці сплави у вигляді листів або просоченого, пресованого матеріалу поставляють у стані, що відпалює (м'якому) (маркувальне позначення *M*); після невеликого наклепу – в напівнагартованому стані (позначенні *П*), після сильного наклепу – нагартування (позначення *H*).

Склади, вживані в авіабудуванні

|      | Mn, %     | Mg, %      |
|------|-----------|------------|
| АМц  | 1,0 – 1,6 | Менше 0,05 |
| АМг2 | 0,2 – 0,6 | 1,8 – 2,8  |
| АМг3 | 0,3 – 0,6 | 3,2 – 3,8  |
| АМг5 | 0,3 – 0,6 | 4,8 – 5,5  |
| АМг7 | 0,5 – 0,8 | 5,8 – 6,8  |

Сплав АМц

| Состояние       | М   | П   | Н   |
|-----------------|-----|-----|-----|
| $\sigma_B, МПа$ | 130 | 160 | 220 |
| $\delta, \%$    | 23  | 10  | 5   |

**Зміцнювані термічною обробкою.** До них відносяться наступні сплави: *Al-Cu-Mg* (дюралюміні Д1, Д16 та інші;  $\sigma_B = 410-540 МПа$ ;  $\delta = 11 \div 15\%$ ); на основі *Al-Cu-Mg-Si* (авіалі типу АВ:  $\sigma_B = 220 МПа$ ,  $\delta = 22\%$ ); на основі *Al-Cu-Mg-Zn* (високоміцні сплави В95, В96,  $\sigma_B = 550-700 МПа$ ,  $\delta = 7-8\%$ ); на основі *Al-Mg-Ni-Si* (жароміцні сплави АК4 - 1, Д20,  $\sigma_B = 430 МПа$ ,  $\delta = 12\%$ ); на основі *Al-Cu-Mg-Mn* (кувальні сплави АК6, АК8,  $\sigma_B = 470 МПа$ ,  $\delta = 10\%$ ) та інші.

**Дюралюміній** – деформація+термічна обробка, включає 4% *Cu* і 0,5% *Mg*, а також *Mn* і *Fe*. Винахідником дюралюмінію є вчений Вільм. Цей сплав має  $t_{зак}^{\circ} = 500^{\circ}C$ , охолоджується у воді, а потім відбуваються природні і штучні процеси старіння (рис.15).

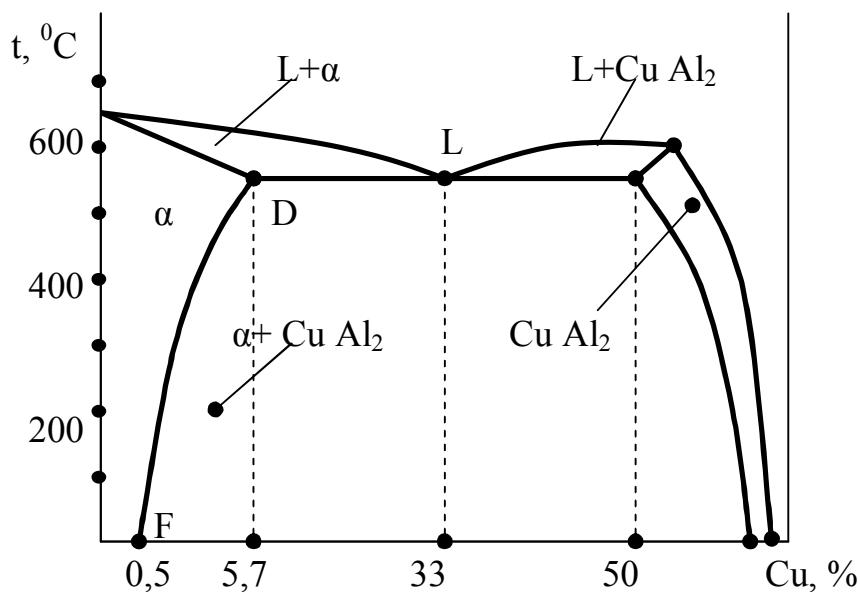


Рисунок 15 – Діаграма стану сплаву алюміній - мідь

Максимальна розчинність  $Cu$  в  $Al$  в твердому стані складає 5,7% при  $t=548^{\circ}C$ . При кімнатній температурі – 0,2-0,5%. Це вказує на те, що сплави, обмежені лінією  $DF$ , можуть термічно оброблятися і зміцнюватися. Зміцнення відбувається за рахунок розпаду термодинамічно нестійкого пересиченого  $\alpha$  - розчину  $Cu$  в  $Al$ . Шляхом дифузії усередині зерен  $\alpha$  - твердого розчину утворюються зміцнені ділянки, збагачені  $Cu$  (зони Гіне - Престона). Крім того, в сплаві виникають дисперсні частинки надмірної фази  $CuAl_2$  (що зміцнює). Цей процес називається старінням (рис.16). Старіння може бути штучним і природним (кімнатна температура).

При природному старінні  $\sigma_B$  настає через 4-5 діб. В інкубаційний період загартовані деталі можна піддавати різним технічним операціям (заклепка, гнучка). Швидкість старіння залежить від температури. При  $50^{\circ}C$  загартований стан стійкий. Якщо недовго витримувати природно постарений сплав  $Al$  при температурі  $200-250^{\circ}C$ , то він роззміцнюється і набуває властивостей, характерних для свіжо загартованого стану, набуваючи здатності до природного старіння. Це «повернення».

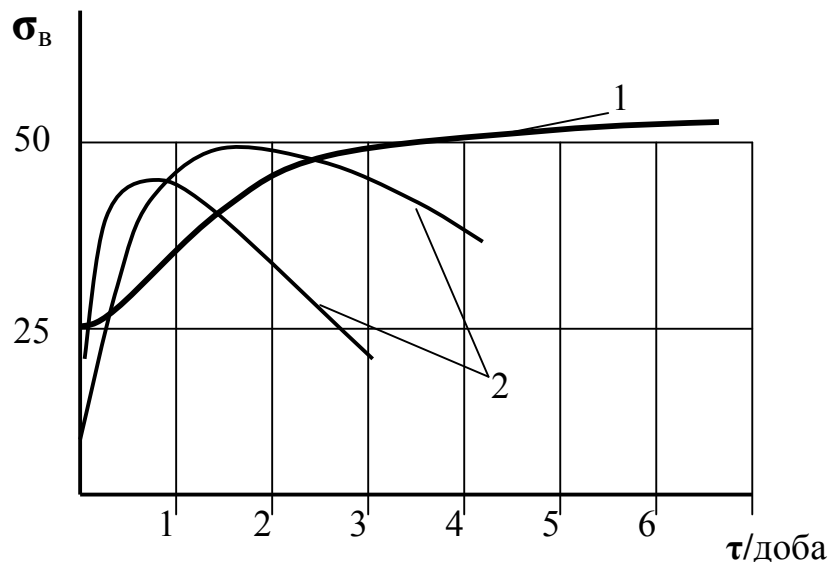


Рисунок 16 – Графік старіння дюралюмінію:  
1 – природне старіння; 2 – штучне старіння.

**Ливарні сплави.** Силуміни – ливарні сплави на основі  $Al$ ,  $Si$ , що містять і деякі інші елементи ( $AL2$ ;  $AL4$ ;  $AL9$ ;  $\sigma_B = 180 - 260 МПа$ ,  $\delta = 14\%$ ).

$Al$  і  $Si$  дають евтектику 11,7%  $Si$ . Застосовують тільки в литому вигляді (в авто- і авіабудуванні).

Як ливарні сплави  $Al$  рідше застосовують сплави  $Al$  з  $Cu$ ,  $Mg$ ,  $Zn$ .

Ряд деталей з  $Al$  сплавів виготовляють ковкою (лопаті гвинта). Окрім високих механічних властивостей від сплаву вимагається хороша пластичність в гарячому стані. У таких випадках застосовують або дюралюміній звичайного складу, або інші сплави, близькі за складом до дюралюмінію ( $AK6$ ;  $AK8$ ).

Термічна обробка литих деталей з *Al* сплавів покращує механічні властивості цих сплавів. Після гарту і природного старіння механічні властивості збільшуються в два рази.

Термічна обробка має ряд особливостей (через відмінності хімічного складу і грубішу структуру, грубозернисту).  $t_{нагр}^{\circ}$  під гарт декілька вище, ніж у деформованого, витримка велика для розчинення грубих інтерметалевих з'єднань, вирівнювання – за всім обсягом.

Ливарні *Al* сплави майже не схильні до природного старіння. Максимальну міцність отримують після штучного старіння протягом 10-20р. при 150 - 200°C. Можна суттєво підвищити їх властивості за рахунок особливої обробки в рідкому стані (модифікації). Перед самим відливанням в сплав вводять незначну кількість *Na* або ( $\frac{2}{3} NaF + NaCl$ ), що різко змінює структуру. Сплав стає доевтектичним. Структура уявляє собою з'єднання світлих первинних виділень *Al* і дрібнозернистої евтектики.

**Маркірування** *Al* означає наступне: А – сплав *Al*, Л – ливарний, цифра – порядковий номер в ГОСТі.

АЛ2 – нормальний силумін. АЛ4 і АЛ9 – силуміни із зниженим вмістом *Si* і невеликими добавками *Mg*, *Mn*.

АЛ3, АЛ5, АЛ6 – низькокремнієві силуміни леговані *Cu*.

*Si* в силумінах складає 6 - 13%.

АЛ11 – цинкований сплав, має кращі ливарні властивості, застосовується для особливо важливих цілей.

Поширені гранульовані й порошкові сплави *Al*. Гранульовані виробляються розпилюванням розплаву, при цьому виходять частинки сферичної або овальної форми – гранули. Швидкість охолодження залежить від товщини частинок, яка складає від долей до сотень мікрометрів. Достатня швидкість охолодження становить  $10^5 - 10^8 C/c$ . У гранульованих сплавах *Al* підвищуються механічні й фізичні властивості. Гранули брикетують, а потім піддають пластичній деформації.

Методами порошкової металургії виготовляють спечені *Al* порошки (САП) і спечені *Al* сплави (САС). Перші складаються з порошку *Al* і дисперсних частинок  $Al_2O_3$ , які підвищують міцність сплаву і знижують його пластичність. Сплави володіють високою жароміцністю (до 500°C). Вміст  $Al_2O_3$  в САПах 6 - 22%.

Спечені сплави (САС - 1, САС - 2 та інші) відносяться до сплавів системи *Al-Si-Ni*. Використовують в приладобудуванні як матеріали з низьким коефіцієнтом лінійного розширення. САСи у вигляді порошків отримують пульверизацією рідких сплавів при високих швидкостях охолодження. У структурі САС є дрібні включення *Si* і інтерметалеві з'єднання. Механічні властивості САС визначаються формою і розмірами частинок ( $\sigma_B = 230 - 460 MPa$ ;  $\delta = 0,5 - 4\%$ ).

## 9.2 Мідь

*Cu* – метал червоного або ясно-рожевого кольору.  $\gamma = 8,9 \text{ мг} / \text{м}^3$ ,  $t_{\text{пл}} = 1083^\circ$ , решітка ГЦК, не має алотропічних перетворень.

Цінні властивості: висока електро- і теплопровідність, пластичність, корозійна стійкість, ливарні властивості. *Cu* і її сплави добре обробляються тиском, зварюються всіма видами зварки, піддаються паянню.

Механічні властивості чистої міді (прокатаної і відпаленої):  $\sigma_B = 250 - 270 \text{ МПа}$ ;  $\delta = 40 - 50\%$ ;  $\psi = 75\%$ ;  $HB = 45$ .

На структуру і властивості міді суттєвий вплив роблять домішки. Наприклад, *Al*, *Fe*, *P*, *Sb* знижують електро- і теплопровідність. Нерозчинні в міді домішки негативно позначаються на її властивостях. Вісмут викликає холодноламкість, кисень знижує пластичність і корозійну стійкість, водень робить її крихкою і при деформації викликає розтріскування (воднева хвороба), свинець приводить до гарячеламкості міді, оскільки утворює легкоплавку евтектику ( $326^\circ\text{C}$ ). *S* утворює  $\text{Cu}_2\text{S}$ , приводить до холодноламкості і знижує пластичність при гарячій і холодній деформації. *P* підвищує механічні властивості й рідинотекучості, сприяє зварці і застосовується як розкислювач. Селен і телур утворюють  $\text{Cu}_2\text{Se}$  і  $\text{Cu}_2\text{Fe}$ , які погіршують зварюваність, знижують пластичність, але покращують обробку різанням.

**Латуні.** *Латунь* – це сплави міді з цинком (до 45%). Колір - від червонуватого до ясно-жовтого. Колір і механічні властивості змінюються із збільшенням вмісту цинку. Латунь маркірують буквою «Л» і цифрою, яка вказує процентний зміст міді: Л68. Наприклад, ЛАЖМц - 66-6-3-2 означає: мідь, 66%; А - алюміній, 6%; Ж - залізо, 3%; Мц - марганець, 2%; остатні - цинк.

За призначенням латуні можуть бути деформовані (листи, стрічки, дріт, труби і т.д.) і ливарні (відливки, злитки і т.д.).

Латунь з 15 % вмістом цинку має золотистий колір. З неї виготовляють медалі, художні вироби.

При добавці 1,5% *Sn* латуні набуває стійкість у воді.

При вмісті цинку більше 20 - 30% латунь схильна до корозійного розтріскування. Це явище називають «сезонною хворобою», яка пов'язана з насиченням вологою атмосфери.

Механічні властивості латуні залежать від вмісту цинку,  $\sigma_B$  зростає від 30%, потім падає,  $HB$  до 40% збільшується трохи, а потім різко.

Механічні характеристики деформованих подвійних латуней марок *Л96*, *Л90*, *Л80*, *Л70*, *Л68*, *Л59* є наступними:  $\sigma_B = 450 - 600 \text{ МПа}$ ,  $\delta = 2 - 5\%$  (у згартованому стані) і  $\sigma_B = 240 - 380 \text{ МПа}$ ,  $\delta = 52 - 44\%$  (у відпаленому  $\delta = 2 - 5\%$  стані).

Спеціальна багатокомпонентна деформована латунь характеризується майже такими ж механічними властивостями.

Для уникнення розтріскування латунь піддають відпалу ( $250 - 300^\circ\text{C}$ ) для зняття внутрішнього напруження (рис. 17).

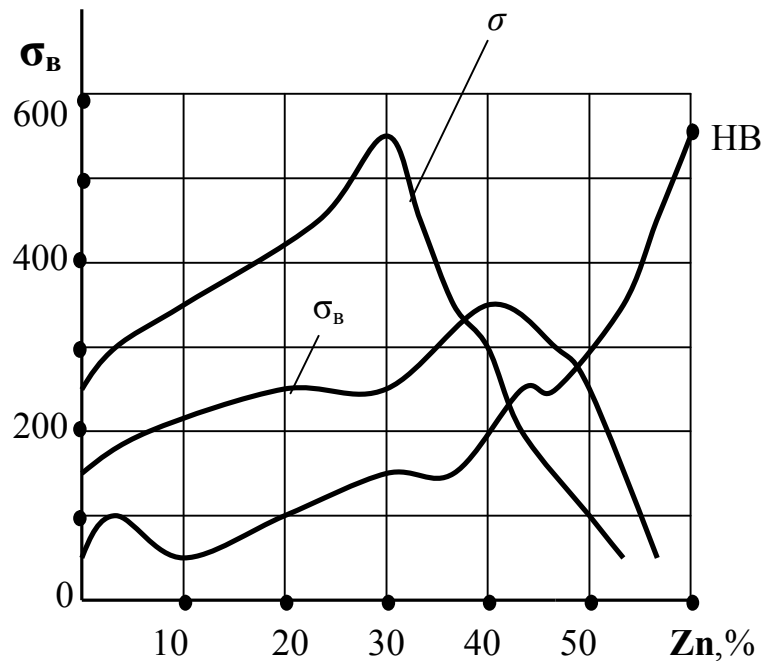


Рисунок 17 – Залежність механічних властивостей від вмісту цинку в латуні

Ливарна латунь (ЛК 80-3, ЛАЖМц 66 - 6-3-2, ЛМцНЖА 60-2-1-1-1 та ін., де К- кремній, Н - нікель) за міцністю не поступається відповідним деформованим латуням, але гірше за них за пластичністю.

**Бронзи.** Бронза – це сплави міді з оловом, алюмінієм, кремнієм, берилієм, кадмієм, хромом та іншими елементами. Бронзу називають за основними легуючими елементами: олов'яні, алюмінієві, берилієві, крем'янисті і т.д. Позначають двома буквами «Бр», потім ставлять перші букви основних легуючих елементів (О - олово, Ж - залізо, Ф - фосфор, Б - берилій, Х - хром) і цифри, що показують процентний вміст. Наприклад, БрОФ10-1 містить 10% олова, 1% фосфору, остатні – мідь.

Широке застосування має олов'яниста бронза. Її використовують для виготовлення водяної і парової апаратури, підшипників, зубчастих коліс, пружин. Олово змінює властивості бронзи: 5% Sn різко знижує пластичність; змінює колір бронзи: 5% Sn додає жовтий колір, 10 - 12% – оранжевий, з 28% – білий.

Бронза характеризується високою стійкістю проти стирання. Це один з кращих антифрикційних матеріалів. Вона характеризується малою усадкою, а також високою хімічною стійкістю. В олов'яну бронзу вводять добавки: Zn 5-10% - для здешевлення, Pb 3-5% – для кращої оброблюваності, P 1% – для додання пластичності (рис. 18).

Найчастіше використовують олов'яну бронзу марок: ливарні БрО10 ( $\sigma_B = 250 \text{ МПа}$ ;  $\delta = 5\%$ ); БрОЦС 5-5-5 ( $\sigma_B = 170 \text{ МПа}$ ;  $\delta = 8\%$ ); деформовані: БрОЦ4-3 ( $\sigma_B = 320 \text{ МПа}$ ;  $\delta = 40\%$ ); БрОЦС4-4-2,5 ( $\sigma_B = 325 \text{ МПа}$ ;  $\delta = 40\%$ ).

Застосовують також безолов'яні бронзи.

Найбільш поширені алюмінієві бронзи (подвійні й складні). Вони перевершують олов'яні за механічними властивостями.

БрА7 у відпаленому стані ( $\sigma_B = 420 \text{ МПа}$ ;  $\delta = 70\%$ );

БрАЖН10-4-4 ( $\sigma_B = 650 \text{ МПа}$ ;  $\delta = 40\%$ ). Виготовляють деталі для машин.

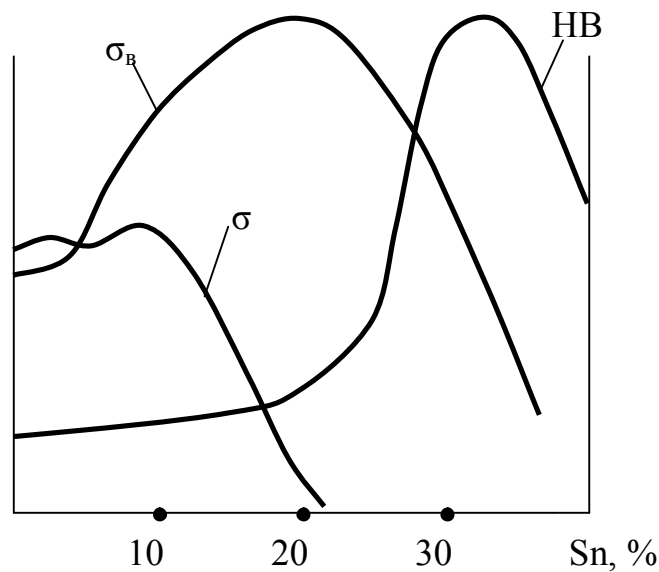


Рисунок 18 – Залежність механічних властивостей бронзи

Відливання з крем'янистої бронзи відрізняються вищою корозійною стійкістю, механічними властивостями і щільністю.

БрКЦ4-4 є заміником БрКЦС5-5-5.

Берилієва бронза (БрБ2 та ін.) характеризується високою міцністю ( $\sigma_B = 1200 \text{ МПа}$  в загартованому і зістареному стані) і пружністю, хімічною стійкістю, зварюваністю, обробкою різанням. З неї виготовляють мембрани, пружини.

Свинцева бронза (БрС30) є хорошим антифрикційним матеріалом для підшипників.

Окрім латуні й бронзи знаходять застосування **мідно-нікелеві сплави**, що мають високі електричні властивості. До них відносять  $\text{Cu} + 18 \div 30\% \text{Ni} + 0,8\% \text{Fe} + 1\% \text{Mn}$  (мельхіор);  $13 \div 16\% \text{Ni} + 18 \div 22\% \text{Zn}$  (нейзільбер);  $39 \div 41\% \text{Ni} + 1 \div 2\% \text{Mn}$  (константан);  $2,5 \div 3,5\% \text{Ni} + 11,5 \div 13,5\% \text{Mn}$  (манганін).

### 9.3 Інші кольорові метали

**Титан** – сріблясто-білий метал,  $\gamma = 4,5$ ,  $t_{пл} = 1672^\circ \text{C}$ . Має 2 модифікації:

1.  $\alpha$  - низькотемпературний, ГПУ
2.  $\beta$  - високотемпературний ( $t$  більше  $882^\circ \text{C}$ ), ОЦК.

Титан легкий, міцний, тугоплавкий, володіє високою корозійною стійкістю за рахунок оксидної плівки  $\text{TiO}_2$ . Обробляється тиском в холодному і гарячому стані, добре зварюється, але погано утворюється різанням. Використовується як розкислювач, модифікатор, легуюча добавка.

За структурою розрізняють:

- 1)  $\alpha$  - сплави;
- 2)  $\alpha + \beta$  - сплави;

3)  $\beta$  - сплави.

Найчастіше застосовують 1 і 2 сплави.

1 група. ВТ 4, ВТ 5, ВІД 4, ВТ 18 – легують алюміній, іноді додають *Mn, Mo, Nb, Si, Sn* і т.д. Мають підвищену міцність при  $t_{ком}$  і підвищену  $t$ , а також низьку технологічну пластичність. Термічно не зміцнюються, використовують рекристалізацію, відпал при  $t=650-850^{\circ}C$  ( $\sigma_B = 650 \div 880$  МПа;  $\delta = 15 \div 40\%$ ).

2 група ВТ 6, ВТ 8, ВТ 14 та інші. Вони містять *Al, Mo, V*. Володіють високою міцністю, яку можна ще підвищити за рахунок гарту і старіння. Головний ефект зміцнення йде за рахунок легування. Має наступні механічні властивості: ( $\sigma_B = 800 \div 1150$  МПа;  $\delta = 8 \div 15\%$ ).

3 група ВТ 31, ВТ 22, ВТ 15. Це найбільш пластичні, але найменш міцні сплави.

*Застосування*: хімічна промисловість, суднобудування, машинобудування, авіація, ракетна техніка, легка і харчова промисловість. У криогенній техніці: компресори, холодильники, відцентрові насоси, магістральні газопроводи для північних районів, ємкості для зберігання рідкого водню, азоту, гелію і т.д.

**Магнієві сплави**:  $\gamma = 1,74$ ,  $t_{nn} = 651^{\circ}C$ , алотропічних перетворень не має.

Хімічна активність: метал. Окислюється з утворенням плівки *MgO*, не володіє захисними властивостями. У злитках, виробках і сплавах магній не вогненебезпечний. Небезпечний у вигляді стружки, порошку або пилу. Взаємодія води з гарячим і розплавленим магнієм супроводжується вибухом.

Магній і його сплави добре обробляються різанням. Пластичні. Обробляються при підвищеній температурі. Легко зварюються аргонодуговою зваркою. Механічні властивості прокатаного магнію: ( $\sigma_B = 180$  МПа;  $\delta = 15\%$ ,  $HB = 30$ ).

Домішки *Fe, Ni, Co, Cu* знижують корозійну стійкість.

Магній використовують для отримання сплавів на його основі і легування алюмінієвих сплавів.

На основі сплавів магнію виготовляють аноди, деталі машин з високими деформаційними властивостями.

Сплави магнію можуть бути з алюмінієм, цинком і марганцем.

Магнієві сплави можуть бути ливарні й деформовані. З ливарних сплавів отримують деталі методом фасонного литва. Маркірують *МЛ*.

Сплави, що деформуються, використовують для отримання напівфабрикатів і виробів пластичної деформації (плющення, кування, штампування). Маркірують *МА*. За цими буквами ставлять цифри, вказуючи номер сплаву.

Ливарні: *Mg – Al – Zn* (МЛЗ, МЛ5,  $\sigma_B = 147 \div 225$  МПа;  $\delta = 3\%$ ); на основі *Mg – Zn – Zr* (МЛІ2  $\sigma_B = 200 \div 220$  МПа;  $\delta = 3 \div 6\%$ ).

Деформовані: *Mg – Mn* (МА1, МА8,  $\sigma_B = 240 \div 260$  МПа;  $\delta = 5 \div 12\%$ ). – *Mg – Al – Zn*, МА2, МА5; *Mg – Nb*, МА12.



*Mg – Zn – Zr (МА14,  $\sigma_B = 350 \text{ МПа}$ ;  $\delta = 14\%$ ).*

*Властивості:* легкість, на 20-30% знижують металоємність, добре поглинають вібрації.

**Олов'яні сплави.** Це підшипникові сплави на основі *Sn, Pb, Zn, Al*. Їх називають *бабітами*. Вони володіють неоднорідною (гетерогенною) структурою, яка характеризується наявністю твердих включень і (м'якої пластичної) основи. Така структура забезпечує швидке прироблення деталей, які труться, і утворення мережі мікроскопічних каналів, по яких циркулює мастило і відходять продукти зносу.

Кращі олов'яно-сурм'яні бабіти марок *Б83* і *Б89*. У них основою служить *Sn*, містить 7 – 10% сурми і 2,5 – 6,5% міді ( $\sigma_B = 90 \text{ МПа}$ ;  $\delta = 6 \div 9\%$ ). Температура плавлення  $380\text{-}342^\circ\text{C}$ . Мікроструктура – пластична основа, що складається з  $\alpha$  – твердого розчину сурми і міді в олові, в яку вкраплені світлі тверді включення *SnSb* і включення *Cu<sub>3</sub>Sn*.

Замінниками *Б83* і *Б89* є свинцево-олов'яно-сурм'яні бабіти марки *Б6, Б11, Б16*, в яких основою служить *Pb* (олова – від 5 до 17%, сурми – 13 - 17%, міді – 0,7 – 3%).

Механічні властивості:  $\sigma_B = 70 \div 80 \text{ МПа}$ ;  $\delta = 0,5\%$ . У цих сплавах м'якою основою є свинець, а твердими хімічними сполуками *SnSb*, *Cu<sub>3</sub>Sn*.

### Контрольні питання:

1. Чим пояснюється корозійна стійкість міді в природних середовищах?
2. Що таке латунь?
3. Як маркують латуні, що деформуються?
4. Як маркують ливарні латуні?
5. Що таке бронза?
6. Дайте характеристику властивостей олов'яних бронз?
7. Де застосовується бронза?
8. Якими унікальними властивостями володіє алюміній?
9. Як класифікують алюмінієві сплави?
10. Чим модифікують силуміни?
11. З якою метою модифікують силуміни?
12. Які властивості титану?
13. Які властивості магнію?

## 10 НЕМЕТАЛІЧНІ КОНСТРУКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

У промисловості широко застосовуються неметалічні матеріали: пластичні маси, композиційні й гумові матеріали, клеї, лакофарбні покриття, деревина, кераміка та ін.

Основною складовою неметалів є полімери – з'єднання, що складаються з макромолекул, схожих на витягнуті ланцюжки, окремі ланки яких є атомними угрупованнями (*мономери*).

Макромолекули можуть містити однакові або різні мономерні, а іноді - блоки мономерів, що чергуються.

У зв'язку з цим матеріали називають *гомополімерами* (або полімерами), *сополімерами* і *блокосополімерами*.

За походженням полімери діляться на природні (натуральний каучук, азбест, целюлоза та ін.) і синтетичні (поліетилен, полістирол, поліаміди та ін.).

Низькомолекулярні речовини (етилен, стирол та ін.) переробляють в синтетичні полімери трьома способами:

- 1) полімеризацією,
- 2) поліконденсацією,
- 3) хімічним перетворенням.

*Полімеризація* є процесом з'єднання молекул (мономерів) без виділення побічних продуктів і зміни елементарного складу.

При *поліконденсації* з'єднуються молекули однакової або різної будови з виділенням побічних низькомолекулярних речовин.

*Хімічні перетворення* направлені на формування в полімерах нових структур і додання нових властивостей.

За хімічним складом полімери діляться на *органічні*, *елементорганічні* й *неорганічні*. Основну масу складають органічні полімери: смоли і каучук. Їх молекулярний ланцюжок в основному утворений атомами вуглецю. Атоми різних елементів, які вводяться в основний ланцюг, додають полімерам специфічні властивості (кисень - гнучкість, фтор - хімічну стійкість, хлор - вогнестійкість).

До складу основного ланцюга *елементорганічних* полімерів входять неорганічні атоми кремнію, титану, алюмінію та ін. До цього класу відносяться більш теплостійкі смоли, каучуки, але менш пружні й еластичні, ніж органічні полімери.

Основою *неорганічних полімерів* служать оксиди кремнію, алюмінію, магнію та ін. металів. До них відносяться силікатне скло, кераміка, слюда, азбест, графіт, що відрізняються щільністю, крихкістю і тривалою теплостійкістю.

*Полімери* характеризуються особливістю будови – наявністю ланцюгових молекул, в яких атоми уздовж ланцюга зв'язані міцними хімічними зв'язками. Між макромолекулами існують слабкіші електростатичні й водневі зв'язки, що забезпечує полімерам гнучкість. У деяких полімерів можуть існувати хімічні зв'язки і між макромолекулами, що різко знижує їх еластичність і підвищує міцність.

За структурою макромолекул полімери діляться на лінійні або ланцюгоподібні, розгалужені, стрічкові, просторові, паркетні. Лінійні полімери (поліетилен, поліамізин) відрізняються еластичністю, великою щільністю укладання макромолекул.

Розгалужені полімери (поліізобутилен і різні сополімери) володіють меншою щільністю, менш міцні, більш розчинні і легко плавляться.

Різновидом просторового полімеру є, наприклад, графіт з пластинчастою або паркетною структурою. За фазовим складом полімери аморфні й кристалічні. Перші мають невисоку міцність, але хорошу еластичність, другі можуть мати просторові решітки кристалів. Як правило, співіснують аморфна і кристалічна сфери. Остання додає полімерам теплостійкість, жорсткість і міцність. Відношення об'єму, займаного кристалічною фазою, до загального об'єму полімера, називають *ступенем кристалічності*.

За поведінкою при нагріві полімери діляться на *термопластичні* й *терморективні*. Термопластичні полімери при підвищених температурах розм'якшуються, а при знижених - тверднуть. Їх можна переробляти у виробі неодноразово, структура полімерів лінійна або розгалужена. Терморективні полімери на першому етапі переробки у виробі мають лінійну структуру і при нагріві розм'якшуються. При зростанні температури макромолекули «зшиваються», полімер твердне і залишається твердим, тобто можлива лише одноразова його переробка.

Багато полімерів володіють малою щільністю і теплостійкістю, а також високою хімічною і корозійною стійкістю. Це гарні електроізоляційні матеріали, що до того ж володіють хорошими оптичними властивостями. Вони відзначаються достатньою міцністю, пружністю, еластичністю, високою технологічністю.

Залежно від температури нагріву полімери можуть знаходитися в одному з трьох фізичних станів: склоподібному, високоеластичному і в'язкотекучому.

*Склоподібний* стан характеризується коливальними рухами лише атомів, що входять до складу мономерів. Ні ланки, ні макромолекули полімеру не переміщуються. Це стан властивий всім полімерам, а полімери з просторовою структурою бувають тільки в склоподібному стані. Переважна деформація полімерів в цьому стані – пружна.

*Високоеластичний стан* забезпечується за рахунок коливання ланок і вигинів макромолекул, що може призвести до значних оборотних змін форми полімера за рахунок сумісних пружних і високоеластичних деформацій. Подібний стан досягається у лінійних, розгалужених і рідкоічастих (типу гум) полімерів.

*В'язкотекучий стан* (рідкий) спостерігається у лінійних і розгалужених полімерів за рахунок високої рухливості макромолекул. У в'язкотекучому стані проводяться переробки полімерів і матеріалів на їх основі у виробі. Полімери у високоеластичному або в'язкотекучому стані піддають повільному розтягуванню. При цьому макромолекули набувають направленої орієнтації і впорядкованої структури, що, у свою чергу, приводить до підвищення міцності й пружності полімерів.

Полімери схильні до теплового, світлового, озонного і атмосферного *старіння* – процесу мимовільної необоротної зміни властивостей. При цьому полімери або розм'якшуються, або підвищують свою твердість і крихкість.

## 10.1 Типові термопластичні матеріали

**Пластмасами**, або **пластиками** називають матеріали, які отримують на основі природних або синтетичних полімерів, які при певній температурі і тиску набувають пластичності, а потім тверднуть, зберігаючи форму при експлуатації. Пластмаси можуть бути з одного полімеру або мати складну композицію. Окрім полімеру до складу пластмас входять також наповнювачі, пластифікатори, затверджувачі, каталізатори, фарбники та ін.

**Термоласти.** Поліетилен залежно від методу виготовлення може мати низьку щільність ( $0,9 - 0,95 \text{ мг/м}^3$ ) і ступінь кристалічності 55 - 65%, або високу щільність ( $0,95 - 0,98 \text{ мг/м}^3$ ) і ступінь кристалічності 74 - 95%. Хімічно стійкий, температурний інтервал експлуатації складає  $70-100^\circ\text{C}$ . Кристалічна фаза додає поліетилену теплостійкість і високу механічну міцність ( $\sigma_B = 8,5 \div 45 \text{ МПа}$ ). Для підвищення стійкості проти старіння в нього вводять 2-3% сажі. Використовується для виробництва плівок, труб, ізоляції проводів і кабелів, покриттів на метал та ін.

**Поліпропілен** ( $\gamma = 0,9 \div 0,92 \text{ мг/м}^3$ ) має значну кількість кристалічної фази. Температура експлуатації від  $-15$  до  $+150^\circ\text{C}$ . Високі фізико-механічні властивості  $\sigma_B = 25 \text{ МПа}$ . Застосовують у виробництві текстильних виробів, плівок, конструкційних деталей і різних ємкостей.

**Полістирол** ( $\gamma = 1,05 \div 1,1 \text{ мг/м}^3$ ) - твердий, жорсткий і прозорий аморфний пластик. Розчиняється в бензолах, але стійкий до слабких кислот, лугів, спиртів, не розчиняється в мастилах і бензині. Використовується в інтервалі температур  $-20- +80^\circ\text{C}$ ;  $\sigma_B = 35 \div 40 \text{ МПа}$ . Схильний до старіння і утворення тріщин. *Використання:* деталі радіо і телетехніки, фотоапаратури, корпусів і ручок різних машин, волокон, деталі автомобілів, труб та ін.

**Фторопласт - 4** ( $\gamma = 2,15 \div 2,35 \text{ мг/м}^3$ ), містить кристалічну і аморфну фази. Термічно стійкий ( $-269$  до  $+250^\circ\text{C}$ ),  $\sigma_B = 14 \div 35 \text{ МПа}$  зберігається до  $t = 250^\circ\text{C}$ . Має високу хімічну стійкість проти кислот, лугів, окислювачів і розчинників; не змочується водою, має малий коефіцієнт тертя. *Недоліки:* холодотекучість, виділення фтору при підвищених температурах. *Застосування:* деталі хімічної апаратури, труби для хімікатів, антифрикційні покриття на метали та ін.

**Полівінілхлорид** ( $\gamma = 1,4 \text{ мг/м}^3$ ), аморфна структура, хороша хімічна стійкість, негорючий, атмосферостійкий,  $\sigma_B = 40 \div 60 \text{ МПа}$ .

**Вініпласт** – різновид полівінілхлориду, застосовується у виробництві труб для агресивних середовищ, захисних покриттів металів, гальванічних ванн і т.п. *Недоліки:* низька тривала міцність, термостійкість під навантаженням.

**Пластикат** – різновид полівінілхлориду. *Використання:* у вигляді плівки або як початковий матеріал для виготовлення друкарських валів, прокладок ущільнювачів, конвеєрних стрічок, труб та ін.

**Поліаміди** ( $\gamma = 1,12 \div 1,16 \text{мг} / \text{м}^3$ ) – пластики, що кристалізуються, відомі як капрон, нейлон та ін. Стійкі до бензину, спирту, лугів. Робоча температура  $60\text{-}110^\circ\text{C}$ ,  $\sigma_B = 50 \div 100 \text{МПа}$  (хороший конструкційний матеріал). Висока зносостійкість, ударна міцність, демпфуючі властивості і низький коефіцієнт тертя. *Недоліки* - гігроскопічність і старіння за рахунок окислення. *Застосування*: шківи, зубчасті колеса, підшипники, ущільнювачі, трубопроводи, волокна, канати, антифрикційні й антикорозійні покриття металів.

**Лавсан** ( $\gamma = 1,12 \text{мг} / \text{м}^3$ ) – складний поліефір, кристалічний полімер, при швидкому охолодженні може стати аморфним. Володіє хорошою хімічною стійкістю і морозостійкістю ( $-70^\circ\text{C}$ )  $\sigma_B = 17,5 \text{МПа}$ , яка може бути збільшена за рахунок заданої орієнтації молекул. *Застосування*: волокна, тканини, плівки, канати, ремені, зубчасті колеса та ін.

**Термостійкі пластики** –  $300^\circ\text{C}$  і більше – поліаміди – ароматичні термопластичні пластики. Стійкі до розчинників, масел, слабких кислот,  $\sigma_B = 90 \div 130 \text{МПа}$ , низький коефіцієнт тертя. *Застосування*: плівки, різні деталі машин.

Наповнювачі додають в термопласти в кількості 40 - 70% для підвищення механічних властивостей, зниження вартості й зміни інших параметрів. Наповнювачі – це органічні й неорганічні речовини у вигляді порошків (деревна мука, сажа, слюда,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ , тальк графіт), волокон (бавовняне, скляне, азбестове, полімерне), листів (папір, тканини, деревний шпон).

Стабілізатори – різні органічні речовини, які вводять в кількості декількох відсотків для збереження структури молекул і стабілізації властивостей, що уповільнює старіння.

Пластифікатори – додають в кількості 10 - 20% для зменшення крихкості й поліпшення формованості. Пластифікаторами часто служать ефіри, а іноді полімери з гнучкими молекулами.

Спеціальні добавки – змащувальні матеріали, фарбники, добавки для зменшення статичних зарядів і горючості, для захисту від цвілі, прискорювачі й сповільнювачі затвердіння – служать для зміни або посилення яких-небудь властивостей.

Затверджувачі в кількості декількох відсотків додають до термореактивних пластмас. Як затверджувачі використовують органічні перекиси та ін. речовини, сірку (в гумах).

Основою класифікації пластмас служить хімічний склад полімера. Залежно від полімера пластмаси розділяють на *фенолоформальдегідні (фенопласти)*, *епоксидні*, *поліамідні*, *поліуретанові*, *стиролові* та ін.

## 10.2 Типові термореактивні матеріали

У термореактивних пластмасах (реактопластах) зв'язуючими є термореактивні полімери, найчастіше це епоксидні (склопластики на їх основі

здатні до тривалої експлуатації при  $t$  до  $200^{\circ}\text{C}$ ), фенолоформальдегідні (до  $260^{\circ}\text{C}$ ), кремнійорганічні (до  $370^{\circ}\text{C}$ ), поліамідні (до  $350^{\circ}\text{C}$ ) смоли, а також неорганічні поліефіри (до  $200^{\circ}\text{C}$ ). Зв'язуючі повинні володіти високою адгезією, теплостійкістю, хімічною стійкістю, малою усадкою, технологічністю.

У порошкових пластмасах, прес - порошках ( $\gamma = 1,4 \div 1,45 \text{ мг/м}^3$ ) наповнювачами служать органічні (деревна мука, целюлоза) або мінеральні (графіт, тальк, кварц) порошки. Ці пластмаси володіють хімічною стійкістю, теплостійкістю до  $110^{\circ}\text{C}$ , міцністю  $\sigma_B = 30 \div 60 \text{ МПа}$ , але низькою ударною в'язкістю.

*Застосування:* електроізоляційні деталі, елементи несилкових конструкцій. Прес - порошки, які вироблені на основі епоксидних смол, знайшли застосування в інструментальній справі, виробництві штампів і пристрою, для усунення дефектів литва та ін.

У волокнистих пластмасах, волокнітах ( $\gamma = 1,35 \div 1,45 \text{ мг/м}^3$ ) наповнювачем є вичоси бавовни. Виготовляють шківни, рукоятки, фланці і т.п.

Азбоволокніти ( $\gamma = 1,95 \text{ мг/м}^3$ ), як наповнювач використовується волокнистий азбест, більш теплостійкий (до  $200^{\circ}\text{C}$ ), стійкий до кислот, володіє високими фрикційними властивостями. Використовують для створення гальмівних пристроїв.

Скловолокніти – хімічно стійкі, негорючі, температура експлуатації до  $280^{\circ}\text{C}$ , мають  $\sigma_B = 80 \div 500 \text{ МПа}$ , технологічні. Із скловолокнітів роблять високоточні, будь-якої конфігурації кріпильні вироби і деталі машин.

У складних пластмасах застосовують листові наповнювачі.

Гітенакси ( $\gamma = 1,3 \div 1,45 \text{ мг/м}^3$ ) з паперовими наповнювачами підрозділяють на електротехнічні і декоративні. Витримують температуру до  $150^{\circ}\text{C}$ ,  $\sigma_B = 80 \div 100 \text{ МПа}$ . Застосовують для виготовлення різних щитків, панелей, облицювання приміщень.

Текстоліти ( $\gamma = 1,3 \div 1,45 \text{ мг/м}^3$ ) мають наповнювач з бавовняних тканин, випускають марки ПТК, ПТ та ін. Працюють при температурі  $80 - 125^{\circ}\text{C}$ ,  $\sigma_B = 65 \div 100 \text{ МПа}$ , хороший демпфуючий матеріал. *Застосування:* зубчасті колеса, вкладиші підшипників.

Деревно-шаруваті пластики (ДСП) ( $\gamma = 1,3 \div 1,4 \text{ мг/м}^3$ ), містять наповнювачі у вигляді деревної шпони. Експлуатуються при температурі до  $140 - 200^{\circ}\text{C}$ ,  $\sigma_B = 130 \div 300 \text{ МПа}$ , безшумні в роботі й довговічні. З них виготовляють підшипники, шківни, деталі швейних і текстильних машин, автомобілів, вагонів.

В азботекстолітах як наповнювач використовують азбестову тканину. Це конструкційний, фрикційний і термовитримний матеріал, застосовується для гальмівних пристроїв.

До шаруватих пластиків відносяться і склотекстоліти ( $\gamma = 1,4 \div 1,9 \text{ мг/м}^3$ ) в яких використовують скляні тканини. Склопластики здатні до тривалої експлуатації при  $t=200-400^\circ\text{C}$ , а короткочасно – до декількох тисяч градусів. Хімічно стійкі,  $\sigma_B$  до  $600 \text{ МПа}$ , мають достатню ударну в'язкість і вищу порівняно з металами працездатність. *Недоліки*: анізотропія і невисокий модуль пружності. *Застосування*: корпуси човнів, суден, кузови автомашин та ін.

### 10.3 Гумові матеріали

**Гумою** називають продукт вулканізації суміші каучуку з сіркою та іншими добавками.

Основою гуми служить каучук натуральний або синтетичний. Для поліпшення фізико-механічних властивостей каучуків вводять різні добавки (*інгредієнти*).

1. Як вулканізуючі речовини, що беруть участь в утворенні просторово-сіткової структури вулканізату, звичайно застосовують сірку і селен. Для гум електротехнічного призначення замість елементарної сірки, яка взаємодіє з міддю, застосовують органічні сірчисті сполуки (тіурам).

2. Протистарителі – альдоль, нізон, віск, парафін.

3. Пом'якшувальні засоби (пластифікатори) – парафін, вазелін, стеаринова кислота, бітум, рослинні масла та ін.

4. Наповнювачі – сажа, крейда, тальк і т.п., підвищують механічні властивості й здешевлюють гуму.

5. Фарбники.

*Гуми* – хімічно стійкі матеріали, які володіють газо- і водонепроникністю, високою стійкістю до стирання і хорошими електроізоляційними властивостями. Ці матеріали мають низький модуль пружності ( $E = 1 \div 10 \text{ МПа}$ ); є малостискальними, схильні до зниження працездатності за рахунок дії теплоти внаслідок внутрішнього тертя, яке виділяється, при багатократному навантаженні виробу.

До гум загального призначення відносяться *натуральний каучук* (НК) ( $\gamma = 0,91 \div 0,92 \text{ мг/м}^3$ ). Це аморфний полімер, але в ньому може бути утворена і кристалічна фаза, що приводить до зміцнення НК. Розчиняється в бензині, бензолі та інших розчинниках, утворюючи клеї. Температурний інтервал використання від  $70$  до  $130^\circ\text{C}$ . Механічні властивості НК:  $\sigma_B = 24 \div 34 \text{ МПа}$ ,  $\delta = 600 \div 700\%$ , залишкове подовження  $25 - 40\%$ .

До цієї групи належать гуми марки *СКБ*, *СКС*, *СКІ*, що володіють властивостями, близькими до властивостей натурального каучуку. З гум загального призначення проводять ремені, рукави, шини, ізоляцію кабелів та ін.

До *спеціальних* відносять декілька груп гум. До групи *мастилобезостійких* входить гума наїрит ( $\gamma = 1,225 \text{ мг/м}^3$ ), для якої властиві висока еластичність, вібростійкість, озоностійкість. Поступається гумам загального призначення за морозо- і теплостійкістю. Існують марки мастилобензостійких гум *СКН*

( $\gamma = 0,94 \div 0,99 \text{ мг/м}^3$ ) і тіокол ( $\gamma = 1,3 \div 1,4 \text{ мг/м}^3$ ), останній є хорошим герметиком.

Гума СКТ ( $\gamma = 1,7 \div 2,0 \text{ мг/м}^3$ ) відноситься до теплостійких, її температурний інтервал експлуатації від 60 до 200<sup>0</sup>С.

Світлоозоностійкі гуми випускають марок СКФ ( $\gamma = 1,8 \div 1,9 \text{ мг/м}^3$ ), СКЕП і бутілкаучук. Зносостійкі гуми отримують на основі каучуку СКУ. Із спеціальних гум виготовляють ремені, транспортні стрічки, мастилобензостійкі ущільнювачі, діафрагми, гнучкі шланги та ін.

Застосування неметалічних матеріалів призводить до значного зниження матеріаломісткості машин і зменшення маси конструкції в 4 - 5 разів. Застосування цих матеріалів забезпечує скорочення виробничого циклу. Трудомісткість виготовлення деталей зменшується в 5 - 6 разів, а собівартість продукції знижується в 2 - 3 рази.

#### 10.4 Композиційні матеріали

**Композиційні матеріали** є композицією з м'якої матриці і високоміцних волокон. Волокна армують матрицю і сприймають все навантаження. У цьому полягає принципова відмінність композиційних матеріалів від звичайних сплавів, зміцнених, наприклад, дисперсними частинками. У сплавах основне навантаження сприймає матриця (твердий розчин), а дисперсні частинки гальмують в ній рух дислокацій, сильно знижуючи тим самим її пластичність. У композиційних матеріалах навантаження сприймають високоміцні волокна, зв'язані між собою пластичною матрицею. Матриця навантажена слабо і служить для передачі й розподілу навантаження між волокнами. Композиційні матеріали відрізняються високим опором розповсюдження тріщин, оскільки при їх утворення, наприклад, через руйнування волокна тріщина «в'язне» в м'якій матриці. Крім того, композиційні матеріали, що використовують високоміцні й високомодульні волокна і легку матрицю, можуть володіти високими питомою міцністю і жорсткістю.

Рівень заданого комплексу властивостей проектується заздалегідь і реалізується у процесі виготовлення матеріалу. При цьому матеріалу надають по можливості форму, що максимально наближається до форми готових деталей і навіть окремих вузлів конструкції.

**Композиційними** називаються складні матеріали, до складу яких входять ті, що сильно відрізняються за властивостями нерозчинні або малорозчинні один в одному компоненти, розділені в матеріалі яскраво вираженою межею. Принцип запозичений у природи - стовбури і стеблини рослин, кістки людей і тварин. Властивості композиційних матеріалів в основному залежать від фізико-механічних властивостей компонентів і міцності зв'язку між ними. Відмітна особливість - в них виявляються достоїнства компонентів, а не їх недоліки. Разом з тим для них властиві риси, якими не володіють окремо взяті компоненти, що входять до їх складу. Для оптимізації властивостей композицій



вибирають компоненти з властивостями, що різко відрізняються, але доповнюють один одного.

Основою композиційних матеріалів (матриць) служать метали або сплави (композиційні матеріали на металевій основі), а також полімери, вуглецеві й керамічні матеріали (композиційні матеріали на неметалічній основі).

Матриця зв'язує композиції і надає їй форму. Від властивостей матриці залежать технологічні режими отримання композиційних матеріалів, а також такі важливі експлуатаційні характеристики, як робоча температура, опір втомному руйнуванню, дії навколишнього середовища, щільність і питома міцність. Вироблені композити з комбінованими матрицями, що складаються з чергуючих шарів (два і більше) різного хімічного складу.

Композиційні матеріали з комбінованими матрицями називають **поліматричними**. Для цих матеріалів характерний великий перелік набутих властивостей.

У матриці рівномірно розподілена решта компонентів (наповнювачів). Головну роль у зміцненні композиту відіграють наповнювачі, тому їх часто називають **зміцнювачами**. Зміцнювачі повинні володіти високими міцністю, твердістю і модулем пружності. За цими властивостями вони значно перевершують матрицю.

Властивості композиту залежать також від форми або геометрії, розміру, кількості й характеру розподілу наповнювача (схеми армування).

*За формою наповнювача діляться на три групи:*

- 1) нуль вимірні,
- 2) одновимірні,
- 3) двовимірні.

*Нульвимірними* називають наповнювачі, які мають в трьох вимірах дуже малі розміри одного порядку (частинки).

*Одновимірні* – мають малі розміри в двох напрямках і розмір, що значно перевершує їх у третьому вимірюванні (волокна).

*Двовимірні* – мають два розміри, що співвимірні з розміром композиційного матеріалу, значно перевершують третій (пластини, тканина).

За формою наповнювача композити розділяють на дисперсно-зміцнені й волокнисті.

**Дисперсно-зміцненими** називають композити, зміцнені нульвимірними наповнювачами. До **волокнистих** відносять матеріали, зміцнені одновимірними або одно- і двовимірними наповнювачами.

За схемою армування композити підрозділяють на три групи: з одновісним, двовісним і тривісним армуванням.

Для *одновісного (лінійного)* армування використовують нульвимірні й одновимірні наповнювачі. Нульвимірні розташовують так, що відстань між ними по одній осі (наприклад, по осі X) значно менше, ніж по двох інших. Об'ємний вміст наповнювача в цьому випадку складає 1-5%. Одновимірні наповнювачі розташовують паралельно один одному.

При *двовісному (площинному)* армуванні використовують нуль-, одно- і двовимірні наповнювачі. Нульвимірні й одновимірні наповнювачі

розташовуються в площинах, паралельних один одному. При цьому відстань між ними в межах площини значно менше, ніж між площинами. При такому розташуванні нульвимірного наповнювача його вміст доходить до 15-16%. Одновимірні наповнювачі також розташовані в паралельних площинах. При цьому в межах кожної площини вони розташовані паралельно, а по відношенню до інших площин під різними кутами. Двовимірні наповнювачі розташовані паралельно один одному.

При *тривісному (об'ємному)* армуванні немає переважного напрямку в розподілі наповнювача. Для армування використовують нульвимірні й одновимірні наповнювачі. Відстані між нуль нульвимірними наповнювачами одного порядку, їх об'ємний вміст може перевищувати 15-16%. Одновимірні наповнювачі вміщують у трьох взаємно перпендикулярних площинах.

Для розширення комплексу властивостей часто використовують одночасно наповнювачів різної форми. Композити, які містять два і більш різних наповнювача, називають *поліармованими*.

**Дисперсно-зміцнені композити.** У них наповнювачами служать дисперсні частинки тугоплавких фаз – оксидів, нітридів, боридів, карбідів ( $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $BN$ ,  $SiC$  та ін.). Ці матеріали отримують методами порошкової металургії, рідше безпосередньо вводять наповнювачі в рідкий метал перед розливанням із застосуванням ультразвукової обробки для кращого перемішування. Розміри частинок в межах 0,01 - 0,1мкм, а відстань між ними 0,05 - 0,5мкм.

До цих матеріалів відносять матеріали із *спеченої алюмінієвої пудри* (САП); на нікелевій основі відомі композиції, зміцнені частинками оксидів торія, натрію, гафнію.

*САП* – характеризується високою міцністю, жароміцністю, корозійною стійкістю і термічною стабільністю властивостей. Структура САП - алюмінієва основа з рівномірно розподіленими дисперсними включеннями  $Al_2O_3$ . Добре деформується в гарячому стані, легко обробляється різанням, зварюється контактною, аргонодуговою зваркою. Застосовують *САП-1, САП-2, САП-3*, з них проводять всі види напівфабрикатів: листи, профілі, штаповані заготовки, труби, фольгу. Використовують для деталей, які працюють при температурі 300-500<sup>0</sup>С (поршневі штоки, лопатки компресорів, лопаті вентиляторів і турбін, конденсатори, обмотки трансформаторів в електротехніці).

*Спечені алюмінієві сплави (САС)* виготовляють в основному за тією ж технологією, що і САП, – з порошків, отриманих розпилюванням сплавів заданих складів. Механічні властивості САС –  $\sigma_B = 260 \text{ МПа}$ ,  $HB = 120$ ,  $\delta = 1,5 \div 1\%$ . Сплав САС складу: 25 - 30% *Si*, 5 - 7% *Ni*, решта *Al*, замінює важчі сталі при виготовленні деталей приладів.

**Композити на нікелевій основі.** Як матрицю використовують *Ni* і його сплави з *Cr* (20%), із структурою твердих розчинів, зміцнювачі - частинки оксидів торія, гафнію та ін. Методи отримання цих матеріалів складні: змішення порошків *Cr*, і елементів з порошком *Ni*, що містить дисперсний оксид гафнію, потім холодне пресування і гаряча екструзія брикетів.

**Волокнисті композити.** У них зміцнювачами служать волокна або ниткоподібні кристали чистих елементів і тугоплавких з'єднань ( $B, C, Al_2O_3, SiC$  та ін.), а також дріт з металів і сплавів ( $Mo, W, Be$  високоміцної сталі та ін.). Використовують безперервні й дискретні волокна діаметром від долей до сотень мкм.

Як матриці використовують метали:  $Al, Mg, Ti$  жароміцний  $Ni$  і сплави на їх основі, а також неметали – полімери, вуглецеві, керамічні матеріали.

Властивості залежать від схеми армування. Високими є значення межі витривалості, оскільки відбувається гальмування розвитку тріщин м'якою матрицею.

Зв'язок між волокнами і матрицею забезпечується за рахунок взаємодії між ними і утворення дуже тонкого шару (1-2 мкм) інтерметалевих фаз. Якщо ж немає взаємодії, то його забезпечують волокна спеціального покриття. Зв'язок між компонентами на неметалічній основі здійснюється за допомогою адгезії, тобто шляхом молекулярної взаємодії.

**Композити на неметалічній основі.** Переваги – хороша технологічність, низька щільність і в ряді випадків вищі питома міцність і жорсткість, висока корозійна стійкість, хороші теплозахисні й амортизаційні характеристики, антифрикційні й фрикційні властивості.

**Недоліки:** низька міцність зв'язку волокон з матрицею, різка втрата міцності при підвищенні температури вище  $100 - 200^{\circ}C$ , мала електрична провідність, відсутність здатності до зварювання.

Найбільшого поширення набули композиції з полімерною матрицею: епоксидною, фенолформальдегідною і поліамідною. Як зміцнювачі використовують високоміцні й високомодульні, вуглецеві й борні, скляні й органічні волокна у вигляді ниток, джгутів, стрічок, нетканих матеріалів.

Композиції з вуглецевими волокнами називають вуглеволоконітами, з боровими – бороволоконітами, скляними, – скловолоконітами, органічними, – органоволоконітами.

**Композити на металевій основі.** Найбільш перспективними для матриць є метали, що володіють невеликою щільністю ( $Al, Mg, Ti$ ) і сплави на їх основі, а також  $Ni$  – як основний компонент жароміцних сплавів.

**Матеріали з  $Al$  матрицею** – армують сталевим дротом (КАС), борним волокном (ВКА) і вуглецевим волокном (ВКУ). Як матриця технічний  $Al$  (АД1) або сплави ( $AMrG, B95, D20$ ). Зміцнення дорожчими волокнами  $B, C, Al_2O_3$  підвищує вартість, але покращує властивості.

**Матеріали з  $Mg$  матрицею** (ВКМ), мають меншу щільність, ніж з  $Al$ , при приблизно такій же високій міцності  $1000 \div 1200 \text{ МПа}$ .

**Матеріали на  $Ti$  основі** – труднощі при створенні через нагрів до високих температур. Титановий сплав ВТ6 (6%  $Al$ , 4%  $V$ , решта  $Ti$ ), армований волокнами  $Mo, Be, SiC$ .

**Композити на  $Ni$  основі** (ВКН) – робочі температури до  $1000^{\circ}C$ , тому вводять як зміцнювач вольфрамовий дріт 40 - 70%.

Використання композитів у літальних апаратах знизило їх масу до 40%, збільшило корисне навантаження. Застосовують в турбобудуванні (лопатки турбін).

Особливі властивості дозволяють широко використовувати їх як електроізоляційні матеріали (органоволокніти). У машинобудуванні (корпуси і деталі машин), хімічній промисловості (цистерни, ємкості), суднобудуванні (корпуси човнів, гребні гвинти, підшипники).

### **Контрольні питання:**

1. Наведіть приклади термопластичних та термореактивних матеріалів.
2. Поясніть поведінку пластмас при підвищенні температури?
3. Вкажіть, які речовини у виробництві пластмас застосовуються в якості сполучних, наповнювачів, пластифікаторів, барвників?
4. Що додають в пластмаси для підвищення механічних властивостей?
5. Що додають в пластмаси для уповільнення старіння?
6. Що додають в пластмаси для зменшення крихкості?
7. Вкажіть застосування природних і синтетичних смол?
8. Перерахуйте, які деталі виготовляють з шаруватих пластиків?
9. Поясніть, що являють собою еластомери?
10. Вкажіть склад і властивості гум?

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Батышев, А. И. Материаловедение и технология материалов : Учебное пособие / А. И. Батышев, А. А. Смолькин. – М. : ИНФРА-М, 2012. – 288 с.
2. Дриц, М. Е. Технология конструкционных материалов и материаловедение / М. Е. Дриц, М. А. Москалев – М. : Высш. шк., 1990. – 256 с.
3. Богодухов, С. Материаловедение : Учебник / С. Богодухов. – М.: Машиностроение, 2015. – 504 с.
4. Материаловедение / Под ред. проф. Б. Н. Арзамасова. – М. : Машиностроение, 2000. – 384 с.
5. Шубина, Н. Б. Материаловедение / Н. Б. Шубина, О. В. Белянкина. – М. : МГГУ, 2012. – 162 с.

*Навчальне видання*

**СКУРІХІН Владислав Ігорович**  
**БАБІЧЕВА Ольга Федорівна**

## **КОНСТРУКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ**

### **КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ**

*(для студентів 1 курсу всіх форм навчання освітнього рівня «бакалавр» за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка)*

Відповідальний за випуск *В. І. Скуріхін*  
*За авторською редакцією*  
Комп'ютерне верстання *В. І. Скуріхін*

План 2017, поз. 288Л

Підп. до друку 05.02.2018. Формат 60 × 84/16.

Друк на ризографі. Ум. друк. арк. 3,7.

Тираж 50 пр. Зам. № .

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет  
міського господарства імені О. М. Бекетова,  
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002.

Електронна адреса: [rectorat@kname.edu.ua](mailto:rectorat@kname.edu.ua).

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 5328 від 11.04.2017.