

Міністерство освіти і науки України  
Національний університет «Запорізька політехніка»

О.А. Мігяєв  
О.С. Петрашов  
В.М. Повзло

## **КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ**

з дисципліни "Кольорові метали та сплави для порошкових та  
композиційних матеріалів"  
для студентів спеціальності 132 – "Матеріалознавство"  
за спеціалізацією (освітньою програмою)  
"Композиційні та порошкові матеріали, покриття"  
денної форми навчання

2024

Конспект лекцій з дисципліни "Кольорові метали та сплави для порошкових та композиційних матеріалів" для студентів спеціальності 132 – "Матеріалознавство" за спеціалізацією (освітньою програмою) "Композиційні та порошкові матеріали, покриття" денної форми навчання / Укл.: О.А. Мітяєв, О.С. Петрашов, В.М. Повзло. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2024. – с. 95

Укладач: О.А. Мітяєв, професор, д.т.н.  
О.С. Петрашов, ст. викладач  
В.М. Повзло, ст. викладач

Рецензент: І.В. Акімов, доцент, к.т.н.

Відповідальний  
за випуск: Т.В. Кавурко, пров. фах.  
І.М. Сохрякова, зав. лаб.  
О.В. Петрашова, ст. лаб.

Рекомендовано до видання  
НМК ФБАД, протокол №   1    
від "30" серпня 2024 р.

Затверджено на засіданні  
кафедри КМХТ, протокол  
№   1   від "06" серпня 2024 р.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1. Алюміній та його сплави.....	5
1.1. Сплави алюмінію і їх класифікація.....	6
1.2. Ливарні сплави.....	7
1.3. Деформівні сплави, що не зміцнюються термічною обробкою.....	13
1.4. Деформівні алюмінієві сплави, що зміцнюються термічною обробкою.....	17
1.5. Композиційні матеріали на основі алюмінію.....	23
2. Магній і його властивості.....	27
2.1. Властивості магнію (Mg). .....	27
2.2. Взаємодія Mg з легувальними елементами.....	28
2.3. Термічна обробка магнієвих сплавів.....	31
2.4. Класифікація магнієвих сплавів.....	32
2.5. Ливарні магнієві сплави.....	33
2.6. Деформівні магнієві сплави.....	37
2.7. Галузі застосування магнієвих сплавів.....	40
3. Сплави на основі Sn, Pb, Ca, Zn (бабіти).....	43
4. Титан та його сплави.....	52
4.1 Вплив домішок на властивості титану.....	53
4.2. Класифікація титанових сплавів.....	55
4.3. Термічна обробка титанових сплавів.....	57
4.4. Деформівні титанові сплави.....	58
4.5. Технологічні властивості.....	60
4.6. Сплави на основі інтерметалідів титану.....	60
4.7. Ливарні титанові сплави.....	61
4.8. Застосування титану і його сплавів.....	63
4.9. Додаткові відомості.....	65
5. Мідь та її сплави.....	69
Література.....	94

## ВСТУП

Конспект лекцій з дисципліни «Кольорові метали та сплави для порошкових та композиційних матеріалів» для студентів спеціальності 132 – «Матеріалознавство» за освітньо-професійною програмою «Композиційні та порошкові матеріали, покриття» спрямований на забезпечення фахової підготовки спеціалістів, що здатні ефективно виконувати професійну діяльність. Набуті, в процесі вивчення дисципліни, компетентності дозволять розв'язувати складні спеціалізовані та практичні матеріалознавчі задачі, що пов'язані з виробництвом, застосуванням, а також обробкою та випробуванням металевих композиційних і функціональних матеріалів та виробів на основі кольорових металів і сплавів.

Матеріал, що викладено у конспекті лекцій дозволяє розширити знання студентів та інженерно-технічних працівників у напрямку використання наукової методології.

При складанні конспекту лекцій авторський колектив користувався інформацією, що викладено у джерела [1-16].

## 1. АЛЮМІНІЙ ТА ЙОГО СПЛАВИ

Алюміній за поширенням у земній корі займає перше місце серед конструкційних матеріалів. Загальний його вміст оцінюється приблизно у 8,0...8,8 % і найчастіше він зустрічається у різних глинах, бокситах, польових шпатах і ін.

Алюміній (Al) – метал світло-сріблястого кольору, елемент III групи Періодичної системи елементів Д.І. Менделєєва, порядковий номер 13. Найважливіші фізичні властивості алюмінію наведені у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Фізичні властивості алюмінію.

Показники	Значення
Атомна вага	26,9825
Атомний радіус, Å	1,43
Кристалічна ґратка	г.ц.к.
Період ґратки, Å	4,0413
Густина, г/см <sup>3</sup>	2,71
Температура плавлення, °С	660
Температура кипіння, °С	2450
Питома теплоємність, ккал/г·град	при 20 °С
	при 700 °С
Теплопровідність при 25 °С, кал/см·сек·град	0,214
Питомий електроопір при 20 °С, мкОм·см	0,308
	0,503
	2,66

Алюміній характеризується високими значеннями тепло- та електропровідності. Електропровідність алюмінію, залежно від його чистоти, складає приблизно 62,5...65,0 % від електропровідності міді.

Відповідно до ГОСТ 11069-64 залежно від чистоти алюміній класифікують: особливої чистоти А999 (99,999% Al); високої чистоти А995 (99,995% Al); А99 (99,99% Al); А97 (99,97% Al); А95 (99,95% Al) та технічної чистоти А85 (99,85% Al); А8 (99,80% Al); А7, А6, А5, А0 (99,0% Al). Дуже чистий алюміній при кристалізації дає велике зерно з помітно вираженою спрямованістю у структурі. Алюміній – хімічно активний метал. Чим він чистіший, тим вища його

корозійна стійкість. Корозійна стійкість алюмінію пов'язана з тим, що на поверхні, при взаємодії з окислювачем, виникає щільна та стійка плівка  $Al_2O_3$ , яка перешкоджає подальшій взаємодії металу з навколишнім середовищем. Найбільш поширеними домішками алюмінію є залізо, кремній, мідь, цинк, марганець, титан.

Постійні домішки Si та Cu підвищують міцність Al, однак знижують пластичність і корозійну стійкість. Залізо практично не розчиняється в алюмінії, утворює інтерметалідні сполуки  $Al_3Fe$ ,  $Al_2Fe$  та інші, які мають пластинчасту форму і дуже крихкі, що суттєво погіршує механічні і технологічні властивості, а також корозійну стійкість. Кремній не утворює хімічних сполук з Al та практично не розчиняється в ньому (концентрація Si при  $577^\circ C$  – 1,65 %, а при  $300^\circ C$  – 0,09 %). Домішки Mn (0,05 %) викликають аномально велике зерно в листовому Al після відпалення. Алюміній, при певних умовах, добре зварюється різними способами, однак погано оброблюється різанням і має низькі ливарні властивості.

Алюміній особливої чистоти має невисоку міцність  $\sigma_B \approx 20...30$  МПа і високу пластичність  $\delta = 30...50$  %. Механічні властивості відпаленого алюмінію високої чистоти становлять  $\sigma_B \approx 40...50$  МПа,  $\delta \approx 35...50$  %; для алюмінію технічної чистоти  $\sigma_B \approx 70...80$  МПа.

Технічний алюміній випускають у вигляді чушок, прутків, листів, дроту та різного профілю. Використовують алюміній у електротехнічній, машинобудівній, приладобудівній, а також харчовій галузях.

### **1.1.Сплави алюмінію і їх класифікація**

Сплави на основі Al мають високі механічні властивості і малу густину, що дозволяє отримувати значну питому міцність:

$$\sigma_{\text{пит}} = \frac{\sigma_B}{\rho},$$

де  $\sigma_B$  – границя міцності;  
 $\rho$  – густина.

За способом виготовлення виробів алюмінієві сплави поділяють на групи:

1. Ливарні – призначені для отримання фасонних деталей методами лиття.

2. Деформівні – призначені для отримання полуфабрикатів (листів, плит, прутків, профілів, труб і ін.), а також поковок і штамповок методами обробки деталей тиском (прокатки, пресування, кування і штампування). Деформівні сплави, за своєю здатністю зміцнюватися термічною обробкою, поділяються:

- деформівні алюмінієві сплави, що не зміцнюються термообробкою;

- деформівні алюмінієві сплави, що зміцнюються термообробкою.

3. Сплави, що отримують за технологією порошкової металургії:

- спечені алюмінієві порошки (САП);

- спечені алюмінієві сплави (САС).

Найбільше розповсюдження отримали сплави систем: Al-Si, Al-Cu, Al-Mn, Al-Mg, Al-Cu-Mg, Al-Cu-Mg-Si, Al-Mg-Si, а також Al-Zn-Mg-Cu. У рівноважному стані структура цих сплавів являє собою низьколегований твердий розчин і різні інтерметалідні фази ( $Al_2Cu$ ,  $Mg_2Si$ ,  $Al_3Mg_2$ ,  $Al_2CuMg$ ,  $Al_6Mg_4Cu$ ,  $Al_2Mg_3Zn_3$  та ін.).

Границею деформівних і ливарних алюмінієвих сплавів є границя насичення твердого розчину при евтектичній температурі (рис.1.1).

## 1.2. Ливарні сплави

Сплави для виробництва фасонного литва повинні мати: високу рідинноплинність (рідкотекучість); відносно невелику усадку; малу схильність до утворення гарячих тріщин і пористості в поєднанні з високими показниками механічних і експлуатаційних властивостей.

Високі ливарні властивості мають сплави, які містять у структурі евтектику. Наявність евтектики (15...20% об'єму) у структурі забезпечує підвищену рідинноплинність і більш низьку температуру плавлення. Евтектика утворюється в сплавах, у яких вміст легувальних елементів більший за граничну розчинність у алюмінії. Тому вміст легувальних елементів у ливарних сплавах вищий, ніж у деформівних. Найчастіше використовують сплави систем Al-Si, Al-Cu, Al-Mg, які додатково легують незначною кількістю Cu, Mg, Mn, Ni, Cr. Для подрібнення зерна, внаслідок чого покращуються механічні властивості, до сплавів додають

модифікатори (Ti, Zr, B, V і ін.). Для модифікування евтектичної фази використовують речовини, які містять Na, K, Sr, Ba, P та ін.

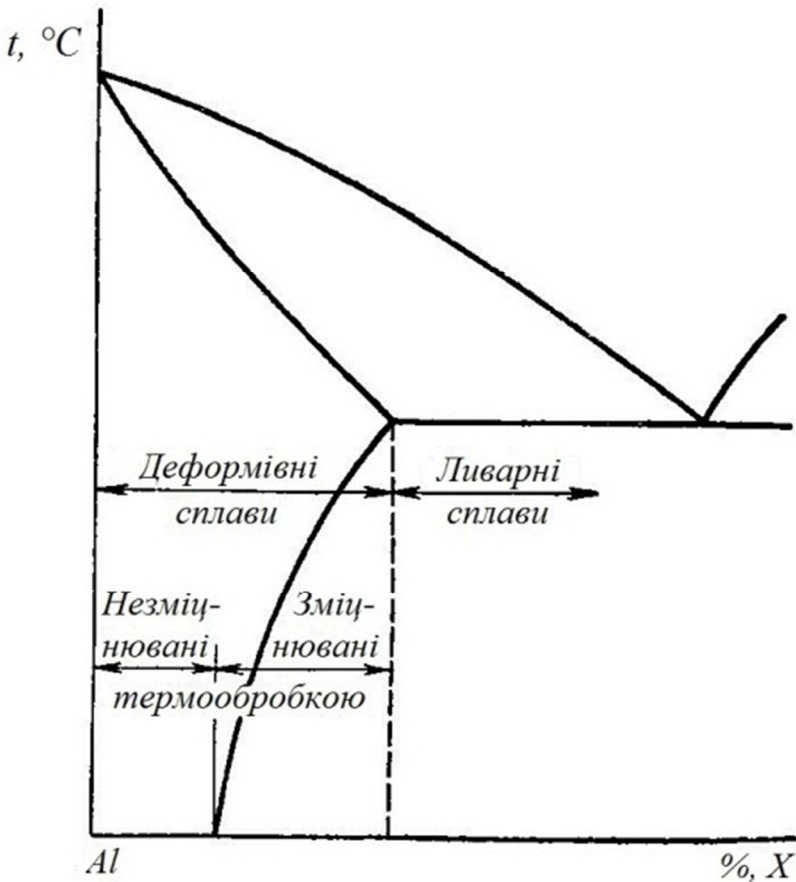


Рисунок 1.1 – Класифікація алюмінієвих сплавів за діаграмою стану системи Al-X (де X – легувальний елемент).

**Маркування.** Ливарні сплави маркують літерами АЛ (алюмінієвий ливарний) та цифрами, що вказують порядковий номер сплаву. Відповідно до ДСТУ 2839-94 (ГОСТ 1583-93) в

конструкторській і технологічній документації ливарні алюмінієві сплави можуть позначатися із зазначенням хімічного складу, наприклад АК12 (ливарний алюмінієвий сплав, що містить близько 12 % кремнію), ця марка відповідає позначенню АЛ2. Марка АК12М2МгН (АЛ25) відповідає ливарному поршневному сплаву системи Al-Si-Cu з вмістом елементів приблизно ~ 12 % Si, ~ 2 % Cu, до ~ 1 % Mg, до ~ 1 % Ni.

Ливарні сплави алюмінію за хімічним складом і комплексом властивостей поділяють на п'ять груп:

1. Сплави на основі систем Al-Si та Al-Si-Mg, які характеризуються добрими ливарними властивостями і високою герметичністю. До них відносяться: АК12 (АЛ2), АК13, АК9, АК9ч (АЛ4), АК9пч (АЛ4-1), АК8 (АЛ34), АК7, АК7ч (АЛ9), АК7пч (АЛ9-1), АК10Су («Су» - сурма). В цих сплавах більш високий вміст кремнію, ніж у сплавах інших чотирьох груп. Вони містять велику кількість евтектики (50...75 %), що обумовлює високі ливарні властивості: дуже добру рідинноплинність (рідкотекучість) і низьку лінійну та об'ємну усадку. Тому при литті складнофазонних великогабаритних деталей вони не виявляють схильності до утворення гарячих тріщин. Сплави першої групи за корозійною стійкістю перевищують сплави другої, третьої та п'ятої груп, але поступаються ним за жароміцністю.

2. Сплави на основі системи Al-Si-Cu-Mg, які характеризуються добрими ливарними властивостями, високими значеннями границь міцності і текучості при кімнатній та підвищених температурах. До них належить: АК5М (АЛ5), АК5Мч (АЛ5-1), АК5М2, АК5М7, АК6Мч, АК8М (АЛ32), АК5М4, АК8М3, АК8М3ч (ВАЛ8), АК9М2, АК12М2, АК12ММгН (АЛ30), АК12М2МгН (АЛ25), АК21М2,5Н2,5 (ВКЖЛС-2). Сплави цієї групи також відрізняються високим вмістом кремнію (за виключенням сплавів АЛ3 і АЛ5), що визначає їх добрі ливарні властивості. До переваги цих сплавів по відношенню до сплавів першої групи, слід віднести кращу оброблюваність різальним інструментом і підвищену жароміцність. Однак їх корозійна стійкість знижується з підвищенням вмісту міді; при цьому жароміцність і міцність при кімнатній температурі підвищуються, а пластичність знижується.

3. Сплави на основі системи Al-Cu і Al-Cu-Mg – високоміцні та жароміцні сплави. До них відносяться: АМ5 (АЛ19), АМ4,5Кд (ВАЛ10, де «Кд» – кадмій), АЛ7, ВАЛ1 (АЛ33).

За зростанням жароміцності сплави можна представити наступним рядом: АЛ7 – ВАЛ10 – АЛ19 – ВАЛ1. Сплави АЛ19 і ВАЛ10 є високоміцними сплавами з підвищеною пластичністю. Однак за корозійною стійкістю сплави цієї групи поступаються усім сплавам інших чотирьох груп.

4. Сплави на основі системи Al-Mg – високоміцні корозійностійкі сплави: АМг4К1,5М, АМг5К (АЛ13), АМг5Мц (АЛ28), АМг6л (АЛ23), АМг6пч (АЛ23-1), АМг10 (АЛ27), АМг10ч (АЛ27-1), АМг11 (АЛ22), АМг7 (АЛ29). Серед цих сплавів найбільшу міцність має сплав АЛ27-1, а найкращі ливарні властивості – сплав АЛ22.

Всі сплави цієї групи мають високу корозійну стійкість у морському середовищі, а також у тропічних умовах з максимальною вологістю. До переваг цих сплавів слід віднести добру оброблюваність різальним інструментом. При поліруванні виливок із сплавів АЛ8 і АЛ27-1 можна отримувати дзеркальну поверхню з високою відбивною здатністю.

До недоліків цих сплавів слід віднести низьку жароміцність: за жароміцністю вони займають останнє місце із усіх стандартних алюмінієвих сплавів.

5. Сплави на основі системи Al- інші елементи: АЦ4Мг (АЛ24), АК7Ц9 (АЛ11), АК9Ц6 (де «Ц» – цинк).

Найбільш поширеною групою ливарних алюмінієвих сплавів є подвійні силуміни (система Al-Si), а також силуміни леговані Mg, Cu, Mn, Ni. Діаграму стану сплавів системи Al-Si наведено на рисунку 1.2.

Відповідно до діаграми стану розрізняють: доєвтектичні силуміни (АЛ4, АЛ9, АЛ5), структура яких складається з ( $\alpha$ -твердого розчину + евтектика ( $\alpha + Si$ )); евтектичні сплави (АЛ2), структура яких представлена ( $\alpha + Si$ ); заєвтектичні сплави (АК21М2,5Н2,5 (ВКЖЛС-2)), структура яких являє собою (евтектику ( $\alpha + Si$ ) + Si перв.). Чисто подвійні силуміни не зміцнюються термообробкою. Леговані силуміни піддають зміцненню за рахунок проведення (гартування + старіння). При такому термічному обробленні зміцнення забезпечується виділенням значної кількості частинок інтерметалідних фаз ( $Mg_2Si$ ,  $Al_2Cu$ ,  $W(Al_xMg_5Cu_4Si_4)$ ), склад,

а також морфологічні, топографічні і стехіометричні показники яких залежать від схеми легування і технології оброблення розплавів.

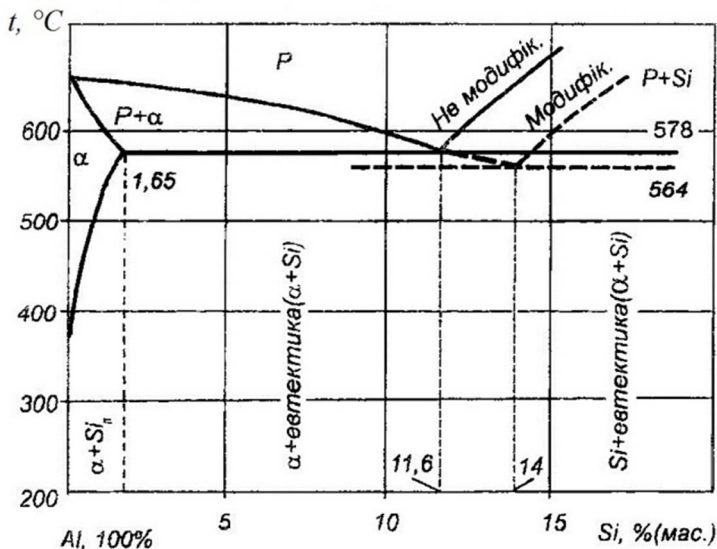
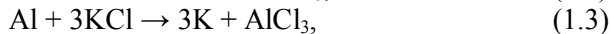
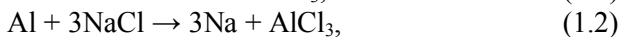
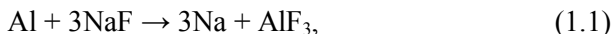


Рисунок 1.2 – Діаграма стану системи Al-Si (штрихові лінії – для сплавів після модифікування Na).

Для покращення структури силумінів, підвищення механічних і технологічних властивостей їх перед розливанням піддають модифікувальній обробці або модифікуванню. Цей процес передбачає введення до сплавів лужних металів (Li, Na, K) з метою впливу на форму та розміри структурних складових (рис.1.3).

Найчастіше застосовують модифікування натром, який вводять до розплаву у вигляді суміші солей (наприклад,  $2/3 NaF + 1/3 NaCl$  або  $25\% NaF + 62,5\% NaCl + 12,5\% KCl$ ). Помітне поліпшення структури забезпечується при вмісті натру в сплаві 0,01 %.

При модифікуванні відбуваються наступні реакції:



у результаті чого лужні метали, що виділяються, вступають у взаємодію зі сплавом. Атоми лужних металів адсорбуються поверхнею часток кремнію, в поверхневих шарах утворюється плівка ( $\text{Na}_2\text{Si}$ ,  $\text{K}_2\text{Si}$ ,  $\text{Li}_2\text{Si}$ ), що перешкоджає подальшому зростанню кристалів кремнію, тобто спостерігається подрібнення евтектики. При модифікуванні евтектична концентрація зсувається у бік більшого вмісту кремнію (14 %), таким чином сплави евтектичного та деякі заевтектичного складу становляться за структурою доевтектичними (див. рис.1.2). Атоми натру адсорбуються поверхнею частинок кремнію, на поверхні утворюється плівка  $\text{Na}_2\text{Si}$ , яка перешкоджає подальшому зростанню кристалів кремнію, що спричиняє суттєве подрібнення (див. рис.1.3).

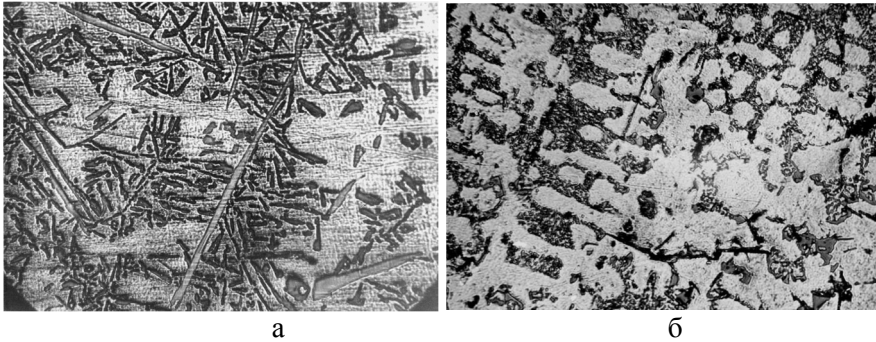


Рисунок 1.3 – Мікроструктура сплаву АК9М2 до (а) та після (б) модифікування, х 200.

Механічні властивості та мікроструктура усіх ливарних алюмінієвих сплавів визначаються способом лиття і термічною обробкою. Метою термічної обробки деталі із ливарних алюмінієвих сплавів є отримання визначених властивостей за рахунок впливу відповідних температур, часу витримки при цій температурі, а також швидкості охолодження. Залежно від характеру виливки та умов її експлуатації застосовують наступні види термічного оброблення.

**1. Штучне старіння** (умовне позначення режиму – Т1), найчастіше проводиться при  $175 \pm 5^\circ\text{C}$  впродовж 5...20 годин, без попереднього гартування. Старіння підвищує міцність та покращує

здатність оброблятися різанням, а також чистоту оброблюваної поверхні.

**2. Відпал (T2)** проводять при  $\sim 300^{\circ}\text{C}$  впродовж 5...10 годин, залежно від призначення виливки. Охолодження при відпалі проводять на повітрі. Відпал застосовують для зняття ливарних напружень, а також залишкових напружень, які викликані механічним обробленням (наклеп). Також відпал частково підвищує пластичність.

**3. Гартування і природне старіння (T3, T4).** Температура гартування  $510...520^{\circ}\text{C}$  для сплавів АЛ1, АЛ7 і  $535...545^{\circ}\text{C}$  для сплавів АЛ4, АЛ9, АЛ19... Гартування проводять у гарячій воді ( $40...100^{\circ}\text{C}$ ). Після гартування виливки досить тривалий час витримують при кімнатній температурі. Застосовують для підвищення характеристик міцності.

**4. Гартування і неповне штучне старіння (T5).** Температура гартування  $525\pm 10^{\circ}\text{C}$ , витримка впродовж 8...12 годин, охолодження у воді при  $20^{\circ}\text{C}$ ; старіння при  $160...175^{\circ}\text{C}$  впродовж 2...6 год. При даній температурі та тривалості процес старіння повністю не закінчується. Тому після такої обробки виливки мають високу міцність при збереженні підвищеної пластичності.

**5. Гартування і повне штучне старіння (T6).** Найчастіше проводять за режимами: нагрівання під гартування  $525\pm 10^{\circ}\text{C}$ , витримка 8...12 годин, охолодження у воді при  $20^{\circ}\text{C}$ ; старіння при  $200^{\circ}\text{C}$  впродовж 6...12 годин. Старіння при підвищеній температурі та більш тривалій витримці, у порівнянні за режимом T5, надає сплавам найбільшу міцність, однак пластичність знижується.

**6. Гартування та стабілізувальне старіння (T7).** Режими гартування аналогічні T5 і T6, однак старіння проводять при температурі  $230^{\circ}\text{C}$  (для сплавів АЛ9, АЛ1) і при  $250^{\circ}\text{C}$  (для сплаву АЛ19) впродовж 3...10 годин. Цей вид оброблення застосовують для стабілізації структури і об'ємних змін виливків, при збереженні достатньої міцності.

**7. Гартування і пом'якшувальне старіння (T8).** Режими гартування аналогічні T5 і T6. Старіння проводять при  $240...260^{\circ}\text{C}$  впродовж 3...5 годин. Висока температура старіння знижує міцність, однак підвищує пластичність сплавів і стабільність розмірів виливків.

**1.3. Деформівні сплави, що не зміцнюються термічною обробкою**

До цієї групи відносяться сплави системи Al-Mn і Al-Mg (рис.1.4), які відповідно маркуються АМц і АМг.

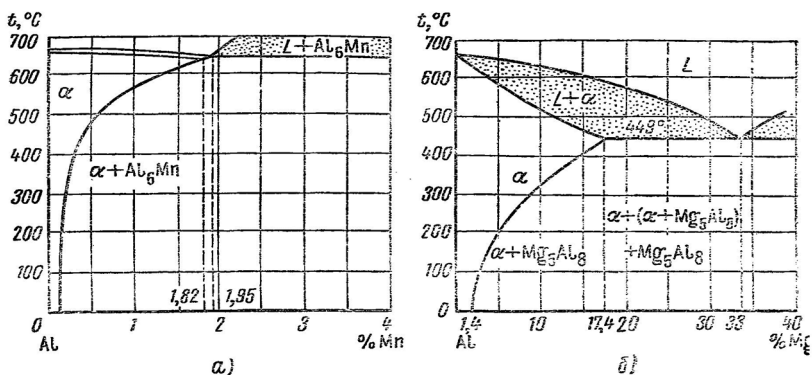


Рисунок 1.4 – Діаграми стану систем Al-Mn (а) і Al-Mg (б).

Зміцнення сплавів досягається за рахунок утворення твердого розчину та наявності незначної кількості надлишкових фаз. Сплави АМц являють собою твердий розчин марганцю в алюмінії, в якому також присутні в невеликій кількості часточки з'єднання  $Al_6Mn$  (див. рис. 1.4а).

Промислові сплави АМц містять від 1,0 до 1,6% Mn, характеризуються високою пластичністю, технологічністю, добре зварюються і є корозійностійкими. Ці сплави застосовують для виробів, що виготовлені штампуванням, від яких вимагається хороша корозійна стійкість і зварюваність (листовий прокат і штамповані вироби з нього; труби). У процесі оброблення ці сплави можуть нагартуватись, що сприяє підвищенню їх міцності і твердості, але знижує пластичність. У зв'язку з цим термічна обробка цих сплавів – рекристалізаційне відпалення ( $450..470^\circ C$ ). Недоліком сплавів є схильність до аномального росту зерна під час відпалення, причина виникнення дефекту – неоднорідність структури, пов'язана з низькою дифузійною рухомістю марганцю в алюмінії. Рекристалізація починається утворенням невеликої кількості центрів, де зерно встигає значно зрости до початку рекристалізації в інших об'ємах. Напівфабрикати з АМц випускають у м'якому або відпаленому (АМцМ) та напівнагартваному (АМцП) станах (табл.1.2).

Таблиця 1.2 – Теплові механічні властивості листів із сплаву АМц

Сплав	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	НВ, МПа
АМцМ	130	50	23	300
АМцП	170	130	10	400

1. Сплави системи Al-Mg відповідно до діаграми стану (див. рис.4б) та концентрації магнію, можуть його містити як у твердому розчині ( $\alpha$ -фаза) так і у вигляді сполуки  $Al_3Mg_2$  ( $\beta$ -фаза). При температурі  $449^\circ C$  із рідини з вмістом 33 % Mg кристалізується евтектика ( $\alpha + Al_3Mg_2$ ). При швидкому охолодженні під час кристалізації існує можливість появи евтектичної  $\beta$ -фази в структурі сплавів, що містять понад 1,4 % Mg. Після гомогенізації  $\beta$ -фаза зникає. При повільному охолодженні через високу стійкість твердого розчину сплави найчастіше не містять надлишкових фаз і складаються тільки з  $\alpha$ -твердого розчину.

Зі збільшенням вмісту магнію, приблизно до 15 %, значно зростає міцність (рис.1.5). Пластичність при вмісті магнію від 3 до 12 % Mg майже не змінюється, а потім різко знижується (див. рис.1.5). Корозійна стійкість погіршується при вмісті магнію понад 6 %.

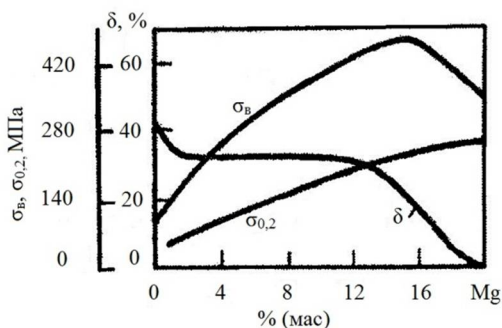


Рисунок 1.5 – Вплив магнію на механічні властивості сплавів системи Al-Mg.

Легування хромом, титаном, ванадієм сприяє рівномірному виділенню  $\beta$ -фази і поліпшує корозійну стійкість сплавів. Титан забезпечує покращення технологічних властивостей при зварюванні.

Сплави Al-Mg додатково легують марганцем, що сприяє утворенню дисперсних частинок  $Al_6Mn$ , які зміцнюють сплав і забезпечують подрібнення зерна. Подібний вплив оказує і легування хромом.

Сплави системи Al-Mg характеризуються поєднанням достатньої міцності, високої пластичності, корозійної стійкості, зварюваності та вібростійкості. Ефект від гартування і старіння незначний, тому їх застосовують у відпаленому стані або після наклепу (нагартовування). Напівфабрикати можуть бути «м'якими» (AMg5M), напівгартованими (AMg5П) та нагартованими (AMg5H, ступінь деформації – 20...30 %). Маркування, хімічний склад та механічні властивості промислових сплавів системи Al-Mg наведено у таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Характерні показники сплавів Al-Mg

Сплав	Вміст компонента, % мас.		Вид обробки	Механічні властивості				
	Mg	Mn		$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	НВ, МПа	$\sigma_{-1}$ , МПа
AMg2M	1,8...2,8	0,2...0,6	Відпал	200	100	23	450	110
AMg2П			Неповний відпал	250	200	10	600	135
AMg3M	3,2...3,8	0,3...0,6	Відпал	220	110	20	500	-
AMg5M	4,8...5,8	0,3...0,6	Відпал	300	150	20	650	-
AMg6M	5,8...6,8	0,5...0,8	Відпал	350	170	20	700	130
AMg6П			Зміцнений на 20 %	390	300	10	-	-
AMgH			Зміцнений на 30 %	430	350	8	-	-

Сплави легко оброблюються тиском (штампування, пресування, гнуття та ін.), добре зварюються та мають високу корозійну стійкість. Зміцнення, що утворюється в процесі нагартовування, знімається у зоні зварювання. Оброблення різанням у відпаленому стані викликає труднощі.

Застосовуються сплави для зварних і клепаних елементів конструкцій, які витримують відносно невеликі навантаження але потребують високого опору корозії. Так сплави AMц, AMg2, AMg3

знайшли застосування при виготовленні ємностей для рідин (баки для бензину), трубопроводів, палубних надбудов морських і річкових суден, у будівництві (вітражі, двері, вікна та ін.). Для середньо навантажених деталей і конструкцій використовують сплави АМг5 і АМг6 (рами і кузова вагонів, підвісні навантажені стелі, переборки суден, електромачти, ліфти, вузли кранів, корпуси суден та ін.).

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

Деформівні сплави поділяють на групи:

1. Сплави високої міцності – дуралюміни і сплави типу В95 (випускають у вигляді прокату – листи, труби, фасонні профілі).
2. Ковочні алюмінієві сплави, призначені для виготовлення деталей куванням і штампуванням.
3. Сплави типу авіаль (система Al-Mg-Si).
4. Жароміцні алюмінієві сплави, призначені для роботи в умовах підвищених температур.

Хімічний склад і механічні властивості промислових сплавів наведено у таблиці 1.4.

**Дуралюміни** – сплави системи Al-Cu-Mg, до складу яких додатково додають Mn з метою підвищення корозійної стійкості. Постійними домішками у цих сплавах є Si та Fe. Залізо утворює у сплавах з'єднання  $Al_6(Mn, Fe)$ , яке має вигляд пластин, що спричиняє зниження міцності та пластичності дуралюмінів. Крім того, залізо утворює інтерметалід  $Al_7Cu_2Fe$ , який не розчиняється в алюмінії, зв'язує мідь у цьому з'єднанні, чим знижує ефект зміцнення при старінні. Чим більше заліза в сплаві, тим менше утворюється розчинного з'єднання  $Al_2Cu$ , від наявності якого залежить зміцнення при термічному обробленні. Тому вміст заліза повинен бути мінімальним.

Кремній утворює фази  $Mg_2Si$  та  $W(Al_xMg_5Cu_5Si_4)$ , що зменшує кількість основних зміцнювальних фаз  $S(Al_2CuMg)$  і  $\Theta(Al_2Cu)$  та призводить до зниження міцності.

Таблиця 1.4 – Хімічний склад (%) і типові механічні властивості деформівних алюмінієвих сплавів після гартування і старіння

Сплав	Cu	Mg	Mn	Si	Інші	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_b$	$\delta$
-------	----	----	----	----	------	----------------	------------	----------

					елементи	МПа	%	
Дуралюміні								
Д1	3,8...4,8	0,4...0,8	0,4...0,8	0,7	-	250	410	15
Д16	3,8...4,9	1,2...1,8	0,3...0,9	0,5	-	380	520	11
Сплав авіаль								
АВ	0,1...0,5	0,45...0,9	0,15...0,35 (або Cr)	0,5...1,2	-	120	220	22
Високоміцні алюмінієві сплави								
В95	1,4...2,0	1,8...2,8	0,2...0,6	0,5	5...7 Zr; 0,1...0,25 Cr	530... 550	560... 600	8
В96	2,2...2,8	2,5...3,2	0,2...0,5	-	7,6...8,6 Zn; 0,1...0,25 Cr	630	670	7
Кувальні алюмінієві сплави								
АК6	1,8...2,6	0,4...0,8	0,4...0,8	0,7...1,2	-	300	420	13
АК8	3,9...4,8	0,4...1,0	0,4...1,0	0,6...1,2	-	380	480	10
Жароміцні алюмінієві сплави								
АК4-1	1,9...2,5	1,4...1,8	-	0,35	0,8...1,3 Fe; 0,8...1,3 Ni; 0,02...0,1 Ti	280	430	13
Д20	6...7	-	0,4...0,8	0,3	0,1...0,2 Ti	250	400	12

ПРИМІТКА. Буква Д означає сплав типу дуралюмін, А на початку марки (АД) АД1 – технічний алюміній; АК – алюмінієвий кувальний сплав. Нерідко на початку марки ставиться буква В – високоміцний. Після умовного номера слідує позначення, що характеризує стан сплаву. Буква М – м'який (відпалений); Т – термічно оброблений (гартування і природне старіння); Н – нагартований; П – полунагартований і т.д. Наприклад Д16М – дуралюмін відпалений, Д16ТН – дуралюмін загартований, природно зостарений і додатково нагартований.

Залежно від вмісту Cu і Mg дуралюміні умовно розділяють на три групи: низьколеговані (Д18, В65), середньолеговані (Д1, Д16) і високолеговані (ВД17, Д19, Д21).

Зміцнювальна термічна обробка сплавів базується на змінній розчинності міді в алюмінії зі зниженням температури. Гартування передбачає нагрівання сплавів в однофазну  $\alpha$ -область (рис.1.6), витримку при цій температурі та прискорене охолодження з метою фіксації пересиченого міддю твердого розчину.

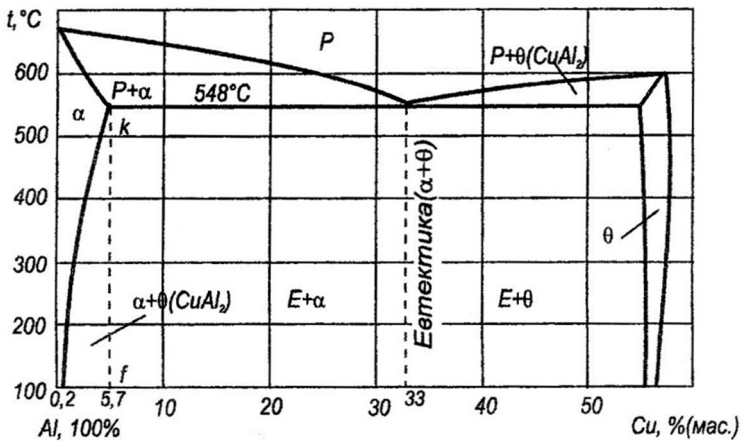


Рисунок 1.6 – Діаграма стану системи Al-Cu.

Після цієї операції пластичність сплавів зростає, міцність, порівняно з відпаленим станом, збільшується. Такий стан є нестабільним, із часом проходить виділення надлишку міді у вигляді дисперсних фаз (або зон). В  $\alpha$ -твердому розчині лишається 0,2% Cu. Таке явище має назву – **старіння**. Процес супроводжується зростанням міцності.

Явище старіння дуралюмініу було відкрито в 1906 році німецьким металургом Вільмом. **Старіння** – дисперсійне зміцнення, пов'язане із виділенням дрібнодисперсних твердих фаз. Розрізняють **природне старіння** (процес відбувається при кімнатній температурі, тривалість процесу залежить від легування, для класичного дуралюмініу Д1 – 4...5 діб) та **штучне** (процес проходить при підвищеній температурі (250...300°C), тривалість процесу скорочується до кількох годин).

При природному старінні максимальне зміцнення спостерігається після різної тривалості процесу. Чим більше співвідношення Mg/Cu тим повільніше відбувається старіння (Д1, Д16 – 4 доби, Д19 – 5 діб, ВАД – 10 діб).

Особливістю обробки дуралюмінів є необхідність забезпечення високої точності температури при гартуванні, наприклад,  $\Delta t \pm 5^\circ\text{C}$ . Це

пов'язано із наближенням температури гартування до температури плавлення евтектики. Перегрів призводить до плавлення евтектики на межах зерен, що супроводжується окисненням металу, такий дефект є не виправним.

Температура рекристалізації деяких алюмінієвих сплавів, для яких застосовують гарячу деформацію за певними режимами, перевищує температуру нагрівання під гартування. За таких умов, гарячедеформований напівфабрикат після остаточної термообробки зберігає полігонізовану структуру, що зумовлює підвищення міцності у порівнянні зі сплавом після рекристалізації. Підвищення міцності внаслідок збереження після термічної обробки нерекристалізованої структури найбільш характерно для пресованих напівфабрикатів, це явище отримало назву *пресефект* (структурне зміцнення). Структурне зміцнення напівфабрикатів залежить від кількох факторів: складу сплавів, режимів гомогенізації зливок перед обробкою тиском, температури та ступеня деформації, швидкості деформування при гарячій деформації, режимів остаточної термообробки.

Дуралюміни знайшли широке застосування в авіабудуванні через високу питому міцність. Зі сплаву Д16 виготовляють деталі і елементи конструкцій середньої та підвищеної міцності, які потребують довговічності при змінних навантаженнях (наприклад, обшивка, силові каркаси, шпангоути, стрингери і лонжерони летальних апаратів; будівельні конструкції, кузова автомобілів та ін.).

З метою збільшення корозійної стійкості дуралюмінів застосовують плакування технічним алюмінієм (99,5 %), при цьому зливок покривають планшетами технічного алюмінію, в процесі подальшого деформування товщина покриття складає до 4 % від товщини листа. В композиції «Al – дуралюмін», дуралюмін є катодом і не кородує. *Недоліком* плакованих листів є низький опір втомі. Інший спосіб збільшення корозійної стійкості – електрохімічне оксидування (анодування). Спосіб передбачає витримку напівфабрикатів в сірчаній кислоті, на поверхні виробів при цьому утворюється щільна плівка  $Al_2O_3$ , що має товщину більшу за звичайну.

*Сплави системи Al-Mg-Si (авіалі).* Ці сплави поступаються дуралюмінам за міцністю, але мають кращу пластичність у холодному і гарячому станах, добре зварюються та опираються корозії. Авіалі відрізняються високою границею витривалості. Сумарний вміст

легувальних елементів в авіалях знаходиться на рівні 1...2 %. Крім основних легувальних елементів до складу авіалей додатково можуть входити мідь, марганець і хром. Основною зміцнювальною фазою в авіалях є інтерметалід  $Mg_2Si$ . Маркують авіалі: АВ, АД31, АД33, АД35.

Термічна обробка авіалей складається з гартування від температури 515...525°C з охолодженням у воді та природного (маркування АВТ) або штучного (АВТ1) старіння при температурі 160...170°C впродовж 12..15 годин. Штучне старіння слід виконувати одразу після гартування тому, що при збільшенні перерви між часом гартування і початком штучного старіння, міцність сплавів після старіння зменшується. Найбільша міцність відповідає природному старінню (тривалість процесу – два тижні). Структура після термічної обробки ( $\alpha$ -твердий розчин +  $Mg_2Si$ ).

Зі сплавів АВ, АД31, АД33 і АД35 виготовляють листи, труби, прутки, профілі та інші полуфабрикати, які використовують для лопатей гвинтокрилів, рам і кузовів, зварних ємностей, корпусів електродвигунів, трубопроводів, корпусів човнів і суден. Сплав АД31 добре полірується, а після анодування є відмінним декоративним матеріалом (корпуса годинників, елементи оздоблення автомобілів).

Сплави для кування та штампування називаються ковочними. Вони по суті є покращеними сплавами типу авіалей і відрізняються від них більш високим вмістом  $Cu$  і  $Mn$ . Ковочні сплави відповідають системі  $Al-Mg-Si-Cu$ . Додавання  $Cu$  дозволяє підвищити границю міцності та особливо границю текучості сплавів при збереженні достатньо доброї пластичності. Підвищення вмісту  $Mn$  забезпечує подрібнення зерен при рекристалізації.

Маркують сплави АК6, АК6-1, АК8 (у даному випадку літера «К» вказує, що сплав призначений для кування). Процеси кування і штампування проводять при 450...475°C. Сплави зміцнюють гартуванням і старінням. Гартування проводять для сплаву АК6 з 515...525°C, а для АК8 з 495...505°C з охолодженням у воді. Найбільший рівень міцності забезпечується при штучному старінні (160...170°C впродовж 12...15 годин). Структура після термообробки  $\alpha + \Theta(Al_2Cu) + W(Al_xMg_5Cu_5Si_4) + S(Al_2CuMg) + Mg_2Si$ .

Сплав АК6 призначений для виготовлення поковок і штамповок складної конфігурації та середньої міцності, виробництво яких потребує високої пластичності у гарячому стані (рами під двигуни,

крильчатки та ін.). Сплав АК8 рекомендується для відповідальних важконавантажених штампованих деталей (стикові вузли, бандажі вагонів, пояса лонжеронів, лопаті гвинтокрилів та ін.). Сплави піддаються зварюванню. *Недоліком* цих сплавів є низька корозійна стійкість, обов'язковим є захист поверхні деталей.

Високоміцні алюмінієві сплави належать до систем Al-Zn-Mg, Al-Zn-Mg-Cu. Цинк та магній мають найбільшу розчинність в алюмінії при підвищених температурах (70% та 17,4%, відповідно), що різко зменшується при охолодженні. Сплави маркують В93, В95, В96, В96Ц (з цирконієм).

До складу В95 входять наступні елементи: 6% Zn; 2,3% Mg; 1,7% Cu; 1,18% Cr; решта – алюміній. Сплави зміцнюються гартуванням з температури 460...470°C, охолодження проводять у воді, з подальшим штучним старінням при температурі 120...140°C впродовж 16...24 год. Структура сплавів після такої термообробки складатиметься з  $\alpha + \eta(\text{MgZn}_2) + \text{T}(\text{Al}_2\text{Mg}_3\text{Zn}_3) + \text{S}(\text{Al}_2\text{CuMg})$ . Перевага надається штучному старінню, після якого забезпечується найвища міцність (для В95  $\sigma_{\text{в}} = 600$  МПа; для В96  $\sigma_{\text{в}} = 700$  МПа). Для досягнення такої міцності при природному старінні необхідно було б декілька років. Також сплави після природного старіння менш стійкі проти корозії, ніж після штучного старіння.

При збільшенні вмісту Zn і Mg у сплавах їх міцність зростає, а пластичність і корозійна стійкість зменшуються. Додатки Mn і Cr покращують корозійну стійкість. У порівнянні з дуралюмінієм ці сплави мають більшу чутливість до концентраторів напруг і низьку корозійну стійкість під напруженням. У них нижча границя витривалості та опір повторним статичним навантаженням. Профілі зі сплаву В95 значно більш міцні ніж листи. Це результат прес-ефекту, який обумовлений присутністю у сплаві Mn і Cr. Сплави мають добру пластичність у гарячому стані і легко деформуються у холодному стані після відпалу. Листи зі сплаву В95 плакують сплавом алюмінію з 0,9...1,3% Zn для підвищення корозійної стійкості.

Сплав В95 використовують у авіабудуванні для навантажених конструкцій, які працюють тривалий час при температурах до 100...120°C (обшивки, стрингери, шпангоути, лонжерони та ін.). Сплав В96 застосовують у вигляді пресованих або кованих виробів, рекомендується для деталей без концентраторів напруг і тих, які працюють в умовах стиснення. До високоміцних алюмінієвих сплавів

відносяться сплави систем Al-Cu-Mn-Cd-Li (ВАД23) і Al-Zn-Mg (АЦМ1, АЦМ2 і В92).

Жароміцні сплави мають більш складний хімічний склад, ніж сплави розглянуті попереду. Основою цих сплавів є система Al-Cu-Mg, яка додатково легована залізом, нікелем і титаном. Промислові алюмінієві жароміцні сплави маркують: АК2, АК4, АК4-1, Д20, Д21. Наприклад, склад сплаву АК4-1: 2,2% Cu; 1,6% Mg; 1,1% Fe; 1,1% Ni; 0,06% Ti; Al – решта. Сплави зміцнюють гартуванням ( $530 \pm 5^\circ\text{C}$ ) з охолодженням у воді та наступним штучним старінням ( $190\text{...}200^\circ\text{C}$  впродовж 12...24 годин). Фазами-зміцнювачами жароміцних сплавів є  $\Theta(\text{Al}_2\text{Cu})$ ,  $\text{Mg}_2\text{Si}$ ,  $\text{S}(\text{Al}_2\text{CuMg})$ , а також  $\text{Al}_9\text{FeNi}$  та  $\text{Al}_6\text{Cu}_3\text{Ni}$ . При розпаді твердого розчину вони виділяються у вигляді дисперсних часток, що стійкі проти коагуляції, чим забезпечують підвищення жароміцності сплавів.

За рахунок збільшення вмісту Cu, Mn і введення присадок Ti міцність цих сплавів при кімнатній температурі наближається до міцності високолегованих дуралюмінів марок Д6, Д16, ВД17, а при температурах  $250\text{...}300^\circ\text{C}$  значно перевищує. Ці сплави використовують при виготовленні поковок і штампвок деталей з температурою експлуатації до  $300^\circ\text{C}$  (поршні двигунів, головки циліндрів, лопатки і диски компресорів турбореактивних двигунів, обшивка і силовий каркас надзвукових літаків). *Недоліком* матеріалу є низька корозійна стійкість, для захисту листи – плакують, напівфабрикати – анодують.

### 1.5. Композиційні матеріали на основі алюмінію

У дисперсно-зміцнених КМ наповнювачами служать дисперсні частинки тугоплавких фаз – оксидів, нітридів, боридів, карбідів ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ;  $\text{SiO}_2$ ;  $\text{B}_4\text{C}$ ;  $\text{SiC}$  та ін.). Дисперсно-зміцнені композиційні матеріали отримують методами: 1) порошкової металургії; 2) безпосереднього введення наповнювачів в рідкий метал або сплав перед розливанням. В останньому випадку для очищення від жирових і інших забруднень, поліпшення змочуваності частинок рідким металом і рівномірного розподілу їх в матриці застосовують ультразвукову обробку рідкого розплаву.

У дисперсно-зміцнених композиційних матеріалах основне навантаження приймає матриця, а дисперсні частинки зміцнювача чинять опір руху дислокацій при нарузі матеріалу, перешкоджають

розвитку пластичної деформації. Чим більший цей опір, тим вища міцність. Міцність залежить також від структури дислокації, яка формується в процесі пластичної деформації при виготовленні виробів з композиційних матеріалів.

Перевагою дисперсно-зміцнених композиційних матеріалів в порівнянні з волокнистими є ізотропність властивостей. До дисперсно-зміцнених композиційних матеріалів на алюмінієвій основі відноситься матеріал зі спеченої алюмінієвої пудри (САП), на нікелевій основі – композиційні матеріали, зміцнені частинками оксидів торію, ітрію, гафнію.

Матеріал САП характеризується високою міцністю, жароміцністю, корозійною стійкістю і термічною стабільністю властивостей. САП складається з алюмінію і оксиду алюмінію. Одержують САП шляхом послідовного брикетування, спікання і пресування окисленої з поверхні алюмінієвої пудри.

Вихідним матеріалом для отримання пудри служить порошок пульверизат, який виготовляють розпилюванням розплавленого алюмінію А6. Порошок подрібнюють в кульових млинах в атмосфері азоту з додаванням 2...3%  $O_2$  і 0,25...1,2% стеаринової кислоти. Кисень додають для окислення новостворених поверхонь пудри, стеарин – для полегшення ковзання і перешкоди зварювання частинок пудри. Частинки пудри мають форму луски товщиною менше 1 мкм. Розмір луски залежить від тривалості розмелення. Товщина оксидної плівки частинок складає 0,01...0,1 мкм.

Структура САП являє собою алюмінієву основу з рівномірно розподіленими дисперсними включеннями  $Al_2O_3$ . Зі збільшенням вмісту  $Al_2O_3$  підвищуються міцність, твердість, жароміцність САП і зменшується його пластичність (рис.1.7). САП добре деформується в гарячому стані, гірше в холодному, легко обробляється різанням і задовільно зварюється контактним і аргонодуговим зварюванням.

На сьогоднішній день застосовують САП-1, САП-2, САП-3, САП-4 із них виготовляють всі види напівфабрикатів: листи, профілі, штампові заготовки, труби, фольгу. САП використовують для деталей, що працюють при температурах 300...500°C (поршневі штоки, лопатки компресорів, лопаті вентиляторів і турбін авіаційних двигунів). Механічні властивості матеріалу САП представлені в табл. 1.5.

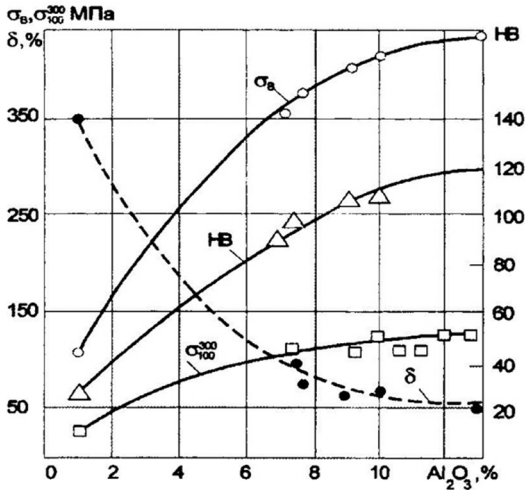


Рисунок 1.7 – Зміна механічних властивостей САП залежно від вмісту Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Таблиця 1.5 – Механічні властивості матеріалу САП

Матеріал	Вміст Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	σ <sub>в</sub> , МПа	δ, %	E, ГПа
САП-1	6...8	300	7	67
САП-2	9...12	350	5	71
САП-3	13...17	400	3	76
САП-4	18...22	450	1,5	80

Із збільшенням об'ємної кількості Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> зростають показники міцності та жароміцності, і зменшуються показники пластичності (див. рис.1.7). Твердість та міцність інтенсивно зростають зі збільшенням частки Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> до 7%, надалі цей процес уповільнюється. Процеси рекристалізації в САП, що містять понад 7...8% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> не відбуваються, що забезпечує високу жароміцність.

**Спечені алюмінієві сплави (САС)** виготовляють за технологією, аналогічною технології виготовлення САП – з порошків, отриманих розпилюванням сплавів із заданим складом, мікрогранули яких містять окрім алюмінію, залізо, нікель, марганець, хром, титан, кобальт, цирконій. Швидке охолодження при кристалізації гранули

фіксує пересичення легувальними елементами, що при подальшій обробці, створює можливості до виділення дисперсних частинок інтерметалідів та зміцнення сплавів.

Сплави САС мають низький температурний коефіцієнт лінійного розширення, близький до коефіцієнта лінійного розширення сталі і високий модуль пружності. Так, САС складу 25...30% Si, 5...7% Ni, Al-решта має  $\alpha = (14,5...15,5) \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ,  $E = 100$  ГПа. Ці сплави замінюють більш важкі при виготовленні окремих деталей приладів. Механічні властивості САС характеризуються достатньо високою міцністю, твердістю ( $\sigma_{\text{в}} = 260$  МПа,  $\text{HV} = 1200$  МПа) і низькою пластичністю ( $\delta = 1,0...1,5\%$ ).

## 2. МАГНІЙ І ЙОГО ВЛАСТИВОСТІ

### 2.1. Властивості магнію (Mg).

Магній є лужноземельним металом світло-сірого кольору, який в 1,83 рази легший за алюміній. Він має малу щільність ( $1,74 \text{ г/см}^3$ ), високу здатність до поглинання удару і вібраційних дій на авіаційні конструкції. Магній і його сплави мають високу питому теплоємність. При однаковій кількості поглиненої теплоти температура поверхні деталей з магнієвих сплавів в два рази нижче ніж у деталей з маловуглецевих сталей і на 15...20% нижче ніж у деталей з алюмінієвих сплавів тієї ж маси.

Температура плавлення магнію складає  $650 \text{ }^\circ\text{C}$ . Магній має гексагональну щільнопаковану (ГЦП) ґратку ( $a = 0,3103 \text{ нм}$ ,  $c = 0,52 \text{ нм}$ ). У земній корі міститься 2,1% Mg. Основним *недоліком* магнію і його сплавів є їх низька корозійна стійкість, схильність до самозаймання на повітрі. Плівка оксиду магнію MgO є крихкою, пористою, має низьку адгезію до металу і не захищає магній від корозії. Вони прискорено кородують в електролітах при контакті з іншими металами, що пов'язано із значним електронегативним зарядом.

Деформація магнію найчастіше проводиться в діапазоні  $350...450 \text{ }^\circ\text{C}$ . Показники міцності магнію вищі ніж алюмінію ( $\sigma_b \approx 180 \text{ МПа}$ ;  $\delta = 5\%$ ;  $\text{НВ} = 300 \text{ МПа}$ ). Магній та його сплави відмінно обробляються різанням. Залежно від вмісту домішок випускають технічний магній трьох марок: МГ90 (99,90% Mg), МГ95 (99,95% Mg), МГ96 (99,96% Mg). Пресовані прутки з чистого магнію мають такі механічні властивості:  $\sigma_b = 200 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_{0,2} = 90 \text{ МПа}$ ,  $\delta = 11,5\%$ ,  $\text{НВ} = 400 \text{ МПа}$ .

Найбільш шкідливими домішками у магнію вважаються домішки заліза, міді та нікелю. Залізо, натрій та калій майже не розчиняються у магнії, не утворюють сполук і виділяються практично у чистому вигляді. Кремній, мідь та нікель утворюють нерозчинні сполуки, що виділяються на межах зерен.

Технічно чистий магній у якості конструкційного матеріалу не використовується через низьку міцність. Більша частина магнію використовується для виготовлення сплавів і при отриманні титану магнієво-термічним способом.



## 2.2. Взаємодія Mg з легувальними елементами.

Основними легувальними елементами магнієвих сплавів є Al (до 10%), Zn (до 6%), Mn (до 2,5%), цирконій (до 1,5%) і рідкоземельні метали (РЗМ).

Магній утворює з алюмінієм, цинком і марганцем діаграми стану обмежених твердих розчинів (рис.2.1).

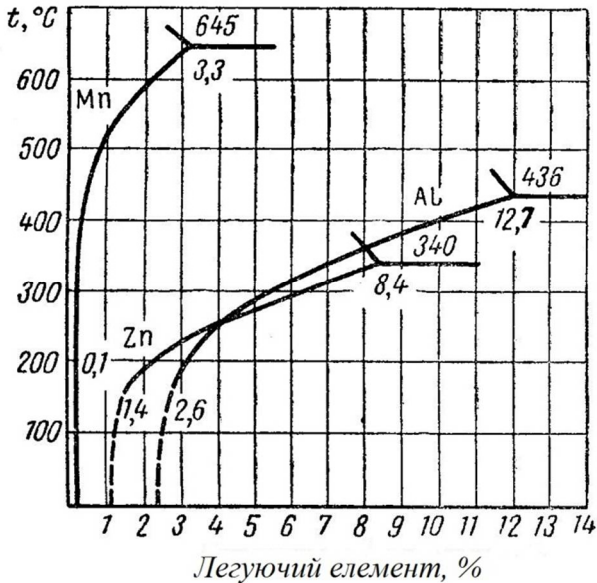


Рисунок 2.1 – Область твердих розчинів в системах Mg-Al, Mg-Zn, Mg-Mn.

Алюміній і цинк утворюють з магнієм тверді розчини і металеві сполуки  $Mg_4Al_3$  і  $MgZn_2$ , які зміцнюють сплави. Алюміній розчиняється в магнії від 1,5% при 20 °С до 12,7% при 436 °С. Розчинність цинку в магнії зростає від сотих часток процента при 20 °С і до 8,4% при 340 °С (див. рис.2.1).

У зв'язку з підвищенням розчинності легувальних елементів при збільшенні температури, сплави зміцнюються при старінні за рахунок виділення з пересиченого твердого розчину на основі магнію зміцнювальних фаз  $\gamma-(Mg,Zn)_4Al_3$  і  $T-Mg_3Zn_3Al_2$ . Цинк підсилює ефект зміцнення сплавів, легованих алюмінієм. Алюміній і цинк до 6...8%

істотно підвищують міцність, покращують пластичність сплавів (рис. 2.2, 2.3). Вищий вміст легувальних елементів знижує механічні властивості магнієвих сплавів.

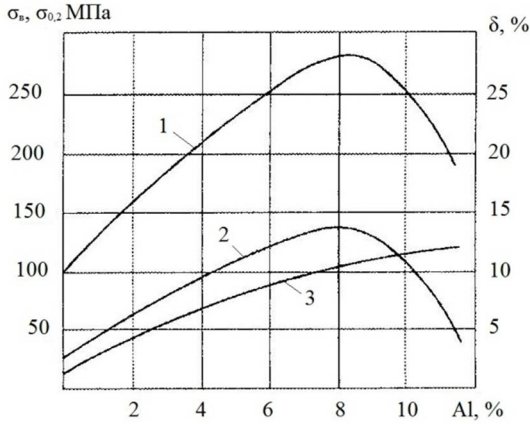


Рисунок 2.2 – Вплив алюмінію на механічні властивості сплавів магній-алюміній: 1 –  $\sigma_b$ ; 2 –  $\delta$ ; 3 –  $\sigma_{0,2}$ .

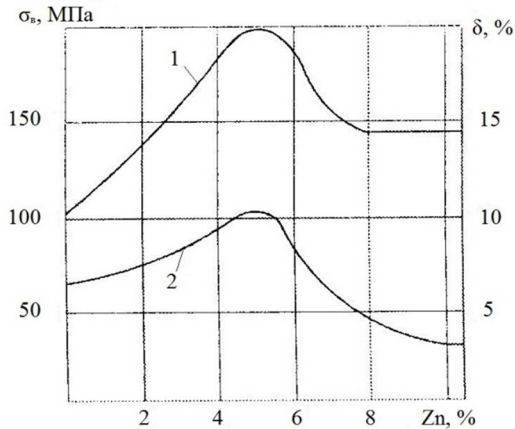


Рисунок 2.3 – Вплив цинку на механічні властивості сплавів магній-цинк: 1 –  $\sigma_b$ ; 2 –  $\delta$ .

Марганець у кількості 0,15...0,5% додається у магнієві сплави для отримання дрібнозернистої структури і підвищення корозійної стійкості. При введенні в розплав марганець утворює із залізом, нікелем і алюмінієм з'єднання вищої щільності, які осідають на дно тигля, очищаючи сплав від шкідливих домішок. Марганець покращує зварюваність магнієвих сплавів, практично не впливає на міцність і знижує пластичність сплавів (рис.2.4).

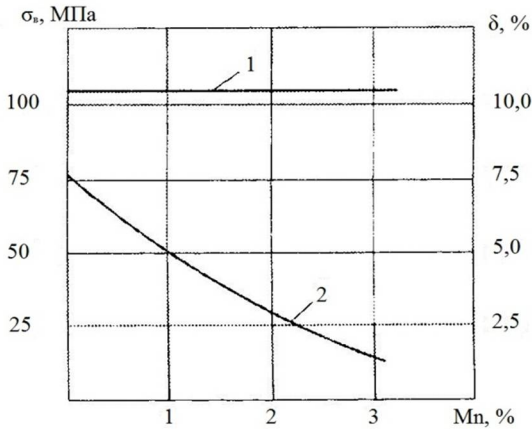


Рисунок 2.4 – Вплив марганцю на механічні властивості сплавів магній-марганець: 1 –  $\sigma_b$ ; 2 –  $\delta$ .

*Цирконій* зазвичай вводиться в магнієві сплави разом з цинком для подрібнення зерна. Забезпечує підвищення міцності, жароміцності і корозійної стійкості.

*Рідкоземельні метали:* церій (до 6%), лантан (до 1,5%), неодим (до 3%) підвищують міцність і жароміцність сплавів, подрібнюють зерно і полегшують тим самим деформацію в холодному стані при прокатці.

*Берилій* в кількості 0,005...0,012% зменшує швидкість окислення магнію при плавці, литті і термічній обробці. Будучи поверхнево-активною речовиною, берилій утворює захисну плівку на поверхні розплавленого металу, яка захищає магній від окислення.

*Нікель, мідь, залізо* є шкідливими домішками, які погіршують корозійну стійкість магнієвих сплавів. Магнієві сплави мають гірші

ливарні властивості, ніж алюмінієві сплави. Це пов'язано з наявністю широкого інтервалу кристалізації і відсутністю евтектики в магнієвих сплавах. Вони мають більшу усадку, нижчу теплопровідність, меншу рідкотекучість і підвищену схильність до утворення гарячих тріщин; у відливках виходить висока розподілена пористість. Сполуки  $MgZn$ ,  $Mg_{17}Al_{12}$  підвищують міцність сплавів. Кремній, алюміній та цинк – зміцнюють твердий розчин. За впливом на пластичність елементи поділяють на дві групи:

- елементи, що зменшують пластичність (Mn, Si);
- елементи, котрі, до певних концентрацій, підвищують пластичність (Li, Zn, Al, Ce).

Магнієві сплави не рекомендують до використання без спеціальної обробки поверхні, яка визначається умовами експлуатації, в морській воді; в агресивних середовищах, що містять кислоти; в місцях скупчення конденсату; для деталей, розташованих в місцях, недоступних при оглядах, а також схильних до ерозійного руйнування захисного покриття в процесі експлуатації.

Магнієві сплави мають практично таку ж, як і алюмінієві сплави, питому міцність, але мають низький модуль нормальної пружності (43000 МПа). При кімнатній температурі механічні властивості магнієвих сплавів нижчі, ніж алюмінієвих, але, при температурі 250...300 °С міцність магнієвих сплавів така ж, як і алюмінієвих. При забезпеченні необхідного захисту від корозії, магнієві сплави надійно працюють у всіх кліматичних умовах у контакті з гасом, бензином, мінеральними маслами, в лужних та інших неагресивних по відношенню до магнію середовищах.

### **2.3. Термічна обробка магнієвих сплавів**

Термічна обробка магнієвих сплавів подібна до алюмінієвих сплавів (дифузійний відпал, гартування, старіння). В литому стані для сплавів характерна ліквіація, що зменшує технологічність. Отже, виникає необхідність проведення *гомогенізації*.

Гомогенізацію злитків і фасонних виливків звичайно проводять при температурах 400...490 °С протягом 10...24 годин. При цьому досягається вирівнювання складу по об'єму виливків, розчинення надмірних фаз, які виділилися по межах зерен, що полегшує обробку тиском і підвищує механічні властивості сплавів.

Для усунення наклепу і зменшення анізотропії механічних властивостей магнієві сплави піддають відпалу рекристалізацією при температурах 250...350 °С.

Багато магнієвих сплавів зміцнюються шляхом проведення гартування і старіння. Особливістю магнієвих сплавів є мала швидкість протікання дифузійних процесів. Тому в магнієвих сплавах уповільнено відбуваються фазові перетворення, і для забезпечення необхідної повноти перетворень потрібні порівняно великі витримки, як при нагріванні під гартування (від 4 до 24 годин), так і при штучному старінні (від 15 до 20 годин). У зв'язку з цією особливістю багато сплавів піддають гартуванню безпосередньо після обробки тиском на повітрі.

Слід зазначити, що штучне старіння дозволяє підвищити міцність магнієвих сплавів тільки на 20...35%. При цьому спостерігається зменшення пластичності сплавів. Зміцнювальні фази мають високу крихкість. Особливо крихкою є  $\gamma$ -фаза, зокрема в сплаві МЛ5, що містить велику кількість алюмінію. Тому такі сплави, як МЛ5, найчастіше не піддають гартуванню, а охолоджують після гомогенізації на повітрі.

Для різних видів термічної обробки застосовують наступні позначення, які зазначають після марки сплаву:

М – м'який, відпалений після деформації;

Н – напівнагартований (низькотемпературний відпал після деформації);

T1 – штучно зостарений після деформації або лиття;

T2 – відпалений після лиття;

T4 – загартований після деформації або лиття;

T6 – загартований на повітрі і штучно зостарений;

T61 – загартований у воді і штучно зостарений;

T8 – загартований з подальшим нагартуванням і штучно зостарений.

#### **2.4. Класифікація магнієвих сплавів**

Залежно від технології виробництва заготовок магнієві сплави поділяють на ливарні і ті, що деформуються. Відповідно до цього магнієві сплави маркуються буквами «МЛ» і «МА».

За механічними властивостями магнієві сплави підрозділяють на 4 групи.

1. Сплави середньої міцності: ливарний (МЛ7-1); що деформуються (МА1, МА2, МА8, МА20).

2. Сплави високої міцності: ливарні (МЛ4, МЛ5, МЛ8, МЛ15 і ін.); що деформуються (МА5, МА14, МА15, МА19).

3. Жароміцні сплави: ливарні (МЛ9, МЛ10, МЛ11); що деформуються (МА11, МА12).

4. Сплави зниженої міцності (МА18).

За корозійною стійкістю в усіх кліматичних атмосферних умовах магнієві сплави поділяють на 3 групи.

1. Сплави, що мають підвищену корозійну стійкість: ливарні (МЛ4 пч, МЛ5 пч, ВМЛ9); що деформуються (МА1, МА8).

2. Сплави задовільної корозійної стійкості: ливарні (МЛ4, МЛ5, МЛ8, МЛ9, МЛ10, МЛ12); що деформуються (МА2, МА5, МА12, МА15, МА20).

3. Сплави з пониженою корозійною стійкістю (ВМЛ6, МА11, МА18).

За граничними робочими температурами сплави розділяють на 4 групи.

1. Сплави для тривалої роботи конструкцій при температурах до 150 °С (МА1, МА2, МА5, МА15, МА9, МА20, МЛ4, МЛ5, МЛ6, МЛ8).

2. Сплави, що тривало працюють при температурах до 200 °С (МА8, МЛ7-1, МЛ12, МЛ15).

3. Сплави для тривалої роботи при температурах до 300 °С (МА11, МА12, МЛ9, МЛ10, МЛ11).

4. Сплави призначені для роботи при криогенних температурах.

## **2.5. Ливарні магнієві сплави**

Для виготовлення корпусних деталей літаків, двигунів, посадочних пристроїв, агрегатів, приладів широко використовуються ливарні магнієві сплави. В порівнянні з алюмінієвими ливарними сплавами магнієві сплави володіють практично такими ж міцнісними властивостями і відрізняються меншою щільністю, доброю оброблюваністю різанням.

Для запобігання окисленню і займанню розплавленого магнію в розплав при литті вводять спеціальні захисні флюси, що містять 40%  $MgCl_2$ , 40%  $KCl$ , 7%  $BaCl_2$ , 5%  $CaF_2$  у вигляді порошкової суміші. До складу формових і стержньових сумішей вводять захисні

присадки, наприклад, фториди алюмінію. Для компенсації втрат легувальних елементів при литті сплави підшихтовують відповідними лігатурами.

Ливарні магнієві сплави мають хороші технологічні властивості. Виливки деталей одержують методами лиття в земляні або піщані, гіпсові і оболонкові форми, в кокіль шляхом лиття під тиском або за моделями, які виплавляються. При плавленні магнієвих сплавів використовують флюси, які захищають розплав від контакту з киснем повітря і забезпечують рафінування – очищення від шкідливих домішок.

Робочу суміш зазвичай готують в тигельних печах. При цьому спочатку сам тигель присипають флюсом, потім при розливанні флюсом присипають струмінь розплаву, флюс вводять при перемішуванні і введенні різних ліатур. Це дозволяє уникнути займання магнію при відливанні деталей. Присипки струменя розплаву сіркою забезпечують утворення газу  $SO_2$ , в середовищі якого не відбувається займання магнієвого розплаву. Попадання у виливки хлористих флюсів знижує корозійну стійкість сплавів, а попадання продуктів окислення істотно знижує механічні властивості виливків. Для підвищення чистоти виливків в ливникові чаші встановлюють спеціальні сітки, які забезпечують фільтрацію розплаву.

Для подрібнення зерна в розплав можуть вводитися хлорне залізо, карбонати, додають крейду або магнезит в кількості до 1% від маси розплаву, а також здійснюється перегрів розплаву. При модифікуванні утворюються тугоплавкі нерозчинні частинки  $FeAl_3$ ,  $Al_4C_3$ , які є готовими зародками при кристалізації сплавів. Найвищі механічні властивості і корозійна стійкість досягаються при виплавці виливків у вакуумі.

Промислові ливарні сплави належать до трьох основних систем: Mg-Al-Zn, Mg-Zn-Zr, Mg-P3M-Zr.

1. **Сплави системи Mg-Al-Zn.** Представники цієї групи – МЛ4, МЛ4пч, МЛ5, МЛ5пч, МЛ5он, МЛ6. Основним легувальним елементом є алюміній, додатково сплави легують марганцем для поліпшення корозійної стійкості. Сплави мають широкий інтервал кристалізації (180...250 °С), порівняно з алюмінієм, мають меншу рідкотекучість, в об'ємі зливка – значна усадочна пористість, герметичність зливків порушується, сплави схильні до утворення гарячих тріщин. Такі недоліки мають безпосередній вплив на рівень

механічних властивостей. Найвищий рівень ливарних властивостей серед сплавів групи мають сплави МЛ5, МЛ6 – використовуються для відповідальних складних відливок (лиття – в земляні форми або в металевий кокіль). В залежності від вмісту домішок сплави позначають “пч” – підвищеної чистоти, “он” – загального призначення. МД5пч (вміст домішок – 0,14%), МЛ5 – (0,5%), МЛ5он – (0,7%). Із збільшенням вмісту домішок зменшується корозійна стійкість та пластичність сплавів. Після лиття структура сплавів складається з  $\alpha$ -твердого розчину та частинок інтерметалідів, що виділяються на межах зерен. У випадку сплавів МЛ5, МЛ6 на межах виділяється  $\gamma$ ( $Mg_{17}Al_{12}$ ), в сплаві МЛ4 окрім  $\gamma$ -фази присутня  $T$ -фаза ( $Mg_4Al_2Zn_3$ ). В литому стані сплави МЛ5, МЛ6 мають високу крихкість через утворення евтектичних виділень  $\gamma$ -фази при нерівноважній кристалізації. З метою усунення цього недоліку застосовують гомогенізацію при температурі 415...420 °С (12...24 год.). Охолодження на повітрі фіксує однорідний пересичений твердий розчин. Міцність та пластичність відливок підвищується.

Ці сплави мають хороші технологічні властивості. Максимальні механічні властивості досягаються при термічній обробці по режимах Т4 (гартування) і Т6 (гартування і старіння). Старіння сплавів МЛ5 і МЛ6 проводиться при 175 °С і 190 °С відповідно, впродовж 4...8 годин. Сплави МЛ5 і МЛ6 рекомендують для деталей, які вимагають підвищеної границі текучості та використовують для виготовлення навантажених великогабаритних виливків – різних корпусів, деталей приладів, апаратури та ін.

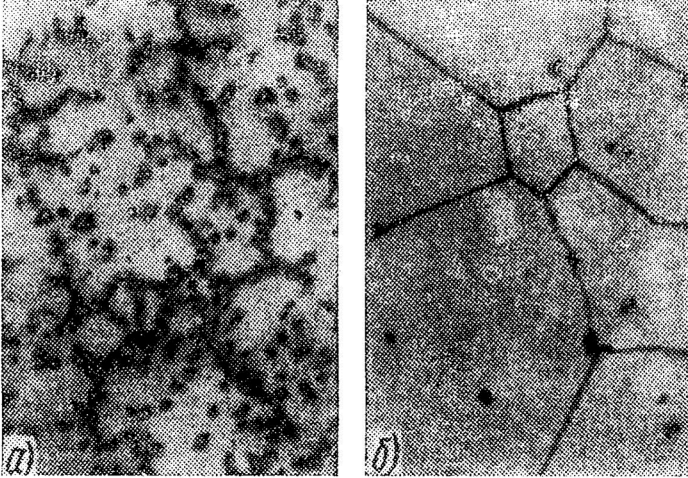
Сплав МЛ6 має кращі ливарні властивості, ніж МЛ5.

Мікроструктуру магнієвих сплавів у литому і термообробленому стані наведено на рисунку 2.5.

**2. Сплави системи Mg-Zn-Zr.** Сплави мають більш високу міцність, порівняно з сплавами 1 групи, властивості менш чутливі до товщини відливки, та до наявності пор. До цієї групи належать МЛ12, МЛ15, МЛ8, МЛ17.

Сплав МЛ12 має високі механічні властивості. Може застосовуватися як у литому, так і в штучно зостареному після лиття (Т1) стані. Відрізняється підвищеною щільністю, корозійною стійкістю і найкращими ливарними властивостями. Сплав піддається гартуванню при 400 °С на повітрі і штучному старінню при 150 °С протягом

50 годин (Т6). Хороше поєднання тимчасового опору і границі текучості при високій пластичності дозволяє успішно використовувати сплав МЛ12 для виливаних деталей, що тривало працюють при великих статичних і знакозмінних навантаженнях.



а – литий стан; б – після гартування

Рисунок 2.5 – Мікроструктури магнієвого сплаву МЛ5, х250

До *недоліків* сплаву слід віднести погану зварюваність і схильність до утворення гарячих тріщин. Сплав МЛ12 застосовується для виготовлення барабанів, реторт, коліс і інших деталей, які працюють протягом тривалого часу при температурах до 200 °С.

Сплав МЛ15 додатково легований лантаном, що дозволило підвищити жароміцність, поліпшити зварюваність. За міцністю та пластичністю МЛ15 ( $\sigma_b = 210$  МПа,  $\delta = 3\%$ ) поступається МЛ12 ( $\sigma_b = 230$  МПа,  $\delta = 5\%$ ). Для легування МЛ8 використовують кадмій, МЛ17 – кадмій та неодим, МЛ18 – кадмій та срібло. Кадмій підвищує механічні та технологічні властивості, неодим та срібло підвищують міцність (для МЛ18  $\sigma_b = 340$  МПа,  $\delta = 6\%$ ).

**3. Сплави системи Mg-P3M-Zr.** Представники цієї групи сплави МЛ9, МЛ10, МЛ11, МЛ19 мають високу жароміцність.

Тривала експлуатація сплавів є можливою при температурах 250...350°C, короткочасна – при температурах до 400°C. Основним легувальним елементом в МЛ9, МЛ10, МЛ19 є неодим, в МЛ11 – церій.

Неодим є легувальним елементом, який забезпечує високу жароміцність до температури 250...350 °С. Неодим підвищує стабільність твердого розчину, утворює зміцнювальну фазу  $Mg_9Nd$ .

Цирконій ефективно подрібнює зерно і рафінує сплав, нейтралізує шкідливі домішки. Сплави успішно застосовуються для виготовлення навантажених деталей, що тривало працюють при температурах до 250 °С, деталей з високою герметичністю і стабільністю розмірів. Сплави зміцнюються термічною обробкою після гомогенізації.

Після гартування від 540 °С протягом 10...12 годин і старіння при 205 °С впродовж 12...18 годин (Т6) сплави набувають високих механічних властивостей. Висока жароміцність пов'язана з тим, що зміцнювальні фази мало схильні до коагуляції в інтервалі робочих температур.

## **2.6. Деформівні магнієві сплави**

До деформівних належать сплави систем: Mg-Mn (МА1, МА8), Mg-Al-Zn-Mn (МА2, МА2-1), Mg-Zn-Zr (МА14).

У зв'язку з низькою технологічною пластичністю всі операції обробки тиском магнієвих сплавів здійснюються при температурах 200...450 °С. Конкретну температуру нагріву заготовок при куванні, листовому штампуванні, гнутті, витяжці та інших видах обробки тиском встановлюють залежно від марки сплаву.

Напівфабрикати з магнієвих сплавів після гарячої обробки тиском поступають у вигляді прутків, стрічок, профілів, поковок або штампувань. Низька пластичність магнієвих сплавів при кімнатній температурі обумовлена тим, що зсув в гексагональних ґратках відбувається тільки по базисних площинах, а при температурах вище 200...300 °С з'являються додаткові площини ковзання, і пластичність зростає. Технологічна пластичність магнієвих сплавів зростає при зменшенні швидкості деформації.

В деформованих напівфабрикатах магнію та його сплавів існує текстура деформації, що є причиною анізотропії механічних

властивостей (до 35% за різними напрямками). Критичний ступінь деформації для магнію – 5...10%.

За основними легувальними елементами деформівні сплави магнію поділяють на п'ять основних груп:

**1. Сплави системи Mg-Mn.** Сплави не зміцнюються термообробкою, хоча змінна розчинність марганцю в магнії існує. Основною метою легування є підвищення корозійної стійкості та зварюваності. Марганець реагує з залізом, очищує розплав, оскільки сполука, що утворюється, має більшу густину та осаджується на дно тиглю. Представник групи – сплав МА1. Подвійні сплави майже не застосовуються, більше використання має сплав МА8, що містить 1,3% Mn, 0,2%Ce. Сплави МА1 і МА8 відносяться до малолегованих, мають дещо підвищену корозійну стійкість, обумовлену присутністю марганцю, хорошу зварюваність, вони не схильні до корозії під напругою.

Сплав МА8 має високу міцність, найкращу пластичність. Введення 0,15...0,35% Ce забезпечує подрібнення зерна в структурі, підвищує механічні властивості і покращує деформівність в холодному стані. Церій утворює малі включення Mg<sub>9</sub>Se, які подрібнюють зерно при кристалізації сплаву, внаслідок чого зростає міцність, пластичність, здатність до деформування. Частинки Mg<sub>9</sub>Se настільки дрібні, що їх не можна виявити у сплавах при збільшеннях, які забезпечують світлові мікроскопи.

Структура сплаву МА1 складається з твердого розчину і дисперсних виділень чистого марганцю. Структура сплаву МА8 складається з твердого розчину, малих виділень чистого марганцю і частинок Mg<sub>9</sub>Se. МА8 має високу технологічну пластичність, середню міцність ( $\sigma_b=240...260$  МПа,  $\delta=7...12\%$ ).

Сплави МА1 і МА8 не зміцнюються термічною обробкою. Вони застосовуються для виготовлення ємкостей для масла, бензину та інших, не агресивних до магнію рідин, деталей трубопроводів і інших деталей і зварних конструкцій, які працюють при помірних навантаженнях.

**2. Сплави системи Mg-Al-Zn-Mn.** Алюміній та цинк мають високу розчинність в магнії при підвищених температурах. Зниження температури супроводжується зменшенням розчинності. До цієї групи належать сплави МА2-1, МА2-1пч («підвищеної чистоти»).

Сплав МА2-1 має вищу міцність, ніж МА1 і МА8, не зміцнюється термічною обробкою і добре зварюється аргоново-дуговим і контактним зварюванням, має підвищену корозійну стійкість, але проявляє деяку схильність до корозійного розтріскування під напругою, яка зростає при збільшенні вмісту алюмінію. Корозійна стійкість сплаву зростає при зменшенні вмісту шкідливих домішок, тому сплав МА2-1пч за корозійною стійкістю перевершує сплав МА2-1. Структура сплаву складається із зерен твердого розчину і зміцнювальних фаз  $\gamma$ - $Mg_4Zn_3Al_2$ .

Сплав МА2-1 успішно застосовується для виготовлення деталей вертольотів, хвостового оперення, люків, втулок, сидінь, панелей, деталей внутрішнього набору літаків, які тривалий час працюють при температурах до 150 °С.

**3. Сплави системи Mg-Zn-Zr.** Представники групи – сплави МА14, МА15, МА19, МА20.

Сплав МА14 має підвищений вміст цинку і додатково легований цирконієм. Цинк збільшує міцність сплаву при штучному старінні. Цирконій підвищує міцність, жароміцність, корозійну стійкість і разом з цинком забезпечує отримання дрібнозернистої структури. Цирконій не утворює з'єднань з магнієм, але володіє високою активністю до легувальних елементів магнієвих сплавів, домішок і газів. При введенні цирконію утворюються тугоплавкі, нерозчинні в рідкому магнії з'єднання  $Zr_2Fe$  і  $ZrFe$ , які осідають на дно тигля і виводять шкідливу домішку (залізо) із сплаву. Цирконій, що залишився в розплаві, сприяє збільшенню числа центрів кристалізації.

Сплав МА14 піддається гартуванню на повітрі в процесі охолодження заготовок після пресування і штучному старінню при температурі 160...170 °С протягом 10...12 годин (Т1). Сплав має високу міцність, задовільну пластичність, незначну схильність до корозійного розтріскування. Сплав МА14 застосовується для виготовлення фітингів, деталей управління літальних апаратів і інших деталей, підданих середнім навантаженням.

Сплав МА19 додатково легований неодимом та кадмієм має найвищу міцність ( $\sigma_B=380...400$  МПа).

**4. Сплави системи Mg-Li.** Представники групи – сплави МА11, МА12. Основним легуючим елементом є неодим (2,5...3,5%). Неодим забезпечує високу жароміцність за рахунок стабільності твердого розчину та низької швидкості коагуляції фази  $Mg_{41}Nd_5$ . Додатково

сплави легують марганцем та нікелем (МА11), цирконієм (МА12). Марганець та нікель підвищують опір повзучості, тривалу міцність. *Недоліком* є те, що нікель зменшує опір корозії. Цирконій сприяє подрібненню зерна, поліпшує технологічну пластичність. Сплави зміцнюють термообробкою. Легування магнію літієм ( $\rho=0,53 \text{ г/см}^3$ ) дозволяє отримувати сплави, густина яких менша за чистий магній. Сплави мають високу пластичність та технологічність при обробці тиском. В залежності від вмісту літію в структурі сплавів присутні наступні види фаз: до 5,7% Li –  $\alpha$ -фаза (твердий розчин літію в ГЦП – гратці магнію); в проміжку концентрацій 5,7...10,4% Li структура складається з суміші фаз ( $\alpha+\beta$ ); при вмісті літію понад 10,4% існує  $\beta$ -фаза (твердий розчин атомів магнію в ОЦК гратці літію). При появі в структурі сплавів  $\beta$ -фази пластичність зростає, це пов'язано з більшою кількістю систем ковзання в ОЦК гратці. Підвищення вмісту літію призводить до зменшення показників міцності. Для збереження певного рівня міцності сплави додатково легують алюмінієм, цинком, кадмієм, РЗМ. До цієї групи належать сплави МА18, МА21.

Окремі магнієві сплави (наприклад, МА5, МА2-1) мають підвищену схильність до корозійного розтріскування. З'єднання деталей з магнієвих сплавів, а також з деталями інших матеріалів ретельно захищаються грунтами, герметиками, мастилами. Для захисту від корозії деталі з магнієвих сплавів піддають окисуванню, після чого покривають лакофарбовими покриттями.

## 2.7. Галузі застосування магнієвих сплавів

Магнієві сплави дозволяють зменшувати масу конструкцій. В авіабудуванні з цих сплавів виготовляють колеса, вилки шасі, передні крайки крил, важелі, корпуси приладів, насосів, двері кабін, деталі планера літака. В космічній техніці виготовляють корпуси ракет, паливні та кисневі баки, стабілізатори.

Магнієві сплави використовують для деталей в атомній техніці (оболонки трубчатих елементів для виділення тепла), оскільки вони мають низьку поглинальну здатність при взаємодії з тепловими нейтронами та не взаємодіють з ураном.

В автомобілебудуванні з магнієвих сплавів виготовляють колеса, диски. В приладобудуванні виготовляють корпуси та деталі приладів. Хімічний склад і механічні властивості ливарних і деформівних магнієвих сплавів наведені у таблицях 2.1; 2.2; 2.3.



Таблиця 2.1 – Хімічний склад і механічні властивості магнієвих сплавів

Сплав	Вміст елементів, %				Вид термообробки	Механічні властивості		
	Al	Zn	Mn	Інші елементи		$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %
Ливарні сплави								
МЛ5	9,0	0,8	0,5	$\Sigma(\text{Si, Fe, Ni, Cu}) = 0,5$	T4	230	85	5
МЛ5пч	9,0	0,8	0,5	$\Sigma(\text{Si, Fe, Ni, Cu})=0,14$	T4	230	85	5
МЛ6	10,0	1,2	0,5	-	T6	220	140	1
МЛ10	-	0,7	-	1,0 Zr, 2,8 Nd	T6	230	140	3
МЛ12	5,0	-	-	1,0 Zr	T1	230	130	5
Деформівні сплави								
МЛ1	-	-	2,0	-	M	220	140	8
МА8	-	-	2,0	0,35 Ce	M	230	120	12
МА2-1	5,0	1,5	0,6	-	M	260	160	10
МА14	$\leq 0,05$	6,0	-	0,5 Zr	T1	320	250	6

Таблиця 2.2 – Хімічний склад і механічні властивості деформівних магнієвих сплавів (ГОСТ 14957-69)

Марка сплаву	Хімічний склад (Mg – основа), %			$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	НВ, МПа
	Al	Mn	інші елементи			
МА8	-	1,5...2,5	1,5...0,35Ce	250	18	500
МА9	0,4...0,8	1,0...1,8	0,1...0,3Ca	-	-	-
МА2	4...5	0,4...0,8	0,8...1,5Zn	280	10	550
МА3	5,5...7,0	0,15...0,5	0,5...1,5Zn	300	12	600
МА5	7,8...9,2	0,15...0,5	0,2...0,8Zn	320	14	550

Таблиця 2.3 – Хімічний склад і механічні властивості ливарних магнієвих сплавів (ГОСТ 2856-68)

Марка сплаву	Хімічний склад (Mg – основа), %			Термо-обробка	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	НВ, МПа
	Al	Mn	інші елементи				
МЛ1			1,0...1,5Si	-	90	2	400
МЛ2	-	1,0...2,0	-	-	90	3	300
МЛ3	2,5...3,5	0,15...0,5	0,5...1,5Zn	-	160	6	400
МЛ4	5,0...7,0	0,15...0,5	2,0...3,0Zn	T4	220	5	500
МЛ5	7,5...9,0	0,15...0,5	0,2...0,8Zn	T4	220	5	500
МЛ6	9,0...10,2	0,1...0,5	0,6...1,2Zn	T4	220	4	600

### 3. СПЛАВИ НА ОСНОВІ Sn, Pb, Ca, Zn (БАБИТИ)

Олово (Sn) та свинець (Pb) належать до металів з низькою температурою плавлення. Температура плавлення олова становить 232 °С, а свинцю – 327 °С. Густина олова  $\rho = 7,3 \text{ г/см}^3$ , густина свинцю  $\rho = 11,34 \text{ г/см}^3$ . Олово має дві поліморфні модифікації:  $\alpha$ -Sn і  $\beta$ -Sn. Модифікація  $\alpha$ -Sn крихка, має вигляд порошку, поява цієї модифікації при низьких температурах небажана (явище має назву «олов'яна чума»). Олово  $\beta$ -модифікації використовують як чистий метал (при лужінні сталі – «біла жерсть»), або при виготовленні сплавів. Олово та свинець мають велику пластичність, низьку твердість (5НВ та 3НВ, відповідно), підвищену корозійну стійкість в атмосферних умовах та в розчинах деяких кислот. Свинець використовують в хімічній промисловості для виготовлення резервуарів та трубопроводів, що контактують з  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , та в електротехніці при виготовленні оболонки електричного кабелю, акумуляторних батарей.

На основі олова та свинцю існують легкоплавкі сплави, призначені:

- для паяння – припої (система Pb-Sn, вміст олова – 25...70%);
- для виготовлення друкарських шрифтів, наприклад «гарт» – 11% Sb, 4% Zn, свинець – основа;
- для топких запобіжників (система Pb-Sn-Bi-Cd).

Ці сплави утворюють евтектики без проміжних фаз на основі хімічних сполук. Широко застосовуються сплави на основі олова та свинцю як антифрикційні матеріали, призначені для заливки підшипників.

*Основні вимоги до підшипникових матеріалів.*

1. Достатній рівень механічних властивостей при робочих температурах (витривалість, твердість, зносостійкість, границя міцності при стисненні).

2. Здатність утримувати мастило для забезпечення низького коефіцієнта тертя, поглинати тверді частинки, не ушкоджувати поверхню вала.

3. Корозійна стійкість в середовищах, які містять мастила та кислоти; висока теплопровідність, що забезпечує відведення тепла від поверхні тертя.

4. Висока технологічність.

### 5. Низька вартість.

Оптимальною структурою антифрикційних матеріалів є структура, до складу якої входять фази із різними властивостями. Обов'язковою є фаза з високою твердістю та зносостійкістю, що розміщена у більш м'якій та пластичній фазі. Кількість твердої фази має бути меншою за пластичну, тверда складова має виділятися у вигляді окремих включень.

**Бабітами** називають антифрикційні сплави, основу яких складають олово або свинець. Вони мають низькі температури плавлення (350...450 °С) та низькі показники коефіцієнту тертя.

Найвищим рівнем властивостей характеризуються олов'яні бабіти Б83 (10...12% Sb, 2,5...6,5% Cu, решта – 83% Sn) та Б89 (7,25...8,25% Sb, 2,6...3,5% Cu, решта – 89%Sn). Діаграма стану системи Sn-Sb наведена на рис. 3.1. Введення до системи Sn-Sb легувальних добавок Cu підвищує механічні властивості та усуває ліквіацію.

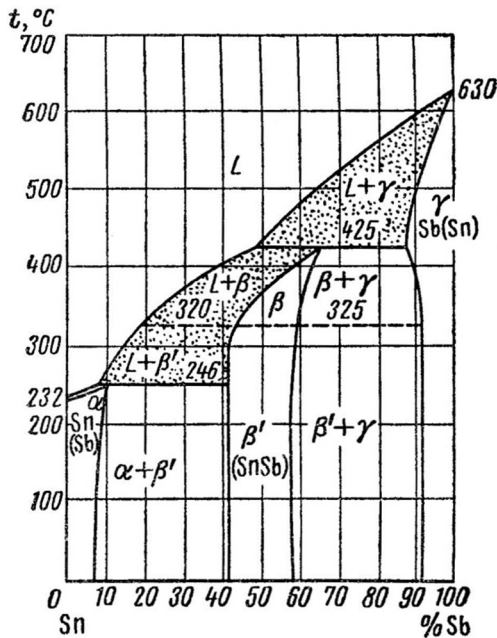


Рисунок 3.1 – Діаграма стану системи Sn-Sb.

М'якою складовою є  $\alpha$ -фаза (твердий розчин сурми та міді в гратці олова), тверда фаза складається з частинок  $\beta'$ -фази (Sn-Sb) кубічної форми та  $\epsilon$ -фази ( $\text{Cu}_3\text{Sn}$ ) голчастої морфології (рис.3.2).

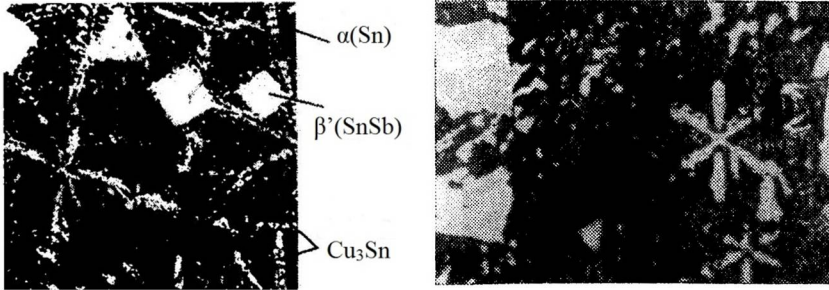


Рисунок 3.2 – Мікроструктура олов'яного бабіту Б83,  $\times 200$

Олов'яні бабіти схильні до ліквації, для запобігання цього недоліку до складу сплавів вводять мідь. При кристалізації утворення голок сполуки  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  відбувається при високих температурах і перешкоджає розвитку ліквації,  $\epsilon$ -фаза має високу твердість і підвищує зносостійкість матеріалу. Бабіт Б89 має, порівняно з Б83, більшу пластичність та меншу твердість, що пов'язано із меншою кількістю  $\beta'$ - фази. Коефіцієнт тертя зі змазкою для Б89 та Б83 дорівнює 0,005 (табл.3.1).

Таблиця 3.1 – Хімічний склад і властивості олов'яних бабітів (ГОСТ 1320-55)

Марка бабітів	Хімічний склад (Sn – основа, домішки – 0,55), %		Щільність, г/см <sup>3</sup>	Температура плавлення, °С	$\sigma_{\text{в}}$ , Мн/м <sup>2</sup>	$\delta$ , %	Коефіцієнт тертя	Коефіцієнт лінійного розширення $\alpha \cdot 10^{-6}$
	Sb	Cu						
Б89	7,25...8,25	2,5...3,5	7,3	342	90	9	-	-
Б83	10...12	5,5...6,5	7,4	380	90	6	0,005	21

Висока вартість олова зумовлює використання сплавів, що мають нижні показники антифрикційних властивостей, та меншу вартість. Для заміни олов'яних бабітів використовують свинцево-олов'яні бабіти Б16 (15...17% Sn, 15...17% Sb, 1,5...2% Cu, решта –

свинець), БТ, БН, Б6. Коефіцієнт тертя зі змазкою для Б16, Б6, БН дорівнює 0,006. Ці сплави формуються на основі потрійної системи Pb-Sn-Sb. Структура Б16 складається з  $\alpha$ -фази (твердий розчин олова, сурми та міді в ґратці свинцю), частинок ( $\beta'$ -фази (SnSb) кубічної форми,  $\epsilon$ -фази ( $\text{Cu}_3\text{Sn}$ ) голчастої морфології та сполук  $\text{Cu}_2\text{Sb}$  (рис.3.3).

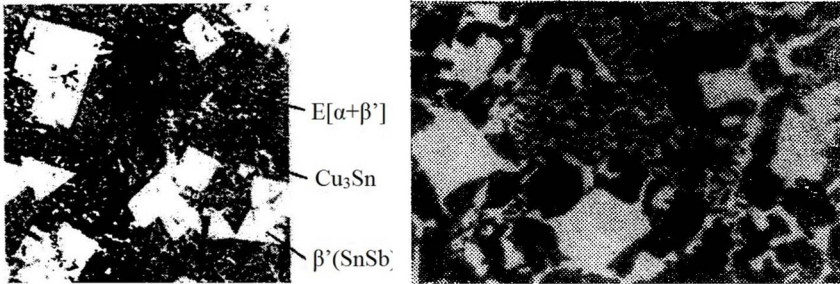


Рисунок 3.3 – Мікроструктура бабіту Б16,  $\times 450$

Такі бабіти використовують в менш навантажених підшипниках, рівень властивостей підвищують легуванням. Нікель сприяє зміцненню  $\alpha$ -твердого розчину, підвищує в'язкість і твердість сплавів, а також зносостійкість. Кадмій та миш'як утворюють хімічну сполуку  $\text{AsCd}$ , частинки якої виконують роль зародків при формуванні сполуки SnSb, зменшують ліквідацію сурми, додатково підвищують зносостійкість. Крім того, миш'як підвищує рідкотекучість (рідинноплинність) і з підвищенням температури зменшує втрату твердості. Також миш'як і телур утворюють дрібні тверді включення типу  $\text{AsPb}$  і  $\text{TePb}$ , які суттєво підвищують зносостійкі властивості сплавів. Кадмій позитивно впливає на підвищення міцності, твердості та корозійної стійкості.

Бабіт Б6 використовують для підшипників нафтових двигунів, прокатних станів, БТ та БН – для автомобільних та тракторних двигунів та двигунів внутрішнього згорання.

Структура свинцевих бабітів формується відповідно до діаграми Pb-Sb (рис.3.4).

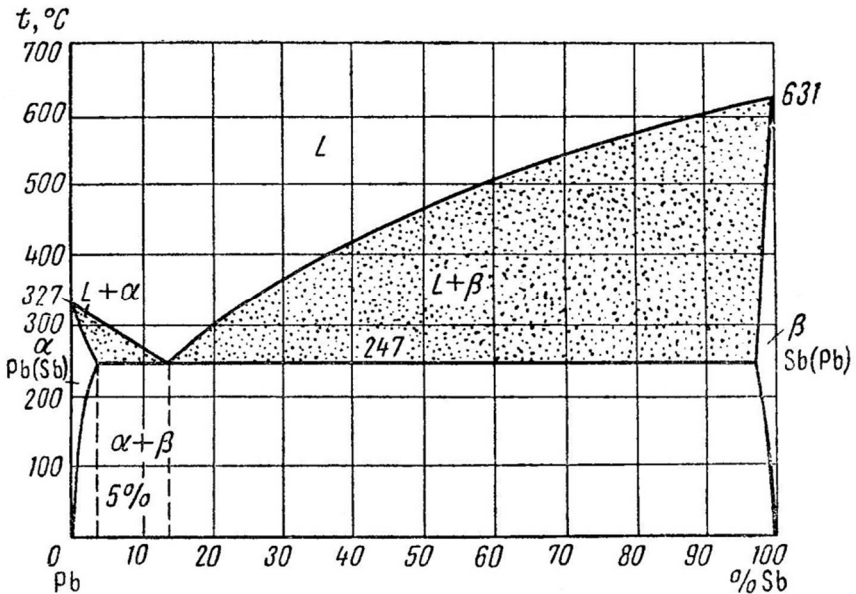


Рисунок 3.4 – Діаграма стану системи Pb-Sb.

Хімічний склад і властивості свинцевих бабітів наведено у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Хімічний склад і властивості свинцевих бабітів (ГОСТ 1320-55)

Марка бабітів	Хімічний склад (Pb-основа; домішки 0,35-0,60), %				Щільність, г/см <sup>3</sup>	Температура плавлення, °C	σ <sub>b</sub> , МПа	δ, %	Коефіцієнт тертя	Коефіцієнт лінійного розширення α · 10 <sup>-6</sup> , 1/°C
	Sn	Sb	Cu	інші						
Б16	15...17	15...17	1,5...2,0	-	9,3	410	80	0,5	0,006	24
Б6	5...6	14...16	2,5...3,0	0,6...1,0As 1,75...2,25Cd	9,6	460	70	0,5	0,005	21
БН	9...11	13...15	1,5...2,0	0,5...0,9As 0,75...1,25Ni	9,5	400	70	1,0	0,006	-
БТ	9...11	14...16	0,7...1,1	1,25...1,75Cd 0,05...0,20Te	-	-	80	2,0	0,009	23

Твердість свинцю – 3 НВ, сурми – 30 НВ, твердість евтектики (13% Sb, 87% Pb) складає 7...8 НВ. Найвищі антифрикційні властивості відповідають сплавам із структурою: евтектика( $\alpha+\beta$ )+ $\beta$ (5%), вміст сурми – 16...18%. М'якою основою є евтектика, тверді включення –  $\beta$ - фаза (твердий розчин свинцю в сурмі). Свинцеві бабіти мають меншу вартість і використовуються для маловідповідальних підшипників.

**Кальцієві бабіти.** Для підшипників залізничного транспорту використовують бабіт БКА (0,8...1,15%Ca, 0,6...0,9%Na, 0,05...0,2%As, решта – свинець). Зміцнювальна фаза – сполука  $Pb_3Ca$ , натр сприяє підвищенню твердості основи, миш'як підвищує антифрикційні властивості. При кімнатній температурі твердість бабіту БКА з часом підвищується (природне старіння), процес прискорюють підігріванням до 50...70 °С.

Кальцієві бабіти також вважають економічними сплавами, однак вони мають гірші властивості, ніж олов'яні або свинцеві (табл.3.3).

Таблиця 3.3 – Хімічний склад і властивості кальцієвих бабітів (ГОСТ 1219-60)

Марка бабітів	Хімічний склад (Pb-основа; домішки 0,35-0,60), %				Щільність, г/см <sup>3</sup>	Температура плавлення, °С	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	Коефіцієнт тертя	Коефіцієнт лінійного розширення $\alpha \cdot 10^{-6}$ , 1/°С
	Ca	Na	Sn	інші						
БКА	0,85...1,15	0,6...0,9	-	0,05...-0,40Al	10,5	470	100	2,5	0,004	26
БК2	0,35...0,55	0,25...0,55	1,5...2,5	0,04...-0,09Mg	-	-	-	-	0,0037	26

**Цинкові бабіти.** Для виготовлення підшипників використовують також сплави на основі цинку. Цинк – метал, що має температуру плавлення 419 °С, густина ( $\rho$ ) складає 7,1 г/см<sup>3</sup>. Метал має ГЦП гратку. Границя міцності цинку – 150 МПа,  $\delta=50\%$ . Як антифрикційні використовують сплави ЦАМ10-5 (10%Al, 5%Cu, решта – цинк) ЦАМ9,5-1,5(9,5% Al, 1,5% Cu). Основним легувальним елементом в антифрикційних сплавах на основі Zn є Al(9...12%). Додатково сплави легують 0,03...0,06% Mg, який забезпечує стабілізацію розмірів виробів.

Сплави мають у структурі  $\alpha$ -фазу (твердий розчин на основі алюмінію (розчинність цинку, в алюмінії – 83%)),  $\beta$ -фазу (майже чистий цинк),  $\epsilon$ -фазу (на основі сполуки  $\text{CuZn}_3$ ), які входять до складу подвійної евтектики ( $\alpha+\beta$ ) та потрійної евтектики ( $\alpha+\beta+\epsilon$ ). В цих бабітах м'якою основою виступає евтектика  $\text{Zn}+\text{Al}+\text{CuZn}_3$ , а твердими включеннями – Al або хімічна сполука  $\text{CuZn}_3$ . Коефіцієнт тертя зі змазкою для цих матеріалів складає 0,009 (табл.3.4).

Таблиця 3.4 – Хімічний склад і властивості цинкових бабітів (ГОСТ 7117-62)

Марка сплавів	Хімічний склад (Zn-основа, домішки 0,35), %			Температура плавлення, °C	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	Коефіцієнт тертя	Коефіцієнт лінійного розширення $\alpha \cdot 10^{-6}$ , 1/°C
	Al	Cu	Mg					
ЦАМ10-5	10,0...12,0	4,0...5,0	0,03...0,06	395	300	0,05	0,009	27
ЦАМ9-1,5	9,0...11,0	1,0...2,0	0,03...0,06	500	300	1,0	-	28

Мікроструктура сплаву Zn-Al наведена на рисунку 3.5.

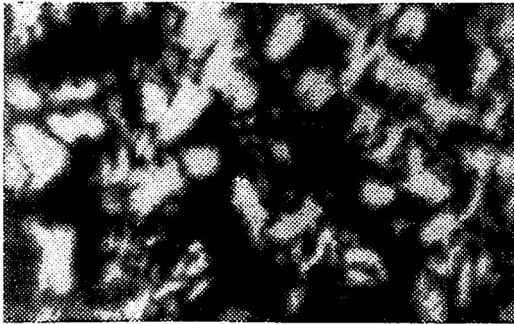


Рисунок 3.5 – Мікроструктура сплаву Zn-Al,  $\times 100$ .

Сплави Zn-Al-Mg не мають схильності до старіння та їх механічні властивості нижчі, ніж у сплавів Zn-Al.

Сплави Zn-Al-Cu є найбільш міцними із цинкових бабітів. Ці сплави за пластичністю, коефіцієнтом тертя і коефіцієнтом лінійного розширення менш ефективні, ніж олов'яні бабіти, однак рівноцінні з свинцевими бабітами.

**Алюмінієві бабіти.** Антифрикційні сплави на основі Al є двофазними високолегованими системами, в яких м'якою складовою (основою) є Al, а твердими включеннями – хімічні сполуки типу AlSb або Al<sub>3</sub>Ni. Сплави на основі Al мають низький коефіцієнт тертя і високу зносостійкість, однак за технологічними властивостями поступаються олов'яним і свинцевим бабітам. Високий коефіцієнт лінійного розширення бабітів на основі Al потребує значних зазорів у вузлах підшипників тертя-ковзання.

Алюмінієві бабіти застосовують у якості замінювачів олов'яних і свинцевих бабітів (табл.3.5).

Таблиця 3.5 – Хімічний склад і властивості алюмінієвих бабітів (ГОСТ 14113-69)

Марка бабітів	Хімічний склад (Zn-основа, домішки 0,35), %			Щільність, г/см <sup>3</sup>	Температура плавлення, °С	σ <sub>в</sub> , МПа	δ, %	Коефіцієнт лінійного розширення α·10 <sup>-6</sup> , 1/°С
	Sb	Mg	інші					
ACC6-5	5...6	0,5...0,7	4...5Pb	3,1	750	80	14	24
АСМ	3,5...5	0,5...0,7		2,8	750	85	29	24
АН2,5	-	-	2,7...3,4Ni	2,85	650	140	23	25,5

Типові умови використання бабітів наведені у таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Умови використання бабітів.

Марка сплаву	Тиск, МПа	Колова швидкість, м/с	$T_{роб.}, ^\circ C$	Галузі застосування
Б88	15; 20	50	75	Підшипники, що працюють при високих швидкостях та динамічних напруженнях, для швидкісних дизелів
Б83	10; 15	50	70	Підшипники, що працюють при високих швидкостях та середніх напруженнях; підшипники для турбін, дизелів, опорні підшипники гребних валів
БН	5; 7; 10	30	70	Підшипники, що працюють при середніх швидкостях та напруженнях; для підшипників компресорів та дизелів
Б16	10	30	70	Підшипники електродвигунів, парових турбін
БС6	15	-	70	Підшипники автотракторних двигунів

#### 4. ТИТАН ТА ЙОГО СПЛАВИ

Титан (Ti) – метал сріблясто-білого кольору, належить до тугоплавких елементів. Він знаходиться в IV групі Періодичної таблиці Менделєєва, має порядковий номер 22, атомну масу 47,9. За розповсюдженням у земній корі титан займає серед металів сьоме місце після Al, Fe, Ca, Na, K і Mg. Температура плавлення титану, який отримано методом йодидного рафінування, дорівнює  $1665 \pm 5$  °C.

Титан має дві поліморфні модифікації: до 882 °C –  $\alpha$ -Ti з граткою ГЦП, та  $\beta$ -Ti з граткою ОЦК, що існує при температурах вище 882 °C. При  $\alpha \rightarrow \beta$  перетворенні об'єм зменшується. Густина  $\alpha$ -Ti (при 20 °C) становить  $4,505 \text{ г/см}^3$ ,  $\beta$ -Ti (при 900 °C) –  $4,32 \text{ г/см}^3$ .

Технічний титан має наступні показники механічних властивостей:  $\sigma_t = 350 \dots 550 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_b = 450 \dots 650 \text{ МПа}$  і  $\delta = 15 \dots 30\%$ . Титан добре деформується при кімнатній температурі, але для штампування деталей складної форми необхідно нагрівати заготовки до  $350 \dots 500$  °C. Зміцнюється наклепом, легуванням і термічною обробкою.

Технічно чистий титан використовують як корозійностійкий матеріал. При утворенні захисної плівки титан перевищує за опором корозії неіржавіючу сталь. Він практично не руйнується корозією у атмосфері, у прісній та морській воді, у кислотах – оцтовій, азотній та розчинах сірчаної кислот, а також стійкий проти газової корозії до температури  $350 \dots 500$  °C. Широко використовується при виготовленні резервуарів для зберігання агресивних рідин.

Технічний титан маркують ВТ1-00, ВТ1-0 (ГОСТ 19807-74) і виробляють найчастіше у вигляді листів товщиною  $0,3 \dots 10,5$  мм.

До переваг титану слід віднести високу питому міцність, здатність працювати в широкому діапазоні температур ( $250 \dots 500$  °C), високу корозійну стійкість.

До недоліків титану належать низька теплопровідність, низькі антифрикційні властивості, здатність погано оброблюватись різанням.

Плавлення і гаряче оброблення титану проводять у вакуумі або інертному газі (Ar), тому що при підвищених температурах титан активно поглинає кисень і азот, які дифундують углиб металу та помітно змінюють його властивості.

#### 4.1 Вплив домішок на властивості титану

Кисень і азот, які створюють з титаном сплави типу твердих розчинів впровадження і металідні фази, істотно знижують пластичність титану і є шкідливими домішками. Крім азоту і кисню, до числа шкідливих для пластичності титану домішок слід віднести також вуглець, залізо і кремній.

З перерахованих домішок азот, кисень і вуглець підвищують температуру алотропічного перетворення титану, а залізо і кремній знижують її. Колективний вплив домішок виражається в тому, що технічний титан зазнає алотропічного перетворення не при постійній температурі (882 °С), а впродовж деякого температурного інтервалу: 865...920 °С (при вмісті кисню і азоту в сумі не більше 0,15%).

З погляду забезпечення максимальної жароміцності і термічної стабільності титанових сплавів всі ці домішки, за винятком кремнію, вважаються шкідливими, і вміст їх бажано звести до мінімуму. Додаткове зміцнення, яке надається домішками, абсолютно не виправдовується через різке зниження термічної стабільності, опору повзучості і ударної в'язкості. Чим більш легованим і жароміцним повинен бути сплав, тим нижче повинен бути в ньому вміст домішок, які створюють з титаном тверді розчини впровадження (кисень, азот).

При розгляді титану як основи для створення жароміцних сплавів необхідно враховувати зростання хімічної активності цього металу по відношенню до атмосферних газів і водню. У разі активованої поверхні титан здатний поглинати водень при кімнатній температурі, а при 300 °С швидкість поглинання водню титаном дуже висока. Окисна плівка, що завжди є на поверхні титану, надійно захищає від проникнення водню. У разі наводорожування титанових виробів його (H<sub>2</sub>) видаляють з металу вакуумним відпалом. Механізм водневої крихкості залежить від фазового складу титанових сплавів. У випадку нелегованого титану та однофазних α-титанових сплавів причиною явища підвищення крихкості є виділення крихкої гідридної фази, що різко зменшує опір відриву. В двофазних сплавах гідриди не утворюються через присутність β-фази, що добре розчиняє водень, проте виникають зони пересичених воднем твердих розчинів, що викликають крихке руйнування при низьких швидкостях деформації. Із збільшенням кількості β-фази чутливість сплавів до водневої крихкості зменшується. При температурах вище 600 °С титан активно взаємодіє з киснем, а вище 700 °С – з азотом.

У якості конструкційних матеріалів використовують сплави титану, які мають високу міцність і добрі показники пластичності. Титан легується наступними елементами: Al, Mo, Mn, Cr, Sn, Zr, Nb, V. Залежно від впливу на поліморфізм титану всі легувальні елементи поділяють на три основні групи (рис.4.1).



Рисунок 4.1 – Схема класифікації легувальних елементів для титану.

1. До першої групи належать елементи, що сприяють розширенню  $\alpha$ -області. Ці елементи –  $\alpha$ -стабілізатори (Al, Ca, B, C, N, Zn), вони підвищують температуру поліморфного перетворення (рис.4.2).

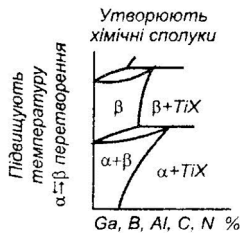


Рисунок 4.2 – Вплив елементів першої групи на поліморфізм титану.

2. Друга група елементів –  $\beta$ -стабілізатори (Mo, V, Mn, Cr, Fe, Ni, Si, Ta, Co, Nb). Ці елементи знижують температуру поліморфного перетворення, збільшують обсяг  $\beta$ -області (рис.4.3).

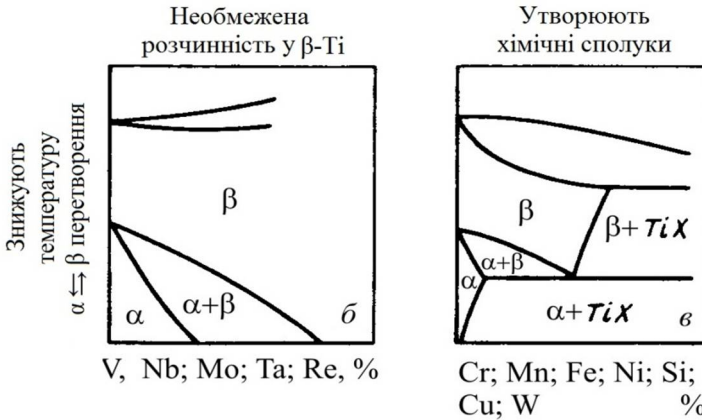


Рисунок 4.3 – Вплив елементів другої групи на поліморфізм титану.

3. До третьої групи відносять нейтральні елементи, що не впливають на температуру поліморфного перетворення: Hf, Zr, Sn, Ge.

Найперспективнішими легувальними елементами для отримання жароміцних термічно стабільних титанових сплавів є алюміній, галій, індій, що підвищують температуру поліморфного перетворення; цирконій і олово, які не впливають на температуру фазового перетворення; молібден, ванадій, ніобій і тантал, що не мають з титаном евтектоїдних точок; мідь і кремній, де евтектоїдне перетворення проходить дуже швидко (за мартенситною схемою), а також залізо і хром.

#### 4.2. Класифікація титанових сплавів

Титанові сплави поділяють *за способом виготовлення* виробів на деформівні та ливарні, *за призначенням* – на конструкційні, жароміцні, корозійностійкі. За рівнем міцності розрізняють маломіцні, сплави середньої міцності, високоміцні сплави.

Промислові титанові сплави *класифікують також за умовним коефіцієнтом  $\beta$ -стабілізації ( $K_\beta$ )*. Цей коефіцієнт показує наскільки склад сплаву наближається до критичного:  $K_\beta = \sum(C_i/C_{\text{крит.}i})$ , де  $C_i$  – вміст  $\beta$ -стабілізатора в сплаві,  $C_{\text{крит.}i}$  – критичний вміст елемента у подвійній системі, що забезпечує після гартування 100%  $\beta$ -фази в структурі. Наприклад, в подвійній системі Ti-Mo критична концентрація молібдену – 10%. Тоді сплав титану з вмістом молібдену 4% буде мати коефіцієнт  $\beta$ -стабілізації – 0,4 ( $K_\beta=4/10$ ).

За значенням  $K_\beta$  титанові сплави поділяють на 5 груп;

1.  $K_\beta=0$  ( $\alpha$ -сплави);
2.  $K_\beta \leq 0,25$  (псевдо- $\alpha$ -сплави);
3.  $0,3 \leq K_\beta < 1,0$  ( $(\alpha+\beta)$ -сплави);
4.  $1,0 \leq K_\beta < 2,4$  (псевдо- $\beta$ -сплави);
5.  $K_\beta > 2,4$  ( $\beta$ -сплави).

Класифікація титанових сплавів за структурою подана в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Класифікація титанових сплавів за структурою

Група сплавів	Марка сплаву
$\alpha$ -сплави	BT1-00, BT1-0, BT5, BT5-1, ПТ-7М
Псевдо- $\alpha$ -сплави ( $K_\beta < 0,25$ )	OT4-0, OT4-1, OT4, BT20, AT3
$(\alpha + \beta)$ – сплави мартенситного класу ( $K_\beta = 0,3...0,9$ )	BT6С, BT6, BT14, BT8, BT8-М, BT9, ПТ-3В, BT3-1, AT3
$(\alpha + \beta)$ – сплави перехідного класу ( $K_\beta = 1,0...1,4$ )	BT22, BT30
Псевдо- $\beta$ -сплави ( $K_\beta = 1,5...2,4$ )	BT35, BT32, BT15
$\beta$ -сплави ( $K_\beta = 2,5...3,0$ )	4201

За структурою титанові сплави у відпаленому стані поділяють на:

1.  *$\alpha$ -Ti сплави* (структура –  $\alpha$ -твердий розчин легувальних елементів в ГЦП гратці  $\alpha$ -титану);
2. *псевдо- $\alpha$ -Ti сплави* (структура –  $\alpha$ -фаза+ $\beta$ -фаза (до 5%+інтерметалід);

3.  $(\alpha+\beta)$ -Ti сплави (структура – тверді розчини легувальних елементів в ГЦП та ОЦК гратках титану);

4. псевдо- $\beta$ -Ti сплави (структура – невелика кількість  $\alpha$ -фази +  $\beta$ -фаза);

5.  $\beta$ -Ti сплави (структура –  $\beta$ -фаза – твердий розчин  $\beta$ -стабілізаторів в ОЦК гратці титану);

6. сплави на основі інтерметалідів.

В **загартованому стані** титанові сплави поділяють на:

1. сплави мартенситного класу ( $\alpha'(\alpha'')$ );

2. сплави перехідного класу ( $\alpha'(\alpha'')+\beta$ );

3.  $\beta$ -сплави.

За **властивостями** в загартованому стані сплави мартенситного класу поділяють на дві підгрупи:

1. що твердіють (структура  $\alpha'$ ) при гартуванні;

2. що є м'якими після гартування ( $\alpha''$ ).

#### 4.3. Термічна обробка титанових сплавів

Для чистого титану та  $\alpha$ -сплавів після пластичної деформації застосовують **рекристалізаційне відпалення**. Температура процесу не повинна перевищувати  $A_{c3}$  через інтенсивний ріст зерна в однофазній  $\beta$ -області. Напівфабрикати з титану та псевдо- $\alpha$ -сплавів ефективно знеміцнюються також при **дорекристалізаційному відпаленні**. З метою зняття нагартовки ( $\alpha+\beta$ -сплавів проводять нагрівання до температур 800 °С, витримку та охолодження на повітрі.

Для ( $\alpha+\beta$ )-сплавів застосовують **ізотермічне відпалення**. Перша стадія передбачає нагрівання до 800...950 °С, на цьому етапі усувається нагартовка, надалі сплави охолоджуються (з піччю або перенесенням до іншої печі) до температури (500...650 °С), витримуються при цій температурі, це забезпечує високу стабільність  $\beta$ -фази, та охолоджуються на повітрі. Ізотермічне відпалення забезпечує поєднання високої міцності, жароміцності та пластичності сплавів.

Для ( $\alpha+\beta$ )-сплавів застосовують також **подвійне відпалення**. Основна відмінність такого процесу від ізотермічного – між першою та другою температурами витримки сплав охолоджують на повітрі до кімнатної температури. Після такого охолодження в сплаві фіксується метастабільна  $\beta$ -фаза, що розпадається на другій ступені нагрівання. Сплав набуває більш високої міцності, пластичність – зменшується.

Для зменшення залишкових напружень після механічної обробки або зварювання використовують *неповне відпалення* (450...650 °С).

Зміцнювальна термообробка титанових сплавів складається з *гартування* та *старіння*. Оптимальні температури гартування визначаються природою метастабільних фаз. Якщо при гартуванні  $\alpha'$ -фаза не утворюється температура нагрівання має забезпечувати при гартуванні фіксування  $\alpha+\beta$  – структури з максимальною кількістю метастабільної  $\beta$ -фази ( $T_{\text{гарт.}}$  наближається до  $T_{\text{крит.}}$ ). В іншому випадку, температура гартування може бути вищою за  $T_{\text{крит.}}$ , але не повинна перевищувати  $A_{c3}$ . Структура після гартування в цьому випадку складається з  $\alpha+\alpha'+\beta$ . Така різниця пов'язана із різною ефективністю зміцнення при розпаді  $\alpha'$ - та  $\alpha''$ -фаз (розпад  $\alpha''$ -фази супроводжується інтенсивним зміцненням). Псевдо- $\beta$ -сплави гартують з температур дещо вище  $A_{c3}$ .

Старіння рекомендують проводити при температурах 500...600 °С, це дозволяє уникати появи  $\omega$ -фази, зміцнення пов'язане із виділенням дисперсної  $\alpha$ -фази. Якщо  $\omega$ -фаза не утворюється або її кількість незначна старіння можливе при 450...500 °С.

Для титанових сплавів застосовують ХТО: *азотування* та *оксидування*. Ці операції підвищують опір зносу, міцність до втоми, корозійну стійкість та жаростійкість. Основним *недоліком* є висока крихкість поверхневих шарів, що підвищує чутливість до надрізів та тріщин. Азотування проводять при 850...950 °С в атмосфері азоту із додаванням аргону (парціальний тиск 0,5...4,0 кПа), рідше – в аміаку. Добре азотуються VT4, VT5, VT8, VT14, гірше – VT3, VT1.

Оксидування передбачає нагрівання титанових сплавів до 725...850 °С в окисному середовищі впродовж 1...5 годин з наступним відпаленням у вакуумі при 750...850 °С.

#### 4.4. Деформівні титанові сплави

Механічні властивості титанових сплавів різних класів, відповідно до їх структурних особливостей у стабільному і метастабільному станах, наведено у таблиці 4.2.

Сплави VT3-1, VT6, VT6С, VT8, VT8-М, VT14, VT22 піддаються гартуванню і старінню. Рекомендовані режими нагріву під гартування і старіння для монолітних виробів, напівфабрикатів і зварюваних деталей наведені в табл.4.3.



Таблиця 4.2 – Механічні властивості типових титанових сплавів

Сплави		Вміст легувальних елементів, мас. %	Властивості			
			$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	КС, МДж/м <sup>2</sup>
$\alpha$ -сплави	BT5	5,0Al	750...900	10	25	0,50
	BT5-1	5,0Al; 2,5Sn	800...1000	10	25	0,40
псевдо- $\alpha$ -сплави	OT4-1	1,5Al; 1,0Mn	600...750	15	35	0,45
	BT20	6,0Al; 2,0Zr; 1,0Mo; 1,0V	950...1100	10	25	0,40
$\alpha + \beta$ – сплави мартенситного класу	BT6	6,0Al; 4,0V	$\frac{900...1070}{1100}$	$\frac{10}{6}$	$\frac{30}{20}$	$\frac{0,40}{0,30}$
	BT14	4,5Al; 3,0Mo; 1,0V	$\frac{900...1070}{1120}$	$\frac{10}{6}$	$\frac{35}{12}$	$\frac{0,50}{0,25}$
	BT23	5,0Al; 2,5Mo; 4,5V; 1,0Cr; 0,5Fe	$\frac{1050...1200}{1250}$	$\frac{10}{6}$	$\frac{30}{18}$	$\frac{0,40}{0,25}$
$\alpha + \beta$ – сплави перехідного класу	BT22	5,0Al; 5,0Mo; 5,0V; 1,0Cr; 1,0Fe	$\frac{1100...1250}{1300}$	$\frac{9}{6}$	$\frac{25}{16}$	$\frac{0,30}{0,20}$
псевдо- $\beta$ -сплави	BT32	2,0Al; 8,0Mo; 8,0V; 1,0Cr; 1,0Fe	$\frac{800...950}{1200}$	$\frac{15}{6}$	$\frac{50}{20}$	$\frac{0,45}{0,25}$

Примітки:

- 1 В чисельнику – механічні властивості у відпаленому стані;  
2 В знаменнику – після гартування і старіння.

Таблиця 4.3 – Режими зміцнювальної термічної обробки титанових сплавів

Марка сплаву	Температура поліморфного перетворення, $T_{\text{пн}}$ , °C	Температура нагріву під гартування, °C	Температура старіння, °C	Тривалість старіння, годин
BT3-1	960...1000	860...900	500...620	1...6
BT6	980...1010	900...950	450...550	2...4
BT6C	950...990	880...930	450-500	2...4
BT8-M, BT8, BT9	980...1020	920...940	500...600	1...6
BT14	920...960	870...910	480...560	8...16
BT22, BT25	840...880	690...750	480...540	8...16

Нагрів при термічній обробці рекомендується проводити в електричних печах з автоматичним регулюванням і реєстрацією температури. Для попередження утворення окалини нагрів готових

деталей і листів необхідно проводити в печах із захисною атмосферою або із застосуванням захисних покриттів.

При нагріві під гартування тонких листових деталей для вирівнювання температури і зменшення викривлення їх під печі укладається сталева плита завтовшки 30...40 мм. Для гартування деталей складної конфігурації і тонкостінних деталей застосовуються пристосування для фіксації та попередження викривлення і поводки.

#### 4.5. Технологічні властивості

Оброблюваність різанням титанових сплавів задовільна. Обробку різанням сплавів можна проводити як у відпаленому, так і в термічному зміцненому станах. Не дивлячись на гетерофазність структури, ці сплави мають задовільну зварюваність всіма видами зварювання, які застосовуються для титану. Для забезпечення необхідного рівня міцності і пластичності обов'язково проводять повний відпал. При цьому міцність зварного з'єднання (зварювання плавленням) складає не менше 0,9 від міцності основного металу. Пластичність зварного з'єднання є близькою до пластичності основного металу.

#### 4.6. Сплави на основі інтерметалідів титану

**1. Жароміцні сплави.** Основою жароміцних сплавів є інтерметаліди  $Ti_3Al$  ( $\alpha_2$ -фаза),  $TiAl$  ( $\gamma$ -фаза). СТ5 – жароміцний сплав на базі сполуки  $Ti_3Al$ , до складу входять 15...25% алюмінію, олово, цирконій, ванадій. Такі сплави мають низьку технологічну пластичність. Якщо вміст алюмінію знаходиться в межах 35...45%, утворюються сплави з  $\gamma$ -фазою. Сплави мають низьку густину  $\rho=3,5 \text{ г/см}^3$ , є жароміцними та жаростійкими. *Недолік* – висока крихкість.

**2. Сплави з "ефектом пам'яті форми".** Основою сплавів є інтерметалід  $TiNi$ . Характерною рисою  $TiNi$  є здатність до деформування в холодному стані. Найбільш відомою маркою є *нітінол* – сплав, що здатний відтворювати певну форму виробу при тепловій дії. Цей ефект пов'язаний із орієнтованим зворотним мартенситним перетворенням. При охолодженні фаза  $TiNi$  із складною структурою переходить в мартенсит  $TiNi$  з триклинною ґраткою. Температура початку прямого мартенситного перетворення ( $\sim 60^\circ \text{C}$ ) залежить від складу сплаву. При нагріванні вище

100...120 °С відбувається зворотне мартенситне перетворення. Якщо виготовити з нітінолу довгий стрижень при температурах 60 °С, потім – охолодити його та надати компактної форми, при нагріванні вище 120 °С стрижень відновить свою форму.

#### 4.7. Ливарні титанові сплави

Фасонні відливки з титану були отримані в перші роки його технічного застосування, промислове ж освоєння фасонного лиття з титану і його сплавів тривало довгі роки. Труднощі виробництва фасонних відливок з титану обумовлені високими швидкостями взаємодії титану зі всіма відомими формувальними і вогнетривкими матеріалами, а також з газами. Тому плавлення і заливання титанових сплавів ведеться у вакуумі, а матеріал форми вибирають з таким розрахунком, щоб її взаємодія з розплавленим металом була мінімальною.

Ливарні властивості титану і його сплавів достатньо високі. Їх лінійна усадка невелика (~ 1 %). Внаслідок малого інтервалу кристалізації титанові сплави мають високу рідкоплинність і забезпечують отримання щільних виливків. Рідкоплинність сплавів погіршується зі збільшенням інтервалу кристалізації. Виняток становлять сплави титану з алюмінієм, у яких зі збільшенням вмісту алюмінію рідкоплинність зростає, не дивлячись на розширення інтервалу кристалізації, що пояснюється збільшенням теплоти затвердіння.

Для фасонного лиття застосовують титан і його сплави: VT1L, VT5L, VT14L, VT6L, VT9L, VT20L, VT35L, які за складом практично співпадають з аналогічними деформівними сплавами (табл.4.4). В ливарних сплавах допускається більший вміст домішок в порівнянні із деформівними сплавами.

Найширше використовують  $\alpha$ -сплав VT5L, що обумовлено високими ливарними властивостями, простотою технології отримання з нього виливків, поширеністю і недефіцитністю єдиного в ньому легувального елемента – алюмінію, задовільною пластичністю і ударною в'язкістю виливків, вищою циклічною витривалістю в порівнянні з титаном і ливарними ( $\alpha+\beta$ )-сплавами. Структура сплаву VT5L представлена в основному пластинчастими зернами  $\alpha$ -фази усередині початкового  $\beta$ -зерна. Сплав не схильний до утворення гарячих тріщин, добре зварюється. Сплав призначений для фасонних

відливок, що довготривало працюють до 400 °С. Його застосовують також для створення складних литозварних конструкцій з підвищеною надійністю в експлуатації. Виливки з  $\alpha$ -сплаву ВТ5Л, як правило, піддають повному або частковому відпалу для стабілізації структури і зняття залишкових напруг.

Таблиця 4.4 – Середній хімічний склад і гарантовані механічні властивості ливарних титанових сплавів

Марка сплаву	Хімічний склад, % (мас.), титан - решта					Механічні властивості, не менше		
	Al	Mo	V	Si	Інші елементи	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	КСУ, Дж/см <sup>2</sup>
ВТ1Л	-	-	-	-	-	350	10	50
ВТ5Л	5,0	-	-	-	-	700	6	30
ВТ6Л	6,0	-	4,0	-	-	900	5	28
ВТ9Л	6,5	3,3	-	0,3	1,5 Zr	930	4	23
ВТ20Л	6,5	1,5	1,5	-	2,0 Zr	900	5	28
ВТ35Л	3,0	-	1,5	-	3,0 Sn; 3,0 Cr	1100*	7...10	-
ВТ21Л	6,5	1,5	1,5	0,25	1,0 Cr; 1,0 Zr	1000	4	21

Примітка: \* Після гарячого ізостатичного пресування і зміцнювальної обробки

Сплав ВТ6Л відрізняється вищими міцнісними характеристиками в порівнянні зі сплавом ВТ5Л майже при такій же пластичності. Сплав ВТ6Л добре зварюється. Застосування цього сплаву забезпечує створення надійних зварних конструкцій в поєднанні з деформованими напівфабрикатами з того ж сплаву. Для зняття залишкових напруг виливки піддають 1...2-годинному відпалу, переважно вакуумному, при 750 °С.

Сплав ВТ9Л є ливарним варіантом жароміцного сплаву ВТ9 і призначений для виготовлення литих деталей, що працюють при температурах 500...550 °С. Сплав ВТ14Л являє собою ливарний варіант термічно зміцнюваного сплаву ВТ14. Проте зміцнювальну термічну обробку для сплаву ВТ14Л не застосовують, оскільки це призводить до різкого зниження пластичності виливків. Виливки із сплаву ВТ14Л відпалюють при 850 °С в печі зі швидкістю 2...4 °С/хв, після чого він набуває структури, представленої  $\alpha$ - і  $\beta$ -фазами. Ливарні властивості сплаву ВТ14Л гірші, ніж у ВТ5Л. Механічні і ливарні

властивості сплаву VT20Л приблизно такі ж, як і у інших ( $\alpha+\beta$ )-сплавів, але рідкоплинність дещо вища.

Виливки відрізняються меншою пластичністю в порівнянні з деформованими напівфабрикатами з цього ж сплаву. Разом з тим в'язкість руйнування виливків значно більша, ніж у деформованих напівфабрикатів з тих же сплавів. Для ливарних сплавів характерна відносно низька границя витривалості, що становить всього близько 50% від аналогічної характеристики деформованого напівфабрикату з оптимальною мікроструктурою. Ливарний псевдо- $\beta$ -сплав VT35Л відрізняється від інших ливарних сплавів високим опором втомі на рівні витривалості деформованих напівфабрикатів. Гаряча ізостатична обробка дозволяє істотно поліпшити якість литого металу і значно підвищити механічні властивості, ресурс і надійність деталей.

#### **4.8. Застосування титану і його сплавів**

Титан і його сплави, які відрізняються поєднанням ряду цінних властивостей, перспективні для застосування в багатьох галузях сучасної техніки. Висока вартість титану і його сплавів у багатьох випадках компенсується більшою їхньою працездатністю, а в деяких випадках вони є єдиним матеріалом, з якого можна виготовити устаткування або конструкції, здатні працювати в конкретних умовах.

Титанові сплави широко застосовують в авіаційній техніці. Титанові сплави в промисловому масштабі вперше були використані в конструкціях авіаційних реактивних двигунів. Застосування титану в конструкції реактивних двигунів дозволяє зменшити їх масу на 10...25%. Зокрема, з титанових сплавів виготовляють диски і лопатки компресора, деталі повітрязбірника, напрямного апарата і виробу для кріплення.

Титанові сплави в конструкціях літаків застосовують в двох основних напрямках: а) як матеріали, які володіють вищими питомими характеристиками в порівнянні з алюмінієвими сплавами і сталлями в звичайних дозвукових літаках; б) як матеріали для надзвукових літаків, коли алюмінієві сплави стають непрацездатними, а сталі не можуть конкурувати з титановими сплавами через низькі питомі міцнісні характеристики.

У табл. 4.5 представлені порівняльні характеристики найбільш застосовуваних в літакобудуванні сталей, алюмінієвих і титанових сплавів при кімнатній температурі.

Таблиця 4.5 – Порівняльні характеристики сталей, алюмінієвих і титанових сплавів, які застосовуються в конструкціях літаків

Марка сплаву		$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_b/\rho$ см <sup>3</sup> ·10 <sup>5</sup>	$\sigma_{-1}$ , МПа (N=2·10 <sup>7</sup> циклів)	$\sigma_{-1}/\rho$ (МПа·10 <sup>3</sup> )/г
Алюмінієві	АК4-1	2,8	420	15	135	48
	Д16Т	2,87	450	16,2	150	54
	В95	2,85	520	18,2	165	58
Титанові	ОТ4	4,55	800	17,5	420	92
	ВТ6ч	4,55	900	20	550	118
	ВТ8-М	4,55	1100	24,2	550	120
Сталі	30ХГСА	7,85	1100	14	600	77
	ЭИ643	7,81	1800	23	750	96
	ВНС-2	7,76	1250	16	620	80
	ВНС-5	7,82	1450	18,5	720	92

За питомими характеристиками, особливо за питомою границею витривалості, титанові сплави перевершують інші матеріали. Тому заміна алюмінієвих сплавів і сталей на титанові сплави дозволяє зменшити масу конструкцій літаків і отримати вищі ресурсні характеристики.

Розширюється застосування титану у вертольотах, головним чином, для деталей системи несучого гвинта, приводу, а також системи управління. Важливе місце займають титанові сплави в ракетобудуванні. Слід зазначити, що в ракетобудуванні, зважаючи на короткочасну роботу двигунів і швидке проходження щільних шарів атмосфери, значною мірою знімаються проблеми втомної міцності, статичної витривалості і частково повзучості.

Титан технічної чистоти використовують в хімічній промисловості (компресори, насоси для подачі соляної та сірчаної кислот, трубопроводи, автоклави, фільтри).

В суднобудуванні титан та його сплави використовують при виготовленні гребних гвинтів, обшивки корпусів морських суден, підводних човнів. Титан має високу кавітаційну стійкість, мікроорганізми на його поверхні не утворюють нашарувань.

В криогенній техніці використовують псевдо- $\alpha$ -сплави титану AT2, AT2-3, AT2-4.

В медицині титан використовується при виготовленні протезів (штучний суглоб).

Також титан і його сплави застосовують в хімічній, нафтохімічній, целюлозно-паперовій і харчовій промисловості, кольоровій металургії, енергомашинобудуванні, електроніці, ядерній техніці, гальванотехніці, при виробництві озброєння, для виготовлення броньових плит, хірургічного інструменту, хірургічних імплантатів, опріснювальних установок, деталей гоночних автомобілів, спортінвентаря, деталей ручного годинника і прикрас.

#### 4.9. Додаткові відомості

##### *Деформівні $\alpha$ -сплави:*

**1. Сплави системи Ti-Al.** VT5 містить приблизно 5% Al, має більш високу міцність ніж чистий титан ( $\sigma_b=750\text{...}950$  МПа,  $\delta=10\%$ ), технологічність невисока (деформується лише в гарячому стані). З VT5 виготовляють деталі для роботи при температурі до 400 °С.

**2. Сплави, леговані додатково нейтральними зміцнювачами – оловом та цирконієм (Ti-Al + нейтральні Sn, Zr).** Олово сприяє підвищенню технологічності, підвищує опір повзучості. Сплави добре зварюються, здатні працювати від криогенних температур до 450 °С. Сплави термічно стійкі, не зміцнюються ТО. Сплав VT5-1 (5% Al, 2,5% Sn) має наступні властивості:  $\sigma_b=800\text{...}1000$  МПа,  $\delta=10\%$ . До цієї групи належить також ПТ7М (легований цирконієм), призначений для виготовлення труб.

**3. Дисперсійно твердіючі  $\alpha$ -сплави. (Ti+2%Cu)** – сплав зміцнюється ТО. Після старіння міцність сплаву зростає на 30...50% за рахунок дисперсійного твердіння. Виготовляють – лист, смуги, сплав добре зварюється.

### ***Деформівні псевдо- $\alpha$ -сплави:***

1. Сплави титану, що містять крім алюмінію,  $\beta$ -стабілізатори, що є евтектоїдоутворювачами. Типовими представниками є сплави системи *Ti-Al-Mn* (OT4-0, OT4-1, OT4, BT4, OT4-2). Структура сплавів  $\alpha+\beta$  (1...5%). Сплави добре деформуються в гарячому та холодному стані, добре зварюються, робочі температури – до 350 °С. *Недоліки* – відносно невисока міцність ( $\sigma_b=600\text{...}750$  МПа,  $\delta=15\%$  - OT4-1) та жароміцність.

2. Сплави титану, що леговані Al та ізоморфними  $\beta$ -стабілізаторами (*Ti-Al-V*): ПТЗВ, OT4У. В сплавах серії OT4У замість марганцю (OT4) вводять ванадій (1,5...3,0%).

3. Сплави титану, що містять Al,  $\beta$ -стабілізатори, нейтральні зміцнювачі. До цієї групи належать BT20 (містить цирконій, ванадій, молібден), BT18, TC5. BT20 – жароміцний листовий матеріал  $T_{\text{експл.}} < 500$  °С), добре зварюється. BT18 – призначений для виготовлення прутків, поковок, штамповок, здатний тривало використовуватися при температурах 550...600 °С.

4. Сплави, леговані нейтральними зміцнювачами (Zr) та  $\beta$ -стабілізаторами (Nb, V, Mo, вміст яких не перевищує граничної розчинності в  $\alpha$ -фазі. До цієї групи належать AT2, AT2-1, AT2-2. Структура сплавів –  $\alpha$ -твердий розчин ( $\alpha$ +незначна кількість  $\beta$ ). Сплави характеризуються високою пластичністю та в'язкістю при криогенних температурах (до – 253 °С). Деформівні  $\alpha$ -сплави та псевдо- $\alpha$ -сплави використовують, переважно, у відпаленому стані.

### ***Деформівні ( $\alpha+\beta$ ) сплави титану:***

1. Сплави, що леговані Al та ізоморфними  $\beta$ -стабілізаторами (BT6, BT6C). Наведені сплави відповідають системі *Ti-Al-V*. Ванадій сприяє підвищенню міцності та пластичності. BT6 (6,25%Al, 4,0%V) може використовуватись після відпалення (900...950 °С) або гартування і старіння. Перевагою сплаву BT6 є добра зварюваність, сплав має високу

термічну стабільність ( $T_{\text{експл.}}=400\text{...}450\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). До цієї ж групи належать ВТ14, ВТ16, що мають більший вміст  $\beta$ -стабілізаторів і, відповідно, містять 10% та 25...30%  $\beta$ -фази.

2. Сплави, леговані алюмінієм, ізоморфними та евтектоїдоутворювальними  $\beta$ -стабілізаторами (перехідними елементами). До цієї групи належить сплав ВТ22 (Ti-Al-V-Mo-Cr-Fe), що є найміцнішим титановим сплавом після відпалення (міцність така ж як у ВТ6, ВТ3-1, ВТ14 після гартування та старіння). Сплав призначений для виготовлення високонавантажених деталей та конструкцій, що тривало експлуатуються до 350...400 $^{\circ}\text{C}$ .

3. Сплави, що леговані алюмінієм, ізоморфними  $\beta$ -стабілізаторами та евтектоїдоутворювачами (неперехідними елементами). Сплави цієї групи містять 6...7% алюмінію, кремній та цирконій, що підвищують опір повзучості та тривалу міцність. ВТ8 у відпаленому стані містить  $\alpha$ -фазу, 10%  $\beta$ -фази та дисперсні силіциди. Термообробка ВТ8 – ізотермічне або подвійне відпалення, гартування та старіння. Сплав експлуатують при температурах до 450...500  $^{\circ}\text{C}$ . ВТ9 додатково легований цирконієм, що підвищує жароміцність, для виробів з цього сплаву температура експлуатації сягає 500...550  $^{\circ}\text{C}$ .

4. Сплави титану, що леговані алюмінієм, ізоморфними  $\beta$ -стабілізаторами та евтектоїдоутворювачами (перехідними та неперехідними елементами). При підвищених температурах  $\beta$ -фаза здатна розпадатися за евтектоїдною реакцією, що окрихчує сплав. Представником групи є сплав ВТ3-1, що належить до системи Ti-Al-Cr-Mo-Fe-Si. Сплав призначений для тривалої експлуатації при 400...450  $^{\circ}\text{C}$ . Ізотермічне відпалення ( $T_1=850\text{...}880\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $T_2=600\text{...}650\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) забезпечує отримання структури  $\alpha+\beta$ , із вмістом  $\beta$ -фази – 15%. Після такої обробки сплав має максимальну пластичність та високу термічну стабільність. Також для сплаву застосовують подвійне відпалення та зміцнювальну обробку.

***Деформівні псевдо- $\beta$  та  $\beta$ -сплави титану:***

VT15 – псевдо- $\beta$  титановий сплав (3...4%Al, 7...8%Mo, 10...11,5%Cr), що постачається у вигляді листа, смуги, фольги, штамповок, поковок, прутків, профілю. В загартованому стані (780...900 °C → повітря) міцність сплаву  $\sigma_b=880\text{...}1000$  МПа, пластичність – висока ( $\delta=12\text{...}20\%$ ,  $\psi=35\text{...}55\%$ ). Зміцнення відбувається при подальшому старінні (480...550 °C) за рахунок виділення з пересиченої  $\beta$ -фази частинок  $\alpha$ -фази. Властивості сплаву VT15 після старіння:  $\sigma_b=1300\text{--}1500$  МПа,  $\delta=6\%$ .

Недоліком псевдо- $\beta$ -сплавів є низька пластичність зварних з'єднань, пов'язана з неоднорідним розпадом пересиченого  $\beta$ -твердого розчину. Процес зварювання може супроводжуватись ростом зерна, що також погіршує механічні властивості.

VT30 – сплав, що належить до системи Ti-Mo-Zr-Sn має високу технологічну пластичність в загартованому стані, добре обробляється тиском в холодному стані. Міцність сплаву після гартування  $\sigma_b=650\text{--}750$  МПа, після старіння – 1400-1600 МПа. Особливість легування – відсутність алюмінію.

4201 –  $\beta$ -сплав (Ti-33%Mo), що має високу корозійну стійкість. Сплав добре зварюється, характеризується високою технологічною пластичністю. Постачається у вигляді листа, стрічки, фольги, поковок, штамповок, труб, профілю.

## 5. МІДЬ ТА ЇЇ СПЛАВИ

Мідь (Cu) – пластичний метал світло-червоного кольору.

Фізичні властивості. Температура плавлення міді - 1083°C, густина – 8,94 г/см<sup>3</sup>; тип ґратки – ГЦК, параметр  $a=0,3615$  нм, діаметр атома –  $d_{Cu}=0,256$  нм. До особливостей цього металу відносяться висока тепло- та електропровідність. Питома електропровідність при 20°C становить 387 Вт/(м·К), а питомий електроопір –  $1,72 \cdot 10^{-6}$  Ом·см.

Хімічні властивості. Чистій міді притаманна висока корозійна стійкість у звичайних умовах навколишнього середовища та в морській воді, внаслідок утворення на її поверхні тонкої захисної плівки, яка складається з  $CuSO_4 \cdot 3Cu(OH)_2$ . Контакти з вологим повітрям, прісною водою і конденсатом пари практично не впливають на мідь, але впродовж деякого часу на поверхні може утворюватись закис  $Cu_2O$  (зеленого кольору). Мідь погано опирається впливу аміаку, хлористого амонію, лужних ціанідних з'єднань, окислювальних мінеральних кислот, сірчаного газу.

Взаємодія міді з киснем відбувається вже при кімнатній температурі. При температурах до 100°C на поверхні міді утворюється плівка оксиду міді чорного кольору. При більш високих температурах швидкість окислення міді значно зростає і на поверхні утворюється плівка закису міді червоного кольору.

Механічні властивості технічної міді залежно від стану обробки наведені у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Механічні властивості технічної міді (ГОСТ 859-66)

Стан постачання	Показники властивостей	
	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %
Лита	150...200	15...25
Прокатана та відпалена	260...270	40...50
Нагартована	400...430	1...2

Технологічні властивості. Завдяки високій пластичності мідь добре обробляється тиском, як у гарячому (при 750...800°C) так і у холодному станах. Із підвищенням температури міцність міді

зменшується, підвищується пластичність, а опір деформуванню падає. Холодна пластична деформація сприяє підвищенню твердості та міцності, реалізується явище наклепу, при цьому пластичність значно зменшується і утворюється текстура деформації. Пластичність міді після холодної деформації може бути відновлена проведенням рекристалізаційного відпалення при температурі 550...600°C. Мідь задовільно зварюється та добре паяється але через високу в'язкість погано піддається різанню.

Маркування. Чиста мідь маркується літерою "М" та цифрою (табл. 5.2).

Таблиця 5.2 – Маркування та хімічний склад технічної міді (ГОСТ 859-66)

Марка міді	M00	M0	M1	M2	M3	M4
Вміст Cu, % (не менш)	99,99	99,95	99,90	99,70	99,5	99,0
Домішки, % (Bi, Pb, O <sub>2</sub> , Fe, P, S)	0,01	0,05	0,10	0,30	0,50	1,0

**Домішки.** Властивості міді суттєво залежать від наявності в ній домішок. За характером взаємодії з міддю всі елементи-домішки можна поділити на три великі групи. До першої групи належать метали, що розчиняються в ґратці міді (Al, Fe, Ni, Zn, Au, Pt, Cd, Sb). Другу групу складають елементи, що практично не розчиняються в міді в твердому стані та утворюють легкоплавкі евтектики (Bi, Pb). Третя група представлена елементами, що утворюють з міддю хімічні сполуки (P, Se, S, O<sub>2</sub>, Te, As).

Елементи першої групи не мають суттєвого впливу на властивості, якщо вміст їх не перевищує кількості, що відповідає міді технічної чистоти (при більшому вмісті ці елементи є легувальними і значною мірою впливають на властивості). Найбільш негативний вплив має *вісмут*. Його розчинність в міді не перевищує 0,001 %. Евтектичні виділення майже чистого вісмуту (99,8%) на межах зерен спричиняють високу крихкість міді та її сплавів при звичайних температурах. При гарячій деформації спостерігається плавлення евтектики на межах зерен міді ( $t_{ем}=270^{\circ}C$ ), зв'язок між зернами порушується, виникають тріщини - спостерігається гарячеламкість

міді. *Сурма* зменшує тепло- та електропровідність міді. *Свинець* спричиняє гарячеламкість міді та її сплавів ( $t_{\text{еет}}=326^{\circ}\text{C}$ ). *Кисень* присутній в міді у вигляді закису  $\text{Cu}_2\text{O}$ , ця сполука має несприятливий вплив на пластичність, технологічність, корозійну стійкість. При проведенні відпалення в атмосфері, що містить водень, атоми водню дифундують в мідь, реагують з  $\text{Cu}_2\text{O}$  і утворюють водяну пару з високим тиском, це спричиняє руйнування – "водородная болезнь".

Реакція описується рівнянням:



Кисень погіршує зварювання та паяння міді. *Сірка* утворює сполуку  $\text{Cu}_2\text{S}$ , що викликає холодноламкість. *Водень* спричиняє пористість відливок, якщо його вміст перевищує граничну розчинність в міді. Фосфор суттєво знижує електропровідність та теплопровідність міді, однак позитивно впливає на технологічні властивості (рідинноплинність і зварюваність).

Застосування. Мідь технічної чистоти використовується у вигляді листів, труб, дроту. Для виготовлення провідників електричного струму застосовують М0, М1, для електронної техніки - М0б (без кисню).

Виробництво міді (як і алюмінію) є більш енерго- і трудомістким, ніж виробництво чавуну і сталі, тому мідь і алюміній дорожчі за чорні метали. Чиста мідь дуже обмежено застосовується у машинобудуванні (враховують технічну і економічну доцільність). В машинобудуванні широко використовують сплави на основі міді – латуні та бронзи.

Класифікація мідних сплавів.

За способом виготовлення мідні сплави поділяють на деформівні та ливарні, в залежності від змін при  $ТO$  - сплави, що зміцнюються термообробкою, та сплави, що не зміцнюються при термічній обробці. За хімічним складом мідні сплави поділяють на латуні, бронзи та мідно-нікелеві сплави.

Найбільш поширеним є легування міді цинком, алюмінієм, оловом, залізом, кремнієм, марганцем, берилієм та нікелем. Легування міді цими елементами сприяє підвищенню міцності сплавів.

**Латуні.** Латуні – це подвійні або багатоконпонентні сплави, в яких основним легувальним елементом є цинк.

Структура сплавів визначається діаграмою стану Cu-Zn (рис. 5.1).

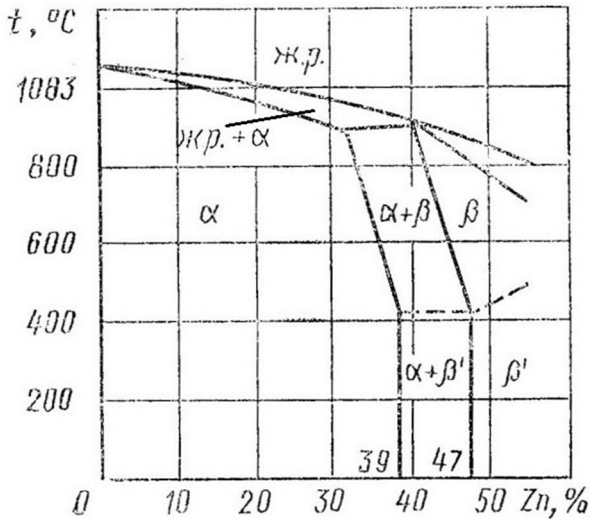
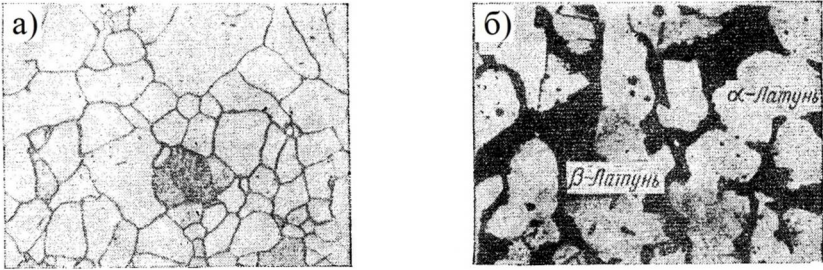


Рисунок 5.1 – Практична частина діаграми стану сплавів системи Cu-Zn.

Із діаграми (див. рис. 5.1) видно, що латуні, які містять до 39% Zn, мають однофазну структуру, яка складається з кристалів твердого розчину заміщення атомів цинку в ГЦК-гратці міді ( $\alpha$ -фаза). В сплавах, що містять від 39 до 47% Zn, окрім  $\alpha$ -фази, міститься також  $\beta$ -фаза. Вона являє собою твердий розчин на базі електронної сполуки CuZn зі співвідношенням 3/2 (кількість електронів / кількість атомів), тип ґратки – ОЦК. При високих температурах  $\beta$ -фаза має неупорядкований розподіл атомів у структурній ґратці, тому в цьому стані є пластичною. При зниженні температури до 453...470°C розподіл і місцезнаходження атомів міді та цинку становиться впорядкованим і тому при низьких температурах вона позначається  $\beta'$ -фаза. Це перетворення супроводжується зростанням твердості та крихкості, одночасно зменшенням пластичності, тому  $\alpha + \beta$  – латуні оброблюються тиском тільки у гарячому стані. Структури однофазної  $\alpha$  - латуні та двофазної  $\alpha + \beta$  – латуні наведено на рисунку 5.2.



а

б

а – однофазна  $\alpha$ -латунь; б – двофазна  $\alpha + \beta$  латунь;

Рисунок 5.2 – Структури латуней,  $\times 150$ .

Механічні властивості. В промисловості використовують латуні зі структурою  $\alpha$  або  $\alpha + \beta$ , вміст цинку не перевищує 40...45%. Максимальна пластичність відповідає сплавам з 30% цинку. Міцність інтенсивно зростає при появі в структурі  $\beta$ -фази. При досягненні концентрації 48% Zn при кімнатній температурі структура складається з однієї  $\beta'$ -фази, через її високу крихкість різко зменшується міцність сплавів (рис. 5.3).

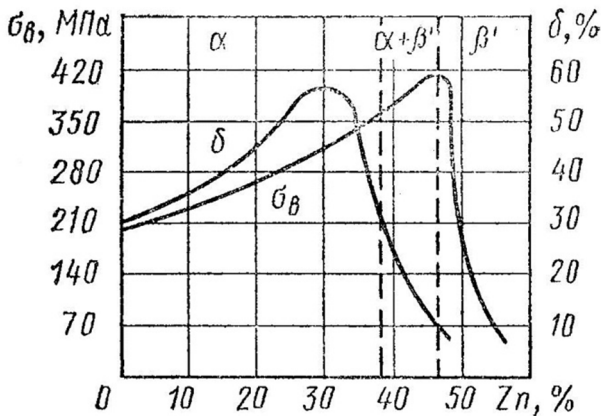


Рисунок 5.3 – Вплив вмісту цинку на механічні властивості латуней.

Технологічні та експлуатаційні властивості. За способом виготовлення деталей розрізняють *ливарні* та *деформівні* латуні. Ливарні властивості латуней визначаються взаємним розміщенням ліній солідусу та ліквідусу. Оскільки інтервал кристалізації  $\alpha$ - та  $\beta$ -фаз вузький, латуні мало схильні до ліквідації, мають добру рідкотекучість. Ливарні латуні мають високі антифрикційні властивості та невелику схильність до газонасичення. До *недоліків* належать великі об'єми усадкової порожнини, що значно знижує коефіцієнт використання матеріалу  $K_{\text{вм}}$ , та схильність ливарних латуней, із значною кількістю  $\beta$ -фази, до сезонного розтріскування.

Латуні добре піддаються деформуванню, широко застосовуються при виготовленні катаного напівфабрикату (стрічка, дріт, профіль). Обробка тиском при кімнатній температурі двофазних латуней ускладнена наявністю крихкої складової ( $\beta$ -фази), тому найчастіше їх деформують при підвищених температурах (вище 453...470°C), коли існує більш пластична  $\beta$ -фаза (не впорядкована).

З метою підвищення міцності для деформівних латуней застосовують нагартування – холодну деформацію зі ступенем деформування 50...60%. Така обробка дозволяє підвищити границю міцності латуні на 250...300 МПа, що становить практично вдвічі. Але ця обробка використовується з певними обмеженнями тому, що слід враховувати схильність деяких латуней до сезонного розтріскування.

На якість штампованих виробів значний вплив оказує розмір зерен. Діаметр зерен повинен бути не більше 30...60 мкм. При більшому розмірі зерен поверхня штамповок шорстка ("апельсинова кірка"), а при меншому – виникають тріщини при глибокому витягуванні.

*Недоліком* латуней є схильність до корозійного розтріскування у вологій атмосфері («сезонне розтріскування»), якщо в металі після деформації збереглися залишкові напруження. Найчастіше це явище спостерігається в латунях, що містять понад 20% Zn. Запобігає появі цього недоліку відпалення напівфабрикатів при 270...300°C.

Маркування. Латуні, що містять тільки мідь та цинк, називаються подвійними. Позначаються літерою Л та цифрами, що вказують середній вміст міді (наприклад, Л70 містить 70% Cu та 30% Zn).

З метою підвищення механічних характеристик і надання латуням спеціальних властивостей їх легують різними елементами.

Такі латуні називаються багатокомпонентними. При наявності в латуні легувальних елементів у марках латуней за літерою Л додають додаткові літери, які позначають: А – алюміній, Ж – залізо, К – кремній, Мц – марганець, Мг – магній, Н – нікель, О – олово, С – свинець, Ф – фосфор. Перші дві цифри вказують середній вміст міді, а всі наступні, що відокремлені дефісом, – середній вміст легувальних елементів. Наприклад: ЛС59-1 – латунь, що містить 59% Cu, 1% Pb, 40% Zn; ЛАЖМц66-6-3-2 – деформована латунь, що містить 66% Cu, 6% Al, 3% Fe, 2% Mn, решта – 23% Zn.

Вміст цинку в латунях не зазначають, за винятком ливарних (ЛЦ40СІ: ливарна латунь, з вмістом Zn 40% та 1% Pb, решта – 59% – мідь.) Латуні для фасонного лиття маркують подібно до деформівних, однак після складу зазначають спосіб виготовлення деталі (ЛА67-2,5 Л (Л - лита); ЛМцЖ55-3-1Л).

Спеціальні латуні називають за основним додатковим елементом: алюмінієві, кремнієві, марганцеві, нікелеві, олов'яні, свинцеві.

Вплив легування. Для поліпшення властивостей латуні додатково легують алюмінієм, марганцем, залізом, нікелем, оловом, свинцем, кремнієм, вміст яких коливається від 1 до 4%. Всі легувальні елементи, окрім нікелю, зменшують розчинність цинку в міді та сприяють збільшенню кількості β-фази. При введенні нікелю розчинність цинку в міді збільшується, частка β-фази зменшується. Для прогнозування властивостей легованих латуней необхідно розрізняти α- та α+β-латуні, враховуючи вплив легувальних елементів на граничну розчинність цинку. Гійє запропонував розраховувати для легованих латуней вміст еквівалентного цинку (X), що враховує розчинність легувальних елементів (табл. 5.3):

$$X = [(A + \sum c K) / (A + B + \sum c K)] 100 \%, \quad (5.2)$$

де  $A$  - дійсний вміст цинку в сплаві, %;

$B$  - вміст міді, %;

$c$  - кількість елемента, що додається в латунь, %;

$K$  - коефіцієнт Гійє.

Таблиця 5.3 – Коефіцієнти Гійє

Si	Al	Sn	Pb	Fe	Mn	Ni
----	----	----	----	----	----	----

10...12	4...6	2	1	0,9	0,5	-1,4
---------	-------	---	---	-----	-----	------

Коефіцієнти Гіє вказують, якій кількості цинку відповідає введення в мідь 1 % легувального елемента.

*Приклад:* латунь ЛМцА57-3-1

$$X = [(39 + 3 \cdot 0,5 + 1 \cdot 6) / (39 + 57 + 3 \cdot 0,5 + 1 \cdot 6)] \cdot 100\% = 45\%$$

Отже така латунь є двофазною, зі значною кількістю  $\beta$ -фази, хоча сплав з 39% цинку в двокомпонентній системі знаходиться поблизу граничної розчинності цинку в  $\alpha$ -фазі.

Алюміній, олово, марганець підвищують границю міцності латуней. Залізо та марганець (до 2...3%) підвищують відносно подовження, решта - зменшує. Залізо сприяє подрібненню структури, є центром кристалізації та прискорює рекристалізацію.

Алюміній, марганець, олово, нікель підвищують корозійну стійкість, за рахунок створення щільної оксидної плівки та поверхні латуні. Свинець полегшує оброблюваність різанням і покращує антифрикційні властивості латуні, однак зменшує значення границі міцності.

**Термічна обробка латуней.** Основна операція – відпалення. Мета обробки - пом'якшення матеріалу перед подальшою обробкою тиском, отримання в напівфабрикатах певного рівня властивостей, запобігання сезонному розтріскуванню. Рекристалізаційне відпалення проводять при 600...700°C (легувальні елементи підвищують температуру рекристалізації латуней).

Застосування латуней. Для виготовлення гвинтів, гайок використовують ЛАЖМц66-6-3-2Л ( $\sigma_b=600\text{...}650$  МПа,  $\delta=7\%$ ). При виготовленні підшипників використовують ЛЖМц52-4-1Л ( $\sigma_b=500$  МПа,  $\delta=15\%$ ). Для відливок складної форми (шестерні, деталі насосів, деталі вузлів тертя) використовують ЛК80-3Л.

*Деформівні латуні:* Л96 – (96% Cu, 4% Zn), Л80 – (80% Cu, 20% Zn), Л090-1 – (90% Cu, 1% Sn, 9% Zn) – *однофазні  $\alpha$ -латуні*. Латунь з високим вмістом міді – *томпак*. Застосовують при виготовленні стрічок, дроту, трубок, штампованих деталей.

*Двофазні деформівні латуні:* Л060-1 – характеризується високим рівнем корозійної стійкості в морській воді («морська латунь»). ЛЖМц59-1-1 – має високий рівень міцності, в'язкості (дрібнозерниста структура), антифрикційних властивостей, стійка в морській воді та

атмосферних умовах. Легування свинцем ЛС59-1 застосовується для поліпшення обробки різанням («автоматна латунь»).

На залізничному транспорті латуні використовують як матеріал для вкладишів підшипників ковзання, втулок, арматури, виготовлення різних деталей у засобах автоматики і зв'язку.

У газовому господарстві широко застосовується інструмент із латуні, який забезпечує вибухопожежну безпеку при роботах із горючими газами (відсутність іскроутворення).

В таблицях 5.4 і 5.5 наведено хімічний склад і механічні властивості звичайних та спеціальних латуней.

Таблиця 5.4 – Хімічний склад і механічні властивості звичайних  $\alpha$ -латуней (ГОСТ 15527-70)

Марка латуні	Хімічний склад (домішки 0,2...0,5; решта – Zn), %	$\sigma_b$ МПа	$\sigma_{0,2}$ МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %
	Си				
Л96	95...97	240	-	50	-
Л90	88...91	260	120	45	80
Л85	84...86	280	100	45	85
Л80	79...81	320	120	52	70
Л70	69...72	320	90	55	70
Л68	67...70	320	90	55	70
Л62	60,5...63,5	330	110	49	66

Таблиця 5.5 – Хімічний склад і механічні властивості спеціальних латуней (ГОСТ 15527-70)

Марка латуні	Структура	Хімічний склад (домішки 0,25-1,5), %		$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %
		Cu	легуючі компоненти				
ЛС74-3	$\alpha$	72...75	2,4...3,0 Pb	350	100	50	-
ЛС64-2	$\alpha$	53...66	1,5...2,0 Pb	350	100	55	60
ЛС63-3	$\alpha+\beta$	62...65	2,4...3,0 Pb	350	120	55	-
ЛС60-1	$\alpha+\beta$	59...61	0,6...1,0 Pb	370	130	45	-
ЛС59-1	$\alpha+\beta$	57...60	0,8...1,9 Pb	400	140	45	-
ЛС90-1	$\alpha$	88...91	0,25...0,75 Sn	280	90	45	55
ЛО70-1	$\alpha$	69...71	1,0...1,5 Sn	350	100	60	70
ЛО62-1	$\alpha$	61...63	0,7...1,1 Sn	400	150	40	-
ЛО60-1	$\alpha+\beta$	59...61	1,0...1,5 Sn	380	150	40	46
ЛА80-0.5	$\alpha$	84...86	0,4...0,7 Al	300	-	60	50
ЛА77-2	$\alpha$	76...79	1,75...2,5 Al	400	-	55	58
ЛН65-5	$\alpha$	64...67	5,0...6,5 Ni	400	170	65	-
ЛМц58-2	$\alpha+\beta$	57...60	1,0...2,0 Mn	400	-	40	50
ЛК80-3	$\alpha+\beta$	79...81	2,5...4,0 Si 0,75...1,5 Al	300	-	58	-
ЛАЖ60-1-1	$\alpha+\beta$	58...61	0,75-1,5 Fe 0,1-0,6 Mn 2,5...3,5 Al	450	200	45	30
ЛАН59-3-2	$\alpha+\beta$	57...60	2,0...3,0 Ni 0,6...1,2 Fe 0,5...0,8 Mn	380	300	50	-
ЛЖМц59-1-1	$\alpha+\beta$	57...60	0,1...0,2 Al 0,3...0,7 Sn 2,5...3,5 Mn	450	170	50	55
ЛМцА57-3-1	$\alpha+\beta$	55...58,5	0,5...1,5 Al	550	-	25	-

Примітка. \*Решта – Zn.

**Бронзи.**

Бронзи – це сплави міді з оловом, алюмінієм, свинцем, кремнієм, марганцем, берилієм. В залежності від основного

легувального елемента розрізняють *олов'яні, алюмінієві, берилієві, кремнієві, марганцеві, свинцеві* та ін.

**Маркування.** Марки бронзи позначаються літерами Бр та іншими літерами і цифрами відповідно легувальним компонентам та їх вмісту. Основні легувальні компоненти бронз: О – олово, А – алюміній, Б – берилій, Ж – залізо, К – кремній, Мц – марганець, Н – нікель, С – свинець, Ц – цинк, Ф – фосфор. Наприклад, бронза марки Бр.ОЦС3-12-5 містить 3%Sn, 12%Zn, 5%Pb і 80%Cu; бронза Бр.АЖМц10-3-1,5 містить 10% Al, 3%Fe, 1,5%Mn, решта 85,5%Cu.

Серед бронз найбільше використання отримали олов'яні бронзи.

**Олов'яні бронзи. Структура.** Відповідно до практичної частини діаграми стану системи Cu-Sn (рис. 5.4) в ній існують наступні фази:  $\alpha$ -твердий розчин олова в міді з ГЦК ґраткою (вміст Sn<14%, розчинність Cu в Sn<0,01%);  $\beta$ -твердий розчин на основі електронної сполуки Cu<sub>5</sub>Sn (електронна концентрація - 3/2),  $\delta$ -твердий розчин на основі електронної сполуки Cu<sub>31</sub>Sn<sub>8</sub> (21/13),  $\varepsilon$ -твердий розчин на основі сполуки Cu<sub>3</sub>Sn (7/4),  $\gamma$ -твердий розчин на основі хімічної сполуки якої ще не встановлена.

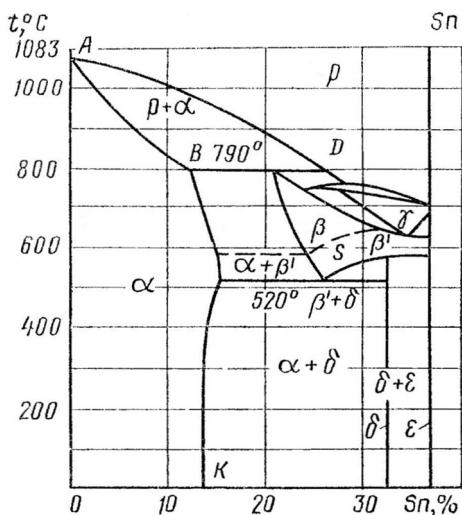
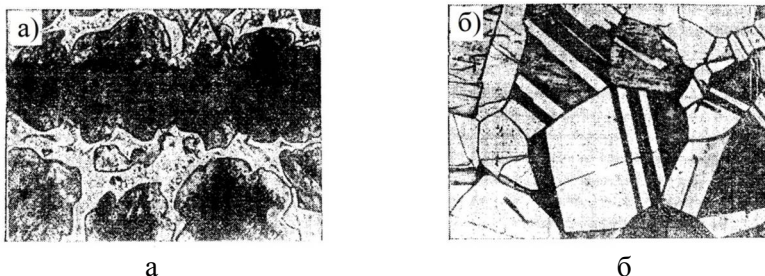


Рисунок 5.4 – Практична частина діаграми стану сплавів Cu-Sn.

Бронза у рівноважному стані, яка містить до 14%Sn, являє собою однофазний  $\alpha$ -твердий розчин олова в міді зі змінною концентрацією.

У зв'язку зі значним інтервалом температур між лініями ліквідуса і солідуса однофазні олов'яні бронзи мають значну дендритну ліквідацію. При цьому мідь концентрується в осях дендритів, а олово – у міждендритному просторі. Структура реальних сплавів, що отримані при прискореному охолодженні, суттєво відрізняється від рівновісних. У литих бронзах, які містять більш 8% Sn, по кордонах зерен утворюється евтектоїд  $\delta$ , що складається із суміші  $\alpha$ -твердого розчину і електронного з'єднання (інтерметаліда)  $Cu_{31}Sn_8$ . Дендритна ліквідація в бронзах виправляється за рахунок відпалювання при 550...700°C (рис. 5.5).



а – лита; б – після відпалу;

Рисунок 5.5 – Мікроструктура литої олов'яної бронзи,  $\times 150$ .

На рисунку 5.5 зони світлого кольору – збагачені на мідь, а зони темного кольору – збагачені на олово.

Термічна обробка. Термічна обробка олов'яних бронз застосовується з метою полегшення обробки тиском та зменшення ліквідації. Гомогенізація проводиться при температурі 700...750°C з наступним швидким охолодженням. Найкраща пластичність може бути досягнута, якщо при охолодженні з температури гомогенізації забезпечується витримка при температурі 600...625°C та подальше прискорене охолодження. З метою зняття внутрішніх напружень у відливках проводять відпалення при 550°C впродовж 1 години. Проміжне відпалення при холодній обробці проводять при 550...700°C.

Механічні властивості. Пластичність литих бронз різко зменшується при вмісті олова понад 8%. Границя міцності зростає із збільшенням концентрації, максимальний рівень відповідає 24% олова, надалі міцність різко зменшується через надмірну кількість крихкої  $\delta$ - фази (рис. 5.6).

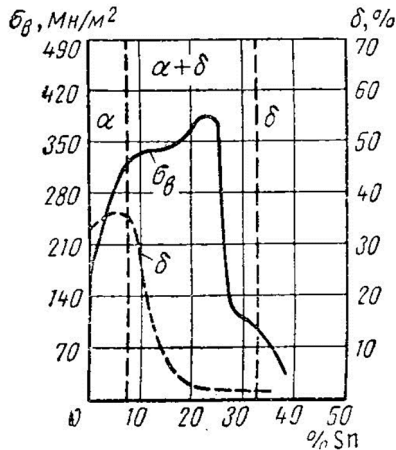


Рисунок 5.6 – Залежність механічних властивостей олов'яних бронз від вмісту Sn.

Хімічний склад, механічні властивості і призначення ливарних і деформовних олов'яних бронз наведено у таблицях 5.6 і 5.7.

#### Технологічні та експлуатаційні властивості.

Олов'яні бронзи. За корозійною стійкістю в морській воді - кращі за мідь та латуні. Мають низьку ливарну усадку ( $\approx 1\%$ ) - використовуються для складних відливок із значною різницею у перерізах. Бронзи з наявністю в структурі евтектоїда ( $\alpha+\delta$ ) забезпечують стійкість до зносу і використовуються як антифрикційний матеріал. Наявність доброї рідинноплинності та невисокої температури плавлення робить бронзу виключно гарним матеріалом для отримання вливок. Завдяки високій хімічній стійкості вони широко застосовуються для виготовлення водяної та парової арматури. У бронзи для покращення їх властивостей, а також з метою здешевлення вводять додатково Zn, Ni, Mn, P та інші елементи.

Таблиця 5.6 – Хімічний склад, механічні властивості та призначення ливарних олов'яних бронз (ГОСТ 613-65)

Марка бронз	Хімічний склад (Cu-основа; домішки – 1,3), %			$\sigma_{\text{в}}$ , МПа	$\delta$ , %	НВ, МПа	Призначення
	Sn	Zn	Pb				
Бр.ОЦСНЗ-7-5-1	2,5...4,0	6,0...9,5	3,0...6,0 (0,5...2,0Ni)	180...210	8...5	600	Арматура, яка працює у морській і прісній воді, мастилах і інших слабокорозійних середовищах, а також у парах при тиску до 25 кгс/см <sup>2</sup> , антифрикційні деталі
Бр.ОЦСЗ-12-5	2,0...3,5	8,0...15,0	3,0...6,0	180...210	8...5	600	Арматура, яка працює у прісній воді і парах під тиском до 25 кгс/см <sup>2</sup> , антифрикційні деталі
Бр.ОЦС5-5-6	4,0...6,0	4,0...6,0	4,0...6,0	150...180	6...4	600	Антифрикційні деталі
Бр.ОЦС4-4-17	3,5...5,0	2,0...6,0	14,0...20,0	150		600	
Бр.ОЦСЗ, 5-7-5	3,0...4,5	6,0...9,5	3,0...6,0	150...180		600	

Таблиця 5.7 – Хімічний склад, механічні властивості та призначення деформовних олов'яних бронз (ГОСТ 5017-49)

Марка бронз	Хімічний склад (Cu-основа; домішки – 0,04-0,07), %		$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	НВ, МПа	Призначення
	Sn	інші				
Бр.0ф6,5-0,15	6...7	0,1...0,25 P	350...450	60...70	700...900	Стрічки, смуги, прутки, дріт для пружин, підшипникові деталі
Бр.0ф4-0,25	3,5...4,0	0,2...0,3 P	340	52	550...700	Трубки, що застосовуються в апаратобудуванні і для контрольно-вимірювальних приладів
Бр.ОЦ4-3	3,5...4,0	2,7...3,3 Zn	350	40	600	Стрічки, смуги, прутки, дріт для пружин і апаратури в хімічній промисловості
Бр.ОЦ4-4-2,5	3...5	3...5 Zn 1,5...3,5 Pb	300...350	35...45	600	Стрічки і смуги для прокладок у втулках і підшипниках

Олов'яні бронзи легують *цинком* в межах його розчинності в  $\alpha$ -фазі (14%) для підвищення технологічності, міцності, зменшення вартості. *Нікель* поліпшує пластичність та здатність до деформування бронз, підвищує корозійну стійкість, щільність, зменшує ліквідацію, сприяє підвищенню міцності. *Фосфор* розкислює мідь; підвищує границю міцності, пружності, витривалості; поліпшує рідкотекучість; частинки фосфіда міді ( $\text{Cu}_3\text{P}$ ) підвищують зносостійкість, але в деформівних бронзах вміст фосфору обмежують ( $\text{P} < 0,5\%$ ). Свинець розподіляється у вигляді окремих включень і значно полегшує злам стружки при обробленні різанням, чим покращує оброблюваність. Залізо – забезпечує подрібнення зерна.

Застосування. Окремі області застосування наведено у таблицях 5.6 і 5.7. Також з деформівних бронз виготовляють пружини, мембрани, антифрикційні деталі: БрОЦ4-3 (бронза олов'яна, 4% Sn, 3% Zn, решта – мідь), БрОФ6-0,15, БрОЦС4-4-2,5. Ливарні бронзи поділяють на машинні (БрОЗЦ12С5, БрОЗЦ7С5Н1), призначені для фасонного лиття деталей машин, та антифрикційні (БрО5Ц5С5) – для виготовлення підшипників. Машинні – мають високу корозійну стійкість. Для художнього лиття використовують бронзи БХ1, БХ2, БХ3, що містять олово та фосфор.

Безолов'яні бронзи. До безолов'яних відносяться алюмінієві, кремнієві, берилієві, марганцеві та свинцеві бронзи.

Алюмінієві бронзи є сплавами Cu з 4,0...11,5% Al, у які для покращення властивостей додатково вводять Fe, Ni, Mn.

Структура. За діаграмою стану в системі Cu-Al (рис. 5.7) існують:  $\alpha$ -фаза – твердий розчин алюмінію в ГЦК гратці міді,  $\beta$ -фаза – твердий розчин на основі електронної сполуки  $\text{Cu}_3\text{Al}$  (3/2) з ОЦК граткою,  $\gamma$ -фаза – твердий розчин на основі сполуки  $\text{Cu}_{32}\text{Al}_{19}$ . При температурі 1035°C розчинність алюмінію в міді складає 7,4%, при 565°C – 9,4%, при кімнатній – близько 9%. При охолодженні нижче 565°C  $\beta$ -фаза розпадається за евтектоїдною реакцією:  $\beta \rightarrow \alpha + \gamma$ .

На рисунку 5.8 наведено мікроструктуру бронзи Бр.АЖМц10-3-1,5, яка складається із зерен  $\alpha$ -фаз (світла складова) і  $\alpha + \beta$  – евтектоїда (темна складова).

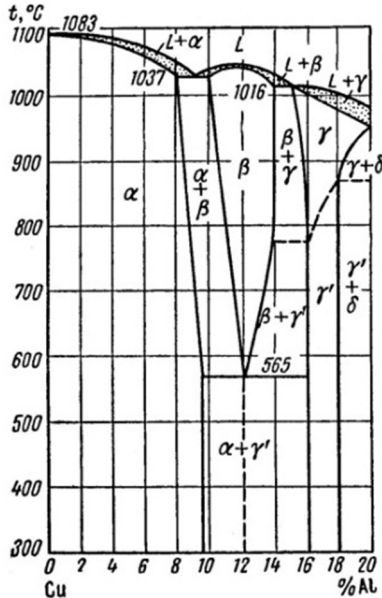


Рисунок 5.7 – Практична частина діаграми стану сплавів системи Cu-Al.

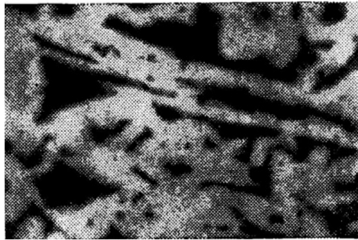


Рисунок 5.8 – Мікроструктура алюмінієвої бронзи, х300.

Термічна обробка. Зміцнювальна термічна обробка складається з гартування з 850...900°C у воду і наступного відпуску при 400...600°C впродовж 1,5 год.

Для деформівних бронз застосовують рекристалізаційне та дорекристалізаційне відпалення. Для БрАЖН100-4-4 застосовують гартування 980°C та старіння 400°C, при цьому твердість та границя міцності зростає вдвічі.

Властивості алюмінієвих бронз та призначення. Алюмінієві бронзи за рівнем механічних властивостей близькі до олов'яних, водночас, вони мають певні переваги:

- нижчу вартість;
- меншу схильність до дендритної ліквідації;
- велику щільність відливок;
- кращу рідкотекучість;
- більшу міцність та жароміцність;
- вищий рівень корозійної стійкості;
- не утворюють іскор при ударі.

*Недоліками* цих бронз є значна усадка при кристалізації, схильність до утворення стовпчатих кристалів та сильне окислення розплаву, що спричиняє шиферний злам у деформованих напівфабрикатах.

Однофазні сплави з структурою  $\alpha$ -твердого розчину мають високу пластичність, найвищим її рівнем характеризуються сплави з вмістом алюмінію 4...5%. Міцність однофазних сплавів є невисокою. Найвищий рівень міцності мають сплави, що містять  $\gamma_2$ -фазу, при вмісті алюмінію  $\approx 9\%$ . Подальше зростання вмісту алюмінію супроводжується збільшенням в структурі частки  $\gamma_2$ -фази, що розміщується на межах зерен у вигляді суцільних ланцюжків, що приводить до окрихчення сплавів. Певна кількість  $\gamma_2$ -фази є бажаною при використанні сплаву як антифрикційного матеріалу (тверді частинки фази сприяють підвищенню зносостійкості). Оптимальним комплексом властивостей (висока міцність – достатня пластичність) характеризуються бронзи з вмістом алюмінію 5...8% (табл. 5.8).

Таблиця 5.8 – Хімічний склад, механічні властивості та призначення алюмінієвих бронз (ГОСТ 1048-70)

Марка бронз	Хімічний склад (Cu-основа; домішки – 0,75...2,8), %			$\sigma_b$ МПа	$\delta$ , %	НВ, МПа	Призначення
	Al	Fe	інші				
Бр. А5	4...6	-	-	-	-	-	Стрічки, смуги
Бр. А7	6...8	-	-	-	-	-	Стрічки, смуги
Бр. АМц9-2	8...10	-	1,5...2,5 Mn	-	-	-	Прутки, смуги, стрічки
Бр. АМц9-2Л*	8...10	-	1,5...2,5 Mn	400	20	800	Фасонне лиття
Бр. АМц10-2	9...11	-	1,5...2,5 Mn	500	12	1100	Фасонне лиття
Бр. АЖ9-4	8...10	2...4	-	-	-	-	Прутки
Бр. АЖ9-4Л	8...10	2...4	-	400	10	1000	Поковки і фасонне лиття
Бр. АЖМц10-3- 1,5	9...11	2...4	1...2 Mn	500	12	1000	Прутки, поковки, труби і фасонне лиття
Бр. АЖС7-1,5-1,5	6...8	1...1,5	1...1,5 Pb	500	12	1200	Фасонне лиття
Бр. АЖН 10-4-4	9,5...11	3,5...5,5	3,5...5 Ni	-	-	-	Прутки, труби
Бр. АЖН10-4-4Л	9,5...11	3,5...5,5	3,5...5,5 Ni	600	5	1700	Поковки і фасонне лиття
Бр. АЖН 11-6-6	10,5...11,5	5...6,5	5...6,5 Ni	600	2	2300	Фасонне лиття

Примітка. \*Л – ливарні бронзи

### Вплив легування на структуру та властивості.

*Алюмінієві бронзи легують марганцем, залізом, нікелем, свинцем. Марганець* сприяє одночасному зростанню міцності та пластичності, підвищує корозійну стійкість, оброблюваність тиском у холодному стані, покращує антифрикційні властивості. Марганець може вводиться до сплавів у значній кількості, оскільки він має розчинність в твердому розчині до 10%. *Залізо* підвищує міцність при певному зменшенні пластичності. Позитивний вплив заліза пов'язаний з подрібненням структури при первинній кристалізації, рекристалізацією та уповільненням евтектоїдного розпаду  $\beta$ -фази. Після нормалізації з 600...700°C в сплавах, які леговані залізом, зменшується кількість евтектоїду, пластичність є максимальною. Алюмінієві бронзи, леговані залізом, зміцнюються термічною обробкою (гартування 950°C + старіння 250...300°C) внаслідок утворення тонкодисперсної структури. *Нікель* поліпшує механічні властивості бронз, жароміцність, полегшує обробку тиском. *Свинець* підвищує антифрикційні властивості. *Титан* підвищує міцність,

зменшує газонасиченість. *Цинк є небажаною домішкою* в алюмінієвих бронзах – погіршує технологічність та антифрикційні властивості.

Кремнієві бронзи є сплавами міді, які містять 0,6...3,5 % Si. Подвійні сплави не використовують, найбільш поширене легування нікелем (до 3%) та марганцем (до 1,5%). Легування сприяє підвищенню опору корозії, збільшує міцність. Нікель утворює сполуку  $Ni_2Si$ , що забезпечує зростання міцності після гартування та старіння. Кремнієві бронзи мають високі пружні та антифрикційні властивості. Піддаються обробленню литтям, різанням і тиском у гарячому стані; задовільно зварюються з бронзами та сталлю, не утворюють іскор при ударі; здатні до зміцнення загартовуванням; виступають економічними заміниками олов'яних бронз при виготовленні антифрикційних деталей (Бр.КН1-3) або берилієвої бронзи при виготовленні пружин і пружних деталей радіообладнання (Бр.КМц 3-1). *Недолік* – висока здатність до поглинання газів.

Берилієві бронзи – це сплави Cu-Be, які містять 1,6...2,2% Be.

Берилієві бронзи добре зварюються, оброблюються різанням і піддаються гарячій обробці тиском. Ці сплави є дисперсно твердіючими. При температурі 866°C розчинність берилію в міді складає 2,7%, при кімнатній - не перевищує 0,2%, це дозволяє ефективно зміцнювати сплави термічною обробкою. Структура промислових сплавів (вміст Be не більш 2,5%) складається з  $\alpha$ -твердого розчину з ГЦК граткою та  $\gamma$ -фази на основі CuBe (рис 5.9).

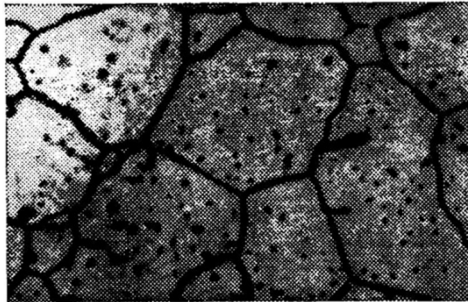


Рисунок 5.9 – Мікроструктура берилієвої бронзи Бр.Б2, x250.

Термічна обробка, що складається з гартування з 780...800°C у воду та наступного штучного старіння при 300...350°C впродовж

9 годин, надає берилієвим бронзам високі міцність і твердість (табл. 5.9).

Таблиця 5.9 – Хімічний склад, механічні властивості та призначення берилієвих бронз (ГОСТ 1789-70)

Марка бронз	Хімічний склад (Cu-основа; домішки – 0,5), %			Механічні властивості (після гартування при 800°C у воді і старінні при 325°C			Призначення
	Be	Ni	Ti	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	НВ, МПа	
Бр.Б2	1,9...2,2	0,2...0,5	-	1300	1	370	Стрічки, смуги, прутки і дріт, мембрани, пружини: деталі, що працюють на зношування тертям.
Бр.БНТ 1,7	1,60...1,85	0,20...0,40	0,10...0,25	-	-	-	
Бр.БНТ 1,9	1,85...2,10	0,20...0,40	0,10...0,25	-	-	-	

Для легування берилієвих бронз використовують Ti та Ni. Ці елементи подрібнюють зерно та утворюють сполуки, що підвищують міцність після термообробки (БрБНТ 1,9). Використання цих бронз обмежується високою вартістю берилію та його токсичністю.

**Марганцеві бронзи.** Марганець розчиняється в міді до 22% при кімнатній температурі, тому бронзи, що містять менше 22% марганцю, мають однофазну структуру –  $\gamma$  (твердий розчин марганцю в міді). Марганець дозволяє підвищити міцність бронзи без втрати пластичності, поліпшує корозійну стійкість, сприяє підвищенню жароміцності, на 150...200°C підвищує температуру рекристалізації міді. Марганцеві бронзи добре обробляються тиском, мають нижчу вартість за олов'яні. Найбільш поширена бронза БрМц5, що має високу корозійну стійкість та зберігає високі показники механічних властивостей при підвищених температурах ( $\sigma_b=300$  МПа,  $\delta=40$  %). Для легування марганцевих бронз використовують алюміній, нікель, залізо, кремній, свинець. Залізо, нікель, кремній підвищують твердість та міцність, алюміній поліпшує ливарні властивості, свинець - сприяє підвищенню технологічності при обробці різанням та покращує антифрикційні властивості.

*Сплави з високим внутрішнім тертям* – сплави високого демпфування. На основі системи Cu-Mn розроблені сплави, що здатні гасити коливання, що виникають в деталях машин при експлуатації. При використанні цих сплавів зменшуються вібрації, шум, зменшується загроза руйнування через резонансні явища. Ці сплави

містять 60...85%Mn. Найкращі властивості спостерігаються після гартування з  $\gamma$  – області та старіння при 450°C ( $\sigma_b=620...770$  МПа,  $\delta =20...25\%$ ). При гартуванні під час мартенситного перетворення в тетрагональній гратці виникають двійники, з відносно стабільними межами, та мікродвійники (в середині крупних) з рухомими межами. Під дією напружень мікродвійники легко пересуваються, після зняття напружень – переміщуються у зворотньому напрямку, на цей процес витрачається енергія коливань.

Свинцеві бронзи є сплавами Cu-Pb, які містять 27...63 % Pb. Сплави характеризуються високими антифрикційними властивостями, застосовуються при виготовленні підшипників ковзання потужних турбін, авіаційних двигунів, дизелів, тощо. До переваг цих матеріалів належать висока теплопровідність, здатність витримувати нагрівання до 300...320°C, що є важливим для швидкохідних машин. Відповідно до діаграми стану Cu-Pb при температурі 327°C починається кристалізація свинцю, що заповнює міждендритні ділянки в міді. Формується структура, що поєднує міцні ділянки міді з м'яким свинцем.

Додатково бронзи легують нікелем, що сприяє подрібненню дендритів, перешкоджає ліквідації міді та свинцю за густиною. Тверді кристали сприймають тиск вала, поштовхи, поступово занурюються у м'яку складову, що поступово стирається, заповнюючи відстань між валом та підшипником змащенням і дисперсними частинками.

BrC30 – свинцева бронза, вміст свинцю – 30%, використовується в біметалевих підшипниках. Для забезпечення більшої міцності та твердості бронза наплавляється на сталеву трубку або стрічку. BrCN60-2,5 - бронза свинцева, легована нікелем (60% Pb; 2,5% Ni).

**Сплави системи Cu-Ni.** Сплави цієї системи характеризуються високою корозійною стійкістю, добре обробляються тиском, мають високі електричні та термоелектричні властивості. Мідь та нікель утворюють між собою тверді розчини, що відповідають діаграмі з необмеженою розчинністю компонентів (рис. 5.10).

Температура плавлення міді – 1083°C, нікелю – 1453°C. Обидва компонента мають ГЦК гратки, атоми близькі за розмірами, мають подібну електронну будову. Максимальна твердість, міцність, електроопір в сплавах спостерігається приблизно при 50% нікелю.

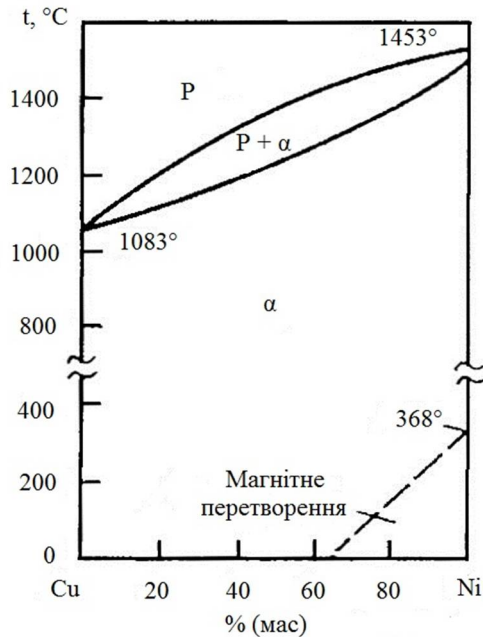


Рисунок 5.10 – Діаграма стану Cu-Ni.

Сплави системи Cu-Ni найчастіше використовують як *корозійностійкі* та *електротехнічні*. Серед корозійностійких найбільш відомими є мельхіори, нейзильбери, куніалі.

*Мельхіори* – належать до системи Cu-Ni. Це однофазні сплави, що добре обробляються тиском в гарячому та холодному стані. Мельхіори мають високий рівень міцності, що може бути підвищений нагартовкою. Мельхіори стійкі в середовищі, що містить пари морської води. Для підвищення опору корозії у морській воді сплави додатково легують залізом та марганцем. МН19 – мельхіор, що містить 19% нікелю. МНЖМц30-1-1 – мельхіор містить 30% нікелю та легований залізом (1%) і марганцем (1%).

*Нейзильбери* – сплави, що належать до потрійної системи Cu-Ni-Zn. Вміст нікелю складає від 5 до 35%, цинку – від 13 до 45%. За цих умов сплави мають переважно однофазну структуру. Нейзильбери мають, порівняно з мельхіорами, вищу міцність, добре

обробляються тиском у гарячому та холодному стані, не окислюються на повітрі, стійкі у розчинах органічних кислот, солей, мають сріблястий колір.

МНЦ15-20 – нейзильбер, що містить 15% нікелю, 20% цинку, решта – мідь. Для поліпшення обробки різанням використовують легування свинцем, але це спричиняє гарячеламкість, обробку тиском в цьому випадку рекомендують проводити в холодному стані.

МНЦ16-29-1,8 – нейзильбер, що містить 16%Ni, 29%Zn, 1,8%Pb, використовується при виготовленні деталей годинників.

*Куніалі* – сплави потрійної системи Cu-Ni-Al. Через значну розчинність нікелю та алюмінію в міді при високих температурах та низьку – при зниженні температури, сплави цієї системи ефективно зміцнюються гартуванням та старінням ( $T_{\text{гарт}} = 900 \dots 1000^\circ\text{C}$ ,  $T_{\text{стар}} = 500 \dots 600^\circ\text{C}$ ). Зміцнення забезпечують дисперсні частинки NiAl та Ni<sub>3</sub>Al. Додатковий приріст міцності можливий при застосуванні НТМО: після гартування перед старінням використовують деформацію на 25%. МНА13-3 – куніаль з вмістом нікелю 13%, алюмінію – 3%. МНА6-1,5 (6%Ni; 1,5%Al).

Куніалі мають високі пружні та механічні властивості, корозійностійкі, задовільно обробляються тиском в гарячому стані не схильні до холодноламкості. Міцність та пластичність зростають зі зниженням температури. При 20°C МНА6-1,5 має властивості:  $\sigma_{\text{в}} = 640\text{МПа}$ ,  $\psi = 50\%$ , при -180°C :  $\sigma_{\text{в}} = 700\text{МПа}$ ,  $\psi = 67\%$ .

**Спеціальні мідні сплави.** В електротехніці при виготовленні провідників використовують низьколеговані мідні сплави, *недоліком* цих матеріалів є відносно низька міцність. Застосовують наклеп, легування, термічну та термомеханічну обробку. При холодній деформації 40...70% границя міцності ( $\sigma_{\text{в}}$ ) зростає вдвічі, при зростанні електроопору на 3% (але таке зміцнення ефективно лише до 200°C).

Зміцнюють мідь без втрати електричних властивостей Ag, Cd, Sn, Zr. Вміст кожного з цих елементів у сплавах підбирається таким чином, щоб забезпечити поєднання високої міцності із достатньо високою електропровідністю (табл. 5.10 ): БрСр (~0,1%Ag), БрКд (1%Cd) та ін. Хромисті бронзи з цирконієм (БрХЦр) застосовують для виготовлення електродів контактного зварювання, особливість таких електродів – поєднання високої тепло- та електропровідності з

жароміцністю. Мідь складає основу сплавів, що застосовуються при виготовленні термопар.

Таблиця 5.10 – Хімічний склад та властивості спеціальних бронз.

Марка	Хімічний склад (Cu - решта), %	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	$\rho$ , мкОм·см
Мідь	-	220	45	1,72
БрСр	0,1 Ag	440	14	1,85
БрКд	1,0Cd	420	17	2,28
БрMг0,5	0,5Mg	540	-	3,0
БрMг0,8	0,8Mg	650	-	3,7
БрХ	0,7Сг	450	19	2,03
БрХЦр	0,7Cr, 0,05 Zr	500	24	2,04

*Застосування міді та її сплавів.* Чиста мідь та малолеговані сплави використовуються при виготовленні дротів високовольтних ліній електропередачі, повітряних ліній зв'язку. БрMг0,5, БрMг0,8 – сплави для тролейних дротів.

З міді виготовляють водоохолоджувані форми для лиття, кристалізатори, теплообмінники. З латуней виготовляють радіаторні та конденсаторні трубки, гнучкі шланги, труби, стрічки (бінарні). Л63 – для деталей холодильного обладнання, пружин, прокладок; Л62, Л68 – виготовлення труб теплообмінних апаратів в продовольчому машинобудуванні; багатокомпонентні латуні – в суднобудуванні, теплотехніці, електромашинобудуванні. ЛАЖМц66-3-2-1 – гайки, зажимні гвинти, черв'ячні гвинти. ЛЖМц52-4-1 – для виготовлення підшипників, ЛК80-3Л – для складних за формою деталей, що працюють в агресивному середовищі (деталі насосів, шестерні, деталі вузлів тертя).

Олов'яні бронзи використовують при виготовленні пружин, мембран, антифрикційних деталей (БрОЦ4-3, БрОЦС4-4-2,5); для деталей, що працюють при підвищеному тиску (БрОЦС3-12-5); для виготовлення прокладок підшипників, втулок, шестерен, черв'ячних коліс.

Алюмінієві бронзи – замітники олов'яних в морському суднобудуванні, машино- та авіабудуванні, наприклад, при виготовленні шестерен, втулок. Для виготовлення клапанів, підшипників, пружин використовують БрА10Ж4Н4 ( $t_{експл.} < 500^\circ\text{C}$ ).

Берилієві бронзи – для виготовлення пружин, мембран, пружинних контактів, деталей точного приладобудування; для виготовлення інструменту при роботі у вибухонебезпечних умовах.

Кремнієві – для менш відповідальних пружних елементів.

Свинцеві бронзи – антифрикційний матеріал в підшипниках авіаmotorів, потужних турбін.

Мідно-нікелеві сплави – морське суднобудування, для медичного інструменту, деталей точних приладів, в хімічній та нафтохімічній промисловості, побутове вживання (ножі, ложки, виделки).

## ЛІТЕРАТУРА

1. Сушко О.В. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів: Навчальний посібник / О.В. Сушко, С.В. Кюрчев. – Мелітополь: ТОВ «Видавничий будинок ММД», 2010. – 232 с.

2. Качан О.Я. Авіаційно-космічні матеріали та технології / Качан О.Я., Н.Є. Калініна, В.Ф. Мозговий, В.Т. Калінін. – Запоріжжя: вид комплекс ВАТ «Мотор Січ», 2009. – 383 с.

3. Куцова В.З. Алюміній та сплави на його основі. Навч. посібник / В.З. Куцова, Н.Є. Погребна, Т.С. Хохлова та ін. – Дніпропетровськ: Пороги, 2004. – 135 с.

4. Кузін О.А. Металознавство та термічна обробка металів. Підручник / О.А. Кузін, Р.А. Яцук. – Львів: Афіша, 2002. – 304 с.

5. Бялік О.М. Металознавство: Підручник / О.М. Бялік, В.С. Черненко, В.М. Писаренко, Ю.Н. Москаленко. – К.: ІВЦ «Політехніка», 2001. – 375 с.

6. Хільчевський В.В. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів: Навч. посібник / В.В. Хільчевський, С.Є. Кондратюк, В.О. Степаненко, К.Г. Лопатько. – К.: «Либідь», 2002. – 328 с.

7. Збожна О.М. Основи технології: Навч. посібник / О.М. Збожна. – Тернопіль: Карт-бланш, 2002. – 486 с.

8. Дурягіна З.В. Сплави з особливими властивостями: Навч. посібник / З.А. Дурягіна, О.Я. Лизун, В.Л. Пілюшенко. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2007. – 236 с.

9. Беліков С.Б. Сплави на основі магнію для імплантатів при остеосинтезі / С.Б. Беліков, Ю.М. Колесник, В.А. Шаломеев, Е.І. Цивірко, В.М. Чорний, М.Л. Головаха, Є.В. Яцун. – Запоріжжя: Вид. АТ «Мотор Січ», 2020. – 127 с.

10. Жеманюк П.Д. Магнієві сплави підвищеної якості для авіаційного машинобудування / П.Д. Жеманюк, С.Б. Беліков, Е.І. Цивірко, В.А. Шаломеєв, В.В. Ключихін, В.В. Лукінов, В.М. Чорний. – Запоріжжя: Вид. АТ «Мотор Січ», 2016. – 207 с.

11. Єгоров С.Г. Технологічні особливості процесів виробництва кольорових металів: Навч. посібник / С.Г. Єгоров, І.Ф. Червоний // За ред. д.т.н., професора Червоного І.Ф. – Запоріжжя: ЗДІА, 2011. – 292 с.

12. Маняк М.О. Металургія кольорових металів. Частина 4. Металургія благородних металів. Підручник / М.О. Маняк, В.М. Бредихін, М.В. Гольцова, В.С. Ігнат'єв, В.І. Пожуєв, І.Ф. Червоний, В.П. Грицай // Під ред. д.т.н., професора Червоного І.Ф. – Запоріжжя: ЗДІА, 2009. – 548 с.

13. Грицай В.П. Металургія кольорових металів. Частина 5. Металургія важких металів. Книга 1. Технологія свинцю та цинку: Підручник / В.П. Грицай, В.М. Бредихін, І.Ф. Червоний, В.І. Пожуєв, М.О. Маняк, О.В. Рабинович, О.І. Шевелєв, В.С. Ігнат'єв // За ред. д.т.н., професора Червоного І.Ф. – Запоріжжя: ЗДІА, 2011. – 480 с.

14. Грицай В.П. Металургія кольорових металів. Частина 5. Металургія важких металів. Книга 2. Технологія міді та нікелю: Підручник / В.П. Грицай, В.М. Бредихін, І.Ф. Червоний, В.І. Пожуєв, М.О. Маняк, О.В. Рабинович, О.І. Шевелєв, В.С. Ігнат'єв // За ред. д.т.н., професора Червоного І.Ф. – Запоріжжя: ЗДІА, 2011. – 448 с.

15. Лебедева Н.Ю. Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Кольорові метали та сплави» / Н.Ю. Лебедева. – Миколаїв: НУК, 2009. – 36 с.

16. Большаков В.І. Атлас структур металів і сплавів / В.І. Большаков, Г.Д. Сухомлин, Д.В. Лаухін. – Дніпропетровськ: ГВУЗ «ПДАБА», 2010. – 174 с.