

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Запорізька політехніка»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

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

Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни "Кольорові метали та сплави для порошкових та композиційних матеріалів" для студентів спеціальності 132 – "Матеріалознавство" за освітньою програмою (спеціалізацією) "Композиційні та порошкові матеріали, покриття" денної форми навчання / Укл.: О.А. Мітяєв, О.С. Петрашов, В.М. Повзло. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2024. – 41 с.

Укладач: О.А. Мітяєв, професор, д.т.н.
О.С. Петрашов, ст. викладач
В.В. 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
Лабораторна робота № 1. Дослідження мікроструктури алюмінієвих сплавів.....	5
Лабораторна робота № 2. Дослідження мікроструктури магнієвих сплавів.....	13
Лабораторна робота № 3. Дослідження мікроструктури латуней та бронз.....	18
Лабораторна робота № 4. Дослідження мікроструктури бабітів.....	25
Лабораторна робота № 5. Дослідження мікроструктури титанових сплавів.....	31
Література.....	40

ВСТУП

Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Кольорові метали та сплави для порошкових та композиційних матеріалів» для студентів спеціальності 132 – «Матеріалознавство» за освітньою програмою «Композиційні та порошкові матеріали, покриття» спрямовані на підготовку фахівців, що здатні ефективно виконувати професійну діяльність, та набуття ними компетентностей, що дозволяють розв'язувати складні спеціалізовані та практичні задачі.

Матеріали, що викладено у методичних вказівках, призначені полегшити та надати алгоритм вирішення складних виробничих матеріалознавчих завдань, що пов'язані з розробкою, виробництвом, застосуванням, а також обробкою та випробуванням металевих композиційних і функціональних матеріалів та виробів на основі кольорових металів і сплавів.

При складанні методичних вказівок авторський колектив використовував технічну інформацію, що викладено у джерела [1-16].

Лабораторна робота № 1

ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОСТРУКТУРИ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

Мета роботи

Засвоїти особливості мікроструктури алюмінієвих сплавів. Вивчити перетворення в алюмінієвих сплавах за діаграмою стану.

Загальні відомості

Алюміній – легкий метал, з густиною $2,7 \text{ г/см}^3$, сріблястого кольору, який добре полірується. Полірована поверхня достатньо довго зберігає блиск. Температура плавлення становить $660...658 \text{ }^\circ\text{C}$ у залежності від чистоти. Кристалізується в ГЦК - гратку, з параметром $0,40412 \text{ нм}$ при $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Коефіцієнт лінійного розширення при $25 \text{ }^\circ\text{C}$ складає $24,3 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Алюміній має високу електро- і теплопровідність. Електропровідність алюмінію складає 65 % від електропровідності міді. Питома теплоємність і прихована теплота плавлення алюмінію значні, що потребує витрати великої кількості тепла на його розплавлення. Технічний алюміній має низьку міцність, але високу пластичність. Завдяки цьому застосування алюмінію як конструкційного матеріалу обмежено.

Механічні властивості алюмінію високої чистоти складають: $\sigma_{\text{в}} = 50 \text{ МПа}$, $\sigma_{0,2} = 15 \text{ МПа}$, $\delta = 50 \%$ і технічної чистоти: $\sigma_{\text{в}} = 80 \text{ МПа}$, $\sigma_{0,2} = 30 \text{ МПа}$, $\delta = 35 \%$. Модуль нормальної пружності складає $E = 7 \text{ ГПа}$. Холодна пластична деформація підвищує міцність технічного алюмінію до 150 МПа , але відносне подовження зменшується до 6% .

Алюміній можна значно зміцнити введенням у нього легуючих елементів і отримати сплави з необхідними характеристиками міцності. Найбільш поширеними легуючими присадками є мідь, магній, марганець, кремній, хром та ін. Зміцнення сплавів досягається утворенням твердих розчинів на основі алюмінію, а також різних металевих сполук.

Технічний алюміній виготовляється у вигляді листів, прутків,

профілів, дротів та інших напівфабрикатів.

Сплави системи *Al-Si* називають *силумінами* та є найбільш поширеними ливарними сплавами. Силуміни поділяють на подвійні, леговані тільки кремнієм, і спеціальні, в яких, окрім кремнію, міститься в невеликій кількості інші легуючі компоненти (Mg, Cu, Mn, Ni). Силуміни належать до евтектичних або доевтектичних сплавів (рис. 1.1). Силуміни з грубогольчатою евтектикою (рис. 1.2, *a*)

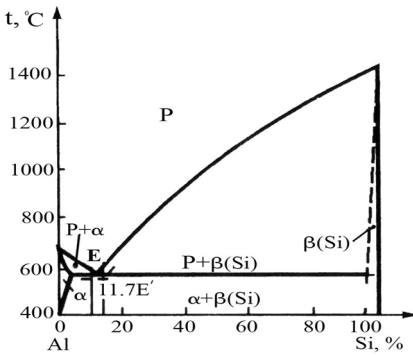


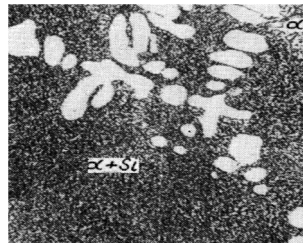
Рисунок 1.1 – Діаграма стану Al-Si

внаслідок великої крихкості кремнію характеризуються невеликими показниками механічних і корозійних властивостей. Для покращання структури силумінів та підвищення механічних і технологічних властивостей їх перед відливкою піддають обробці сумішшю фтористих та хлористих солей натрію. Ця операція називається модифікуванням силумінів, оскільки вона призводить до різких змін структури сплавів.

Сплави евтектичного і заевтектичного складу стають за структурою доевтектичними, а сама евтектика – дрібнозернистою (див. рис. 1.2, *б*).



a



б

a – не модифікований, $\times 200$; *б* – модифікований потрібним модифікатором, $\times 150$

Рисунок 1.2 – Мікроструктура силумінів

Сплави на основі системи Al–Cu. На відміну від силумінів, вони або не містять у собі евтектики, або мають невелику кількість евтектичної складової. Згідно з діаграмою стану Al–Cu (рис. 1.3) ливарні сплави, в яких міститься 4...5,3% Cu, мають двофазну рівноважну структуру $\alpha + \theta(\text{CuAl}_2)$ і належать до типових термічно зміцнювальних сплавів. Високі

міцність після термічної обробки, а також жароміцність є головними перевагами цих сплавів. Проте, як видно з діаграми стану Al–Cu, сплави типу АМ5 мають на відміну від силумінів досить широкий температурний інтервал кристалізації (90...100 °С при нерівноважних умовах кристалізації) що обумовлює

значно гірші ливарні властивості цих сплавів у порівнянні із силумінами: меншу рідкоплинність, велику схильність до утворення тріщин при литті та усадкової пористості.

Сплави системи Al–Cu відрізняються гарними показниками міцності при високій для ливарних сплавів пластичності.

Основними недоліками цих сплавів є знижена у порівнянні з іншими ливарними сплавами корозійна стійкість та низькі ливарні властивості, у зв'язку з якими високі механічні характеристики цих сплавів не завжди вдається реалізувати у виробках. Виливки із цих сплавів потребують захисту від корозії.

Сплави на основі системи Al–Mg. Сплави алюмінію з магнієм найміцніші серед ливарних алюмінієвих сплавів. Вони мають високу корозійну стійкість і найменшу питому вагу в порівнянні з іншими алюмінієвими сплавами, проте поступаються за ливарними властивостями. Унаслідок великого інтервалу кристалізації ці сплави мають меншу рідкоплинність і схильні до утворення усадкової рихлоти.

Окрім цього, вони дуже окислюються й у виливках часто з'являються окисні включення, що призводить до значного зменшення міцності та особливо подовження. Тому ці сплави плавлять під шаром флюсу або додають у невеликій кількості берилій.

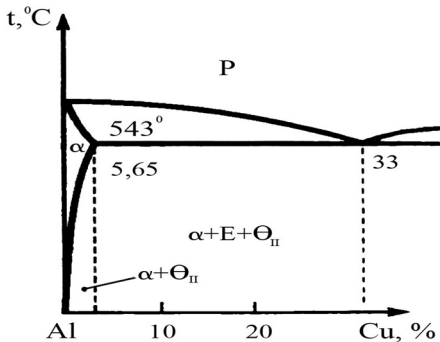


Рисунок 1.3 – Діаграма стану Al–Cu

Основний легувальний компонент у сплавах цієї групи – магній, більша частина якого знаходиться у твердому розчині. Як видно з діаграми стану Al–Mg (рис. 1.4), структура сплавів складається з α -твердого розчину і β (Al₃Mg₂). Кремній вводять у склад сплаву для покращання ливарних властивостей.

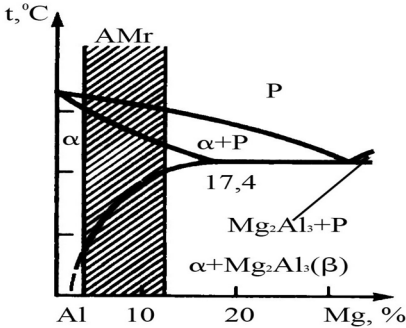


Рисунок 1.4 – Діаграма стану Al–Mg

міцності та пластичності. Унаслідок нерівноважної кристалізації в структурі сплаву утворюється деяка кількість евтектики $\alpha + \beta$ (Al₃Mg₂). Евтектична складова в даних сплавах може з'являтися вже при вмісті магнію 6...7%.

Фаза β (Al₃Mg₂) крихка і виділяється у формі крупних скупчень, які часто утворюють суцільну сітку, що є причиною зниження механічних властивостей сплаву. Для усунення гетерогенної структури сплав піддають гартуванню і в такому стані застосовують у виробках. Його недоліком є знижена стійкість до корозії під напругою.

Різке зменшення допустимого вмісту домішок заліза та кремнію у сплаві AMg10 у порівнянні зі сплавом AMg11, а також введення додатків цирконію і титану здійснюють з метою підвищити вихідну пластичність сплаву, стабілізувати твердий розчин, сповільнити дифузійні процеси в ньому й у результаті зменшити природне старіння. Крім того, цирконій і титан модифікують структуру, дещо підвищують міцність, оскільки вони після гартування наявні у вигляді дисперсних інтерметалідних часток Al₃Zr й Al₃Ti, та покращують корозійну стійкість. Основне призначення берилію, як і в інших алюмінієвих сплавах з високим вмістом магнію, – зменшення

Сплави алюмінію з марганцем з невеликими додатками марганцю, хрому та інших елементів мають підвищену міцність і пластичність, піддаються глибокій витяжці, добре зварюються та мають підвищену корозійну стійкість.

Найбільшого поширення в промисловості набув сплав AMg11, якому властиве найсприятливіше поєднання

окиснюваності сплавів, особливо у рідкому стані. Сплав характеризується підвищеною жароміцністю. Сплави системи Al–Mg застосовують для виготовлення деталей, що працюють в умовах високої вологості, в судно-, авіа- і ракетобудуванні. До недоліків цих сплавів належить їх різке зменшення при підвищенні температури.

Сплави системи Al–Mn. Сплави алюмінію з марганцем достатньо широко застосовують у промисловості, оскільки вони мають більш високі механічні властивості, ніж чистий алюміній, характеризуються високою технологічністю і підвищеною корозійною стійкістю. Зі сплавів цієї системи отримують в основному листову продукцію.

Характер взаємодії алюмінію з марганцем визначається діаграмою стану (рис. 1.5). Марганець частково розчиняється в твердому алюмінію та утворює з ним ряд хімічних сполук. Найбільш багата алюмінієм сполука $MnAl_6$ дає з ним евтектику, що містить у собі 1,95 % марганцю, яка кристалізується при температурі 658 °С. Розчинність марганцю в алюмінію при евтектичній температурі складає 1,82 %, а при 500 °С дорівнює 0,36 %. При подальшому пониженні температури розчинність змінюється незначно.

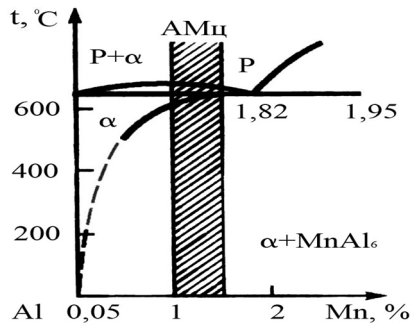


Рисунок 1.5 – Діаграма стану Al–Mn

За наявності домішок заліза в сплавах на базі сполуки $MnAl_6$ утворюється складна потрійна сполука $(MnFe)Al_6$, яка практично не розчиняється в алюмінію. Фаза $(MnFe)Al_6$ кристалізується у формі крупних скупчень, істотно знижує механічні властивості сплавів та їх здатність до пластичної деформації.

У промисловості застосовуються сплави з вмістом марганцю 1...1,6 %. При наявності кремнію в сплавах утворюється потрійна сполука $Al_{10}Mn_3Si$ (T-фаза), в якій у значній кількості розчиняється залізо. У результаті утворюється залізомарганцевиста фаза $(AlMnSiFe)$.

Незважаючи на змінну розчинність марганцю в алюмінію, у

сплавах не спостерігається помітного зміцнення при термічній обробці. Кінцевою термічною обробкою сплавів типу АМц є рекристалізаційний відпал. Дуже висока пластичність дає можливість зміцнювати сплави за допомогою холодного деформування.

При деформуванні литого металу спостерігаються роздроблення інтерметалічних сполук. У пресованих і катаних матеріалах роздроблені частинки інтерметалідів утворюють рядкову структуру та розташовуються переважно вздовж ліній перебігу металу.

При відпалі деформованого сплаву АМц утворюється структура з майже рівномірним розподілом включень марганцевистої фази і частинок залізомарганцевистої складової.

Сплави на основі системи Al–Cu–Mg з додатками марганцю (дюралюміні). Основою сплавів типу дюралюміній є система Al–Cu–Mg. Невеликі додатки магнію вводять в основному для підвищення корозійної стійкості сплавів, а також для нейтралізації шкідливого впливу заліза.

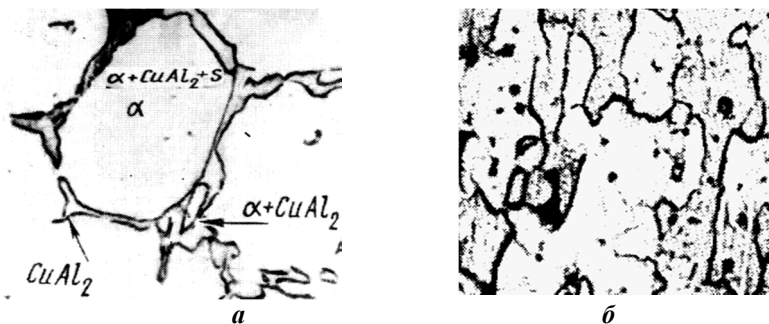
Наявність змінної розчинності міді й магнію в алюмінію дає можливість застосовувати для сплавів типу дюралюміній термічну обробку: гартування і старіння. На міцність дюралюмінів після термічної обробки суттєво впливає їх склад. Зі зміною вмісту основних легуючих елементів (міді та магнію) а також домішок (заліза та кремнію), різко змінюється ефект старіння сплавів.

Мікроструктуру сплаву Д16 у відпаленому стані та після зміцнювальної термообробки наведено на рис. 1.6. На фоні α -твердого розчину спостерігаються включення подвійної ($\alpha + \text{CuAl}_2$) і потрійної ($\alpha + \text{CuAl}_2 + \text{S}$) евтектик (див. рис. 1.6, а). Після природного старіння крім α -твердого розчину спостерігаються темні включення марганцевистої і залізної фаз (див. рис. 1.6, б).

Дюралюміній, що виготовляється в листах, для захисту від корозії піддають плакуванню, тобто покриттю тонким шаром алюмінію високої чистоти (не нижче 99,5 %). Товщина шару складає 4 % від товщини листа.

Сплави алюмінію на основі системи Al–Mg–Si (авіалі). Ці сплави широко відомі під назвою авіаль (авіаційний алюміній). Вони леговані в меншому ступені, ніж дюралюміні, і поступаються їм за міцністю, але мають кращу пластичність у холодному і гарячому станах, добре зварюються і чинять опір корозії. Авіалі мають високу границю

виривалості.



a – у відпаленому стані, $\times 500$; *b* – після природного старіння, $\times 200$

Рисунок 1.6 – Мікроструктура сплаву Д16

Зміцнювальною фазою в авіалі є сполука Mg_2Si . Наявність змінної розчинності цієї фази в алюмінію забезпечує можливість зміцнення сплавів термічною обробкою. Природне старіння в цих сплавах протікає повільно. Розпад помітно спостерігається лише при нагріві сплаву до температур $140...160\text{ }^\circ\text{C}$, при яких звичайно і проводять штучне старіння сплавів авіаль після гартування з $515...525\text{ }^\circ\text{C}$.

Порядок виконання лабораторної роботи

1. Накреслити діаграми стану: алюміній-кремній, алюміній-магній, алюміній-мідь, алюміній-марганець.

2. Показати на діаграмах стану сплави АЛ12, АМг10, АМ5, Д16, АМц. Побудувати криві охолодження і описати перетворення, які відбуваються в цих сплавах.

3. Вивчити мікроструктури заданих сплавів. Результати представити у виді таблиці:

№ п/п	Система	Марка сплаву	Хімічний склад	Схема мікроструктури

Прилади, матеріали і інструменти

Для проведення роботи необхідно мати металографічний мікроскоп, набір мікрошліфів, атлас мікроструктур.

Контрольні питання

1. Дайте характеристику впливу домішок на структуру і властивості алюмінію.
2. Як класифікують алюмінієві сплави?
3. Яка структура забезпечує сплавам найкращі ливарні властивості?
4. Дайте характеристику основним ливарним сплавам алюмінію.
5. Яка структура забезпечує сплавам найкращу оброблюваність різанням?
6. Дайте характеристику основним деформівним сплавам алюмінію.

Лабораторна робота № 2**ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОСТРУКТУРИ
МАГНІЄВИХ СПЛАВІВ****Мета роботи**

Вивчити особливості мікроструктури магнієвих сплавів.

Загальні відомості

Магній – один із найлегших конструкційних металів. Густина його становить $1,7 \text{ г/см}^3$. Температура плавлення – $651 \text{ }^\circ\text{C}$. Магній має малі міцність ($\sigma_m = 118\text{...}176 \text{ МПа}$) та пластичність ($\delta = 3\text{...}15 \%$). Алотропічні перетворення у нього відсутні.

Магній відзначається низькою корозійною і хімічною стійкістю, має добру гнучкість, ковкість, твердість за невеликої в'язкості, легко окислюється та горить яскравим полум'ям при температурі $600 \text{ }^\circ\text{C}$ і навіть самозаймається. Чистий магній застосовують у піротехніці для освітлення, а також як розкислювач, відновник у хімічних реакціях; із нього виготовляють терміт, що використовується для зварювання металів.

Магній поширений у вигляді сплавів, які в 1,5 рази легші за алюмінієві, добре обробляються різанням та порівняно міцні. До їхніх недоліків належать легка окислюваність і самозаймистість, що змушує проводити плавлення та розливання магнієвих сплавів під шаром флюсів або у вакуумі. Введення у ці сплави невеликої кількості берилію, титану та інших елементів поліпшує їхні властивості.

Сплави магнію використовують для виготовлення корпусів і деталей друкарських та лічильних машин, оптичних приладів, фото- та кіноапаратури, авіадеталей тощо.

Основними легуючими елементами магнієвих сплавів є алюміній (2,5...10,2 %), цинк (0,2...6,6 %), манган (0,1...2,5 %), цирконій (0,3...1 %), неодим (1,9...3,5 %) й інші елементи. Алюміній, цинк, цирконій і церій підвищують механічні властивості магнієвих сплавів, цирконій та манган – корозійну стійкість, неодим і церій забезпечують їм жароміцність, манган та титан сприяють подрібненню зерна.

Магнієві сплави поділяють на *деформівні* (марки МА1, МА2, МА5 та ін.) і *ливарні* (марки МЛ2, МЛ3 та ін.). Вони погано деформуються за нормальних температур, тому деформацію їх здійснюють при температурі 250...400 °С. Механічні властивості магнієвих сплавів залежно від їхнього складу змінюються в таких межах: $\sigma_m = 216...254$ МПа, $\delta = 4...14$ %.

Механічні властивості ливарних магнієвих сплавів значною мірою залежать від розмірів зерна та змінюються у межах: $\sigma_m = 98...265$ МПа, $\delta = 1...10$ %. Для подрібнення зерна сплави перед заливанням модифікують крейдою, манганом, цирконієм, хлористим залізом, рідкоземельними металами.

Збільшення розчинності легуючих елементів у магнію з підвищенням температури дає змогу зміцнювати магнієві сплави термообробкою: гартуванням і старінням. При цьому через близькість температур плавлення та відсутність поліморфних перетворень основні закономірності процесів, що відбуваються при термообробці магнієвих сплавів, майже аналогічні розглянутим вище сплавам алюмінію.

Однак термообробка магнієвих сплавів утруднена внаслідок малих швидкостей дифузії елементів у твердому магнієвому розчині. Це потребує великих витримок при їх нагріванні для гартування з метою розчинення інтерметалічних фаз (Al_2Mg_4 , $MgZn$, Mg_9Ge та ін.), високих температур і великих витримок при старінні. Особливо великі витримки потребують ливарні магнієві сплави, які мають грубозернисту будову. В той же час малі швидкості дифузії дають змогу гартувати ці сплави на повітрі.

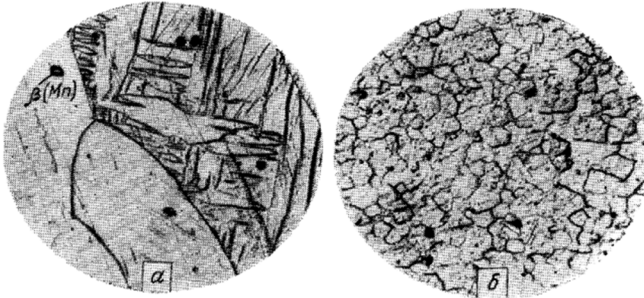
Природного старіння більшості магнієвих сплавів після гартування не відбувається, так що витримка загартованих напівфабрикатів при кімнатній температурі протягом тривалого часу не змінює їхніх структури та властивостей. Тривалість штучного старіння магнієвих сплавів значно більша, ніж алюмінієвих, але ефект зміцнення порівняно невеликий. Розпад перенасичених розчинів при штучному старінні магнієвих сплавів, що не містять рідкоземельних елементів, відбувається без проміжних стадій. З перенасиченого розчину зразу виділяється стабільна вторинна фаза, яка когерентне не зв'язана з матрицею. Цим і пояснюється невисокий приріст міцності при старінні магнієвих сплавів. Тому дуже часто зміцнення таких

сплавів здійснюють тільки гартуванням, а фасонні виливки піддають гомогенізації з охолодженням на повітрі.

Розпад перенасиченого твердого розчину в магнієвих сплавах, що містять рідкісноземельні елементи, відбувається за багатостадійною схемою, аналогічною розпаду перенасичених твердих розчинів алюмінієвих сплавів. Тому зміцнення при старінні цих магнієвих сплавів досить велике.

Деформівні магнієві сплави термообробці на зміцнення піддають рідко, оскільки ефект зміцнення їх незначний. В основному її застосовують для деталей зі сплавів МА5 та МА8. Сплав МА5 гартують від температури 410...425 °С після витримки протягом 2...6 год, сплав МА8 – від 480...500 °С після витримки протягом 4 год. Штучне старіння цих сплавів виконують при температурі 175...200 °С протягом 8...24 год. Мікроструктура сплаву МА8 приведено на рис. 2.1.

Відпал деформівних магнієвих сплавів виконують при температурі 200...350 °С з витримкою 0,5 год.



а **б**
а – в литому стані, б – після відпалу

Рисунок 2.1 – Мікроструктура сплаву МА8, $\times 200$

Ефект зміцнення ливарних магнієвих сплавів після термообробки значно більший. Режимні параметри обробки залежать від складу сплаву. Так, сплав марки МЛ4 гартують від температури 380 °С (витримка 8...16 год), МЛ5 – від 420 °С (витримка 24...32 год), МЛ6 – від 410 °С (витримка 24...32 год), МЛ9 і МЛ10 – від 540 °С (витримка 8...12 год). Штучне старіння сплавів МЛ4, МЛ5 проводять

при температурі 175 °С протягом 16 год, сплавів МЛ6, МЛ9, МЛ10 – при 190...200 °С протягом 6...18 год.

Результативність гартування та старіння магнієвих сплавів з вмістом легуючих елементів, близьким до максимальної розчинності, суттєво залежить від температури нагрівання для гартування; тому їх нагрівають до температур, близьких до лінії солідуса. При цьому перепад температур у різних зонах печі, а також точність регулювання температури для запобігання перепаду не повинні перевищувати ± 5 °С.

Для нагрівання магнієвих сплавів застосовують лише електричні печі. З метою запобігання перегрівання та займистості деталей нагрівальні елементи печей ретельно екранують. Нагрівання деталей з магнієвих сплавів у селітрових або ціаністих ваннах категорично забороняється, оскільки це може призвести до вибуху. Перед завантаженням у піч деталі ретельно очищають від магнієвого пилу, задирок, стружки і масла.

При термообробці необхідно забезпечити рівномірне нагрівання деталей. У зв'язку з цим їх нагрівають повільно або використовують східчасте нагрівання. Найкращу рівномірність нагрівання деталей забезпечують печі аеродинамічного підігрівання.

Для зменшення окиснення деталей у процесі нагрівання печі ретельно герметизують або застосовують нейтральні атмосфери (вуглекислий газ, аргон тощо). Надійний захист від окиснення магнієвих сплавів при нагріванні в повітряній атмосфері забезпечує домішка до неї 0,5...1 % сірчастого газу (SO₂).

Магнієві сплави застосовують в авіаційній промисловості, машинобудуванні та радіотехнічній промисловості. Деякі сплави (наприклад, МА11, МА12, МЛ9, МЛ10, МЛ11) можуть тривало працювати при температурі 250...300 °С. Для захисту від корозії деталі з магнієвих сплавів піддають анодуванню з наступним нанесенням лакофарбових покриттів.

Порядок виконання роботи

1. Дослідити мікроструктури сплавів: МЛ6, МЛ4, МА5, МА8, МА9.
2. Результати мікроаналізу представити у виді таблиці:

№ п/п	Система	Марка сплаву	Хімічний склад	Схема мікроструктури

Прибори, матеріали

Металографічний мікроскоп, набір мікрошліфів, атлас мікроструктур.

Контрольні питання

1. Проаналізуйте структуру і властивості магнію.
2. Проаналізуйте вплив домішок на структуру і властивості магнію.
3. Визначте класифікацію сплавів магнію.
4. Проаналізуйте структуру і властивості ливарних сплавів магнію.
5. Проаналізуйте структуру і властивості деформівних сплавів магнію.
6. Визначте основні області використання магнію і його сплавів.

Лабораторна робота № 3

ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОСТРУКТУРИ ЛАТУНЕЙ ТА БРОНЗ

Мета роботи

Засвоїти особливості мікроструктури мідних сплавів. Вивчити перетворення в мідних сплавах за діаграмою стану.

Загальні відомості

Мідь має високі пластичність, електро- й теплопровідність, корозійну стійкість у багатьох середовищах. Густина міді $8,92 \text{ г/см}^3$, температура плавлення $1084,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Мідь – найважливіший матеріал для виготовлення електричних проводів, кабелів, деталей приладів й електричних машин тощо. Понад 50 % міді, що добувається, використовують в електротехніці, електровакуумній та електронній техніці для виготовлення провідників. Вона знаходить широке застосування як матеріал у різних теплообмінниках, нагрівниках, холодильниках, радіаторах.

Практично всі домішки погіршують електро- і теплопровідність міді, такий самий вплив має наклепування. Для зменшення залишкових напружень деталі з міді відпалюють при температурі $180\text{...}230 \text{ }^\circ\text{C}$. Повне усунення наслідків наклепування відбувається внаслідок рекристалізаційного відпалу міді при температурі $500\text{...}700 \text{ }^\circ\text{C}$.

Як конструкційний матеріал в основному використовують сплави міді з іншими елементами (цинком, оловом, алюмінієм, кремнієм тощо) – латуні та бронзи. При збереженні відносно високих електро- і теплопровідності, доброї корозійної стійкості сплави порівняно з чистою міддю мають вищий рівень механічних та технологічних властивостей. За технологічними ознаками мідні сплави поділяються на *ливарні*, а також такі, що обробляються тиском (*деформовані*); за здатністю змінюватися за допомогою термообробки – на які *змінюються* і *не змінюються* термообробкою.

Латунями називають сплави на основі міді, головною домішкою в яких є цинк. Це найдешевші мідні сплави. За хімічним складом вони поділяються на *подвійні (прості)* та *багатокомпонентні (складні)*.

Прості латуні – це сплави міді тільки з цинком. Латуні, що містять до 10 % цинку, називають *томпаками*, а від 10 до 20 % – *півтомпаками*.

Практичне застосування мають латуні з умістом цинку до 45 %, оскільки подальше збільшення вмісту цинку веде до різкого зниження їхньої міцності та пластичності. При вмісті цинку до 39 % латуні мають однофазну структуру твердого розчину цинку в міді (рис. 3.1). При більшому вмісті цинку утворюється інтерметалічна сполука CuZn (β' -фаза), що відзначається високою твердістю та крихкістю, і латуні стають двофазними ($\alpha + \beta$).

Холодна пластична деформація значно підвищує міцність та твердість латуней, але їхня пластичність при цьому знижується. Наприклад, границя міцності латуні марки Л80 зростає з 314 до 627 МПа, а відносне подовження спадає з 55 до 3 %.

Для зняття наклепу латуні піддають рекристалізаційному відпалу при температурі 500...700 °С.

Із подвійних латуней виготовляють радіаторні та капілярні труби, змійовики, сільфони, деталі теплотехнічної і хімічної апаратури тощо (рис. 3.2).

Латунь марки Л80 (томпак) має колір золота. Її застосовують для виготовлення відповідальних деталей, а також ювелірних виробів, декоративних прикрас.

Для надання певних властивостей в латуні додатково вводять різні елементи: свинець, алюміній, нікель, олово, кремній та ін. Такі латуні називаються *спеціальними*.

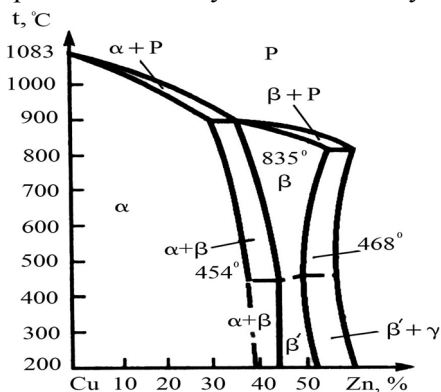


Рисунок 3.1 – Діаграма стану Cu–Zn



a *б*
a – в литому стані, *б* – після деформування і відпалу

Рисунок 3.2 – Мікроструктура латуні Л62, $\times 100$

Спеціальні латуні, за винятком таких, що містять свинець, легко піддаються обробці тиском у холодному і гарячому станах. Усі вони добре паяються та легко зварюються, ніж мідь. Латуні, за винятком марки ЛАНКМц 75-2-2,5-0,5-0,5, зміцнюють деформаційним наклепуванням. Латунь останньої марки змінюється завдяки дисперсійному твердінню після гартування при температурі 820 °C і старінню при 450 °C протягом 2 годин.

Рекристалізаційний відпал спеціальних латуней, що деформуються, виконується при температурі 550...650 °C (для марок ЛАНКМц 75-2-2,5-0,5-0,5 та ЛК 80-3 – при 800...850 °C).

Латуні, які містять більш як 20...30 % цинку, в холоднодеформованому стані, в тому числі після обробки різанням, схильні до мимовільного розтріскування при вилежуванні та експлуатації у вологій атмосфері, а особливо в атмосфері, що містить сліди аміаку. Це явище називається "*сезонною хворобою*" латуней.

Розтріскуванню латуней запобігають відпалом за температури 250...300 °C. При цьому зменшуються залишкові напруження, але міцність латуней не знижується.

Сплави міді з оловом, алюмінієм, кремнієм та іншими елементами, серед яких цинк не є основною домішкою, називаються *бронзами*. Залежно від основної домішки розрізняють *прості* (олов'янисті) та *спеціальні* (безолов'янисті) бронзи. В останніх олово замінено свинцем, алюмінієм, берилієм, кремнієм та ін. Залежно від

хімічного складу такі бронзи називаються *свинцоватими, алюмінієвими, берилієвими* тощо. Як і латуні, бронзи поділяють на *ливарні та деформовані*.

Олово, нікель, алюміній і кремній підвищують міцність, пружні властивості та корозійну стійкість бронз, а в поєднанні зі свинцем, фосфором, цинком – ще й антифрикційні властивості. Залізо та нікель подрібнюють зерно бронз манган і кремній підвищують їхню жароміцність. Берилій, хром та цирконій, утворюючи з міддю α -твердий розчин змінної концентрації, поліпшують міцнісні властивості бронз внаслідок дисперсійного твердіння.

Порівняно з латунями бронзи мають вищу міцність, корозійну стійкість та антифрикційні властивості. Вони дуже стійкі на повітрі, в морській воді, розчинах органічних кислот.

Деформівні бронзи легко обробляються куванням, штампуванням (у холодному та гарячому станах), різанням, добре паяються, але гірше зварюються. Бронзи, в яких легуючі елементи входять у твердий розчин, зміцнюють холодною пластичною деформацією. Наступним низькотемпературним відпалом (300...350 °С) можна зняти напруження і підвищити їхні пружні властивості.

Ливарні бронзи, маючи низьку ливарну усадку (крім алюмінієвих), та високу рідкоплинність, застосовуються для виготовлення фасонних виливків. Виливки з бронзи піддають гомогенізаційному при температурі 650...800 °С залежно від складу сплаву.

Олов'яні бронзи містять до 12 % олова. Для здешевлення бронз з високим вмістом олова у них вводять цинк.

Бронзи, що містять до 5 % олова, мають однофазну структуру α -твердого розчину олова й міді (рис.3.3). Вони добре деформуються в холодному стані. Їх піддають рекристалізаційному відпалу при температурі 600...700 °С.

Двофазні бронзи (які містять олова > 5%) змінюються завдяки виділенню інтерметалічної сполуки $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$ (δ – фаза), що має високу твердість і крихкість (рис. 3.4).

Алюмінієві бронзи містять 4...11 % алюмінію та присадки заліза, мангану і нікелю. Бронзи, які містять до 4...5% алюмінію, це α -твердий розчин алюмінію в міді. При більшому вмісті алюмінію в їхній структурі з'являється інтерметалічна сполука Cu_3Al (рис.3.5).

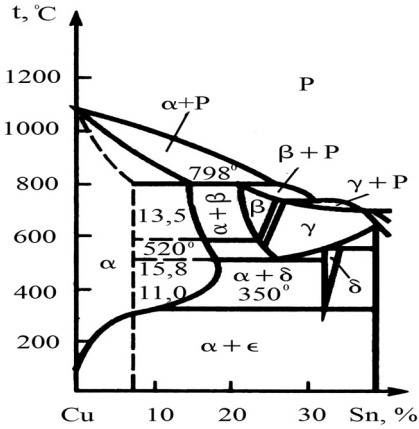
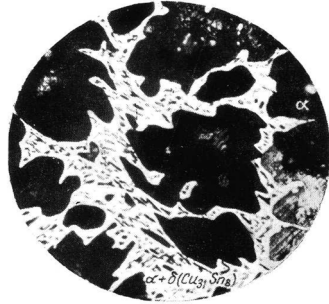


Рисунок 3.3 – Діаграма стану Cu-Sn

Рисунок 3.4 – Мікроструктура бронзи Бр.010 в литому стані, $\times 1000$

Однофазні алюмінієві бронзи обробляються тиском у холодному і гарячому станах. Вони піддаються рекристалізаційному відпалу при температурі 600...750 °C (рис. 3.6).

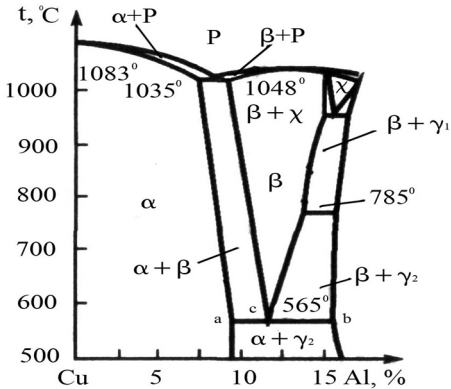
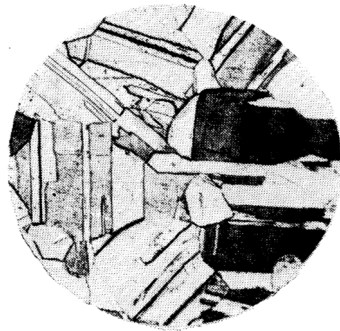


Рисунок 3.5 – Діаграма стану Cu-Al

Рисунок 3.6 – Мікроструктура бронзи Бр.А5 після деформування та відпалу, $\times 200$

Двофазні алюмінієві бронзи обробляються тиском в основному в гарячому стані (при 750...800 °С). Після гартування від температури 830...860 °С вони набувають високої пластичності. Підвищення міцності досягається відпуском при температурі 300...350 °С або 580...620 °С залежно від складу сплаву.

Берилієві бронзи містять 1,8...2,1 % берилію та присадки нікелю (0,2...0,5 %) і титану (0,1...0,25 %). Вони є дисперсійно твердіючими сплавами. Значне підвищення механічних властивостей берилієвих бронз відбувається внаслідок гартування у воді від температури 760...780 °С та старіння при 300...350 °С протягом 2 год., при цьому їхня твердість зростає до 350...400 НВ. Пластична деформація загартованої бронзи і наступне старіння дають змогу додатково збільшити твердість та міцність цих бронз.

Високі механічні, а також технологічні властивості дають змогу застосовувати берилієву бронзу для виготовлення відповідних струмопровідних контактів, мембран, сильфонів тощо. Берилієва бронза іскробезпечна, тому з неї виготовляють електричні контакти й ударний інструмент для роботи у вибухонебезпечних атмосферах.

Крем'янисті бронзи використовуються як замітники дорогих олов'яних і берилієвих бронз. Вони містять 2,4...3,5 % кремнію, 2,4...3,4 % нікелю та 0,1...1,5 % мангану. Нікель забезпечує зміцнення цих бронз гартуванням та дисперсійним твердінням.

При термообробці міді та сплавів на її основі слід урахувати високу теплопровідність й активну взаємодію їх з газами при нагріванні.

У зв'язку з високою теплопровідністю масивні вироби зі сплавів міді прогріваються швидше і рівномірніше по всьому перерізу, ніж сталі, титанові сплави та ін. При цьому не виникає проблема прогартуваності: практично будь-які вироби прогартовуються наскрізь.

Через активну взаємодію міді та її сплавів з киснем і парами води при термообробці часто застосовують захисні атмосфери.

Порядок виконання роботи

1. Накреслити діаграми стану: мідь-цинк, мідь-олово, мідь-алюміній.
2. Показати на діаграмах стану сплави Л80, Л62, Бр.О10, Бр.А5.

Побудувати криві охолодження і описати перетворення, які відбуваються в цих сплавах.

3. Дослідити мікроструктури заданих сплавів. Результати представити у виді таблиці:

№ п/п	Система	Марка сплаву	Хімічний склад	Схема мікроструктури

Прилади, матеріали і інструменти

Для проведення роботи необхідно мати металографічний мікроскоп, набір мікрошліфів, атлас мікроструктур.

Контрольні питання

1. Проаналізуйте структуру і властивості міді.
2. Проаналізуйте вплив домішок на структуру і властивості міді.
3. Визначте класифікацію мідних сплавів.
4. Проаналізуйте структуру і властивості двокомпонентних латуней.
5. Проаналізуйте структуру і властивості багатоконпонентних латуней.
6. Проаналізуйте структуру і властивості алюмінієвих, олов'янистих, берилієвих, свинцевистих, крем'янистих бронз.

Лабораторна робота № 4**ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОСТРУКТУРИ БАБІТІВ****Мета роботи**

Засвоїти особливості мікроструктури бабітів. Вивчити перетворення в сплавах за діаграмою стану.

Загальні відомості

Серед інших технічних металів олово та свинець відрізняються відносно низькою температурою плавлення, низькою твердістю і високою корозійною стійкістю.

Свинець має температуру плавлення $327,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ і кристалізується у ГЦК-ґратку з періодом $a = 0,49389\text{ нм}$ при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Даний метал належить до важких металів, його густина складає $11,3\text{ г/см}^3$.

Температура плавлення олова складає $232\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для нього в залежності від температури характерні дві поліморфні модифікації. Безпосередньо при кристалізації утворюються кристали олова з тетрагональною ґраткою з періодами $a = 0,582\text{ нм}$ $c = 0,317\text{ нм}$. Ця модифікація називається $\beta\text{-Sn}$. Олово β -модифікації є стійким до температури $18\text{ }^{\circ}\text{C}$, а потім переходить до нової модифікації $\alpha\text{-Sn}$ з ґраткою типу алмазу з періодом $a = 0,646\text{ нм}$. Перехід олова з β - в α -модифікацію супроводжується різкими об'ємними змінами, що призводить до його руйнування і перетворення на чорний порошок. При температурі $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ і трохи нижче швидкість поліморфного перетворення дуже мала і його можна практично не враховувати. При температурах $-30\dots-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ це перетворення протікає дуже інтенсивно. На виробих спочатку з'являються темні нарости, а потім настає повне руйнування. Це явище називають "олов'яною чумою". Відновити таке олово можливо тільки переплавою. Домішки свинцю, сурми у невеликій кількості різко знижують швидкість поліморфного перетворення, а при концентраціях $0,5\text{ \%}$ і вище повністю блокують його. Густина олова складає $7,3\text{ г/см}^3$.

Олово і свинець при кристалізації утворюють велике зерно. Температура рекристалізації свинцю нижче від кімнатної, тому він не наклепується при холодній пластичній деформації.

Технічне олово і свинець завжди містять у собі деякі домішки. Усі домішки в олові, крім сурми, практично не розчиняються при кімнатній температурі. Основною домішкою в олові є свинець, вміст якого в деяких марках, які призначені для виготовлення сплавів, допускається до 1...2 %.

Висока хімічна стійкість олова дозволяє застосовувати його для захисних покриттів. Воно не окислюється у вологому повітрі, є стійким в органічних кислотах і гарячій воді. Домішки значно знижують корозійну стійкість, особливо свинець і миш'як. Сильні кислоти і луги розчиняють олово. Свинець є більш корозійностійким матеріал порівняно з оловом. Він стійкий у гарячій сірчаній кислоті, концентрація якої до 80 %, а у холодній – до 92 %; у соляній кислоті – при концентрації до 10 %. Найбільше на свинець діє азотна кислота.

За умовами роботи підшипниковий сплав повинен мати гетерогенну структуру, що складається з м'якої основи та твердих включень. М'яка основа забезпечує гарну припрацьовуваність до валу, тверді включення служать опорними точками при терті. Невелика поверхня стикування валу і вкладишу зменшує тертя, а проміжки між

валом і м'якою основою забезпечують добру подачу мастила та його рівномірний розподіл.

За хімічним складом усі підшипникові сплави умовно поділяються на три групи: сплави на основі олова; сплави на основі свинцю; сплави на основі олова і свинцю.

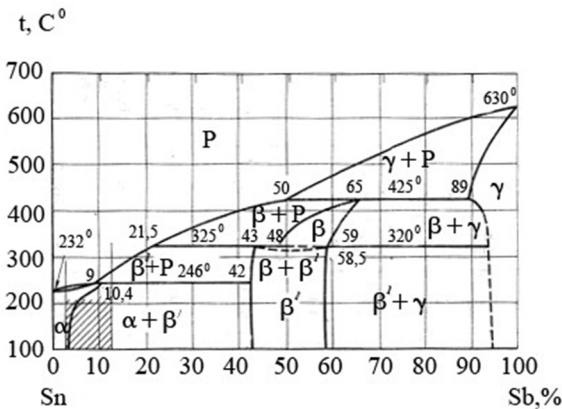


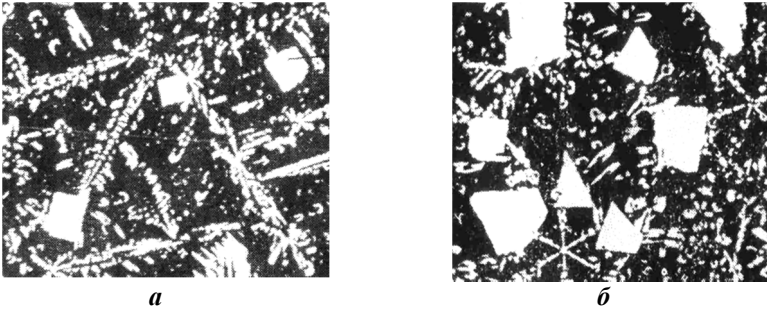
Рисунок 4.1 – Діаграма стану Sn–Sb

Сплави на основі олова. Бабіти Б89, Б83 є сплавами потрібної системи Sn–Sb–Cu. Враховуючи, що мідь знаходиться у зв'язаному стані у вигляді сполуки з оловом Cu_3Sn та суттєво не впливає на фазову рівновагу, структуру цих сплавів можна описати подвійною діаграмою стану Sn–Sb (рис. 4.1). За цією діаграмою сурма до 3,5 %

утворює з оловом твердий розчин. При більшій кількості сурми в структурі сплаву з'являються кристали β -твердого розчину (на основі хімічної сполуки SnSb).

Сплав Б89 має структуру α -твердого розчину сурми і міді в олові з включеннями кристалів хімічної сполуки Cu_3Sn (рис. 4.2, *a*). Внаслідок нерівноважної кристалізації в структурі з'являється деяка кількість нерозчинних первинних кристалів β -фази.

Сплав Б83 є сплавом олова із сурмою та міддю. Остання вводиться для запобігання ліквідації за густиною. Мідь з оловом утворює сполуку Cu_3Sn , яка кристалізується в першу чергу від інших фаз сплаву. Кристали цієї сполуки, що мають форму зірочок або ланцюжків (рис. 4.2, *б*) утворює свого роду каркас, який унеможливило ліквідацію за густиною.



a – Б89; *б* – Б83

Рисунок 4.2 – Мікроструктура бабітів, $\times 100$

Кращі антифрикційні властивості мають олов'яні бабіти Б83 і Б89, де буква "Б" означає бабіт, а цифра – вміст Sn у %, решта Sb або Cu. Ці бабіти містять у собі велику кількість олова, яке дороге коштує, тому їх застосовують в основному для заливки підшипників великої потужності, коли потрібні висока в'язкість і найменший коефіцієнт тертя. Для інших цілей використовують бабіти, в яких значна частина олова замінена свинцем.

Сплави на основі свинцю. Найбільш широке застосування у промисловості отримали сплави свинцю із сурмою з невеликими додатками міді (БС) і свинцю з кальцієм та натрієм (БК).

Сплав БС є заевтектичним сплавом системи Pb–Sb. Згідно з діаграмою стану Pb–Sb (рис. 4.3) структура сплаву складається з

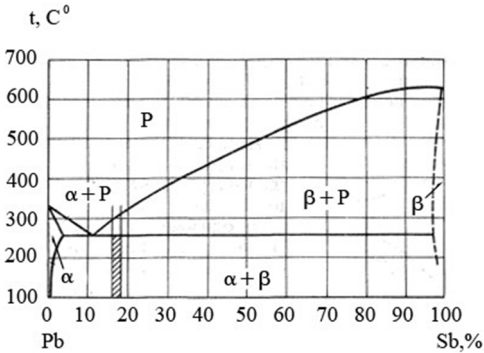


Рисунок 4.3 – Діаграма стану Pb–Sb

первинних кристалів β -твердого розчину та евтектики ($\alpha + \beta$). Крім того, при наявності у сплаві міді утворюються кристали хімічної сполуки Cu_2Sb . М'якою основою сплаву є свинець, тверді включення – частки β -фази і хімічної сполуки Cu_2Sb .

У сплаві БК одним з головних легуючих елементів є кальцій. Саме він утворює з основою сплаву – свинцем – сполуку Pb_3Ca , тверді включення якої у вигляді дрібних дендритів (рис. 4.4, а) рівномірно розподілені у м'якій матриці. Натрій вводять до складу для підвищення твердості.

Сплав БК належить до потрійної системи Pb–Ca–Na. У зв'язку з тим, що кальцій наявний в кількості до 1 % і повністю знаходиться у твердому розчині, структуру сплавів можна описати подвійною діаграмою стану Pb–Ca. Згідно із цією діаграмою структура сплаву складається з α -твердого розчину і кристалів хімічної сполуки Pb_3Ca . М'якою основою сплаву є твердий розчин натрію і кальцію у свинцю, а твердою складовою – кристали Pb_3Ca . Кальцієво-натрієві бабіти мають високі антифрикційні властивості, менш крихкі й більш зносостійкі в порівнянні з бабітами БС. Вони мають добрий опір до ударних навантажень, тому їх застосовують у підшипниках рухомого складу залізниць.

Свинцево-олов'яні сплави. До цих сплавів відносять такі бабіти: Б16, Б6, БН і БТ.

Сплав Б16 за вмістом компонентів належить до четверної системи Pb–Sb–Sn–Cu. У цьому сплаві м'якою складовою є твердий розчин олова, сурми і міді в свинцю, твердою складовою є включення $\beta(\text{SnSb})$ -фази і частки хімічних сполук Cu_3Sn і Cu_2Sb (рис. 4.4, б).

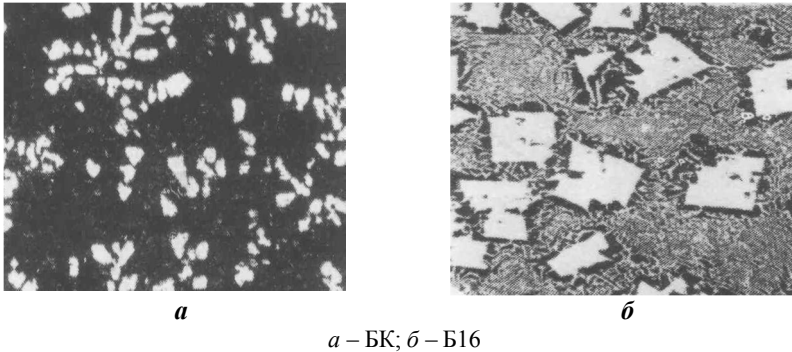


Рисунок 4.4 – Мікроструктура бабітів, $\times 100$

На відміну від бабіту БС, в якому твердою складовою є крихка сурма, бабіт Б16 менш схильний до викришування та зносу, тому що фаза $\beta(\text{SnSb})$ більш міцна і пластична. Бабіт Б16 застосовують як замітник бабіту Б83 для заливки відповідальних підшипників, що працюють в умовах спокійного навантаження.

Сплави БН і БТ належать до малоолов'янистих бабітів. Значне поліпшення механічних і антифрикційних властивостей цих бабітів досягається легуванням їх нікелем, миш'яком, кадмієм і телуrom.

Нікель і телур зміцнюють основу сплаву, оскільки знаходяться у твердому розчині. Додатки кадмію і миш'яку утворюють нову хімічну сполуку AsCd у вигляді округлих кристалів, які одночасно є зародками для формування $\beta(\text{SnSb})$ -фази.

Бабіти мають невелику границю міцності – 80...100 МПа, проте вона зростає під час природного старіння. Процес можна прискорити нагріванням до 50...70 °С. З підвищенням температури твердість бабітів істотно знижується, тому робоча температура не повинна перевищувати 80 °С.

Порядок виконання роботи

1. Накреслити діаграми стану: олово-сурма, свинець-сурма.
2. Показати на діаграмах стану сплави Б89, БС. Побудувати криві охолодження і описати перетворення, які відбуваються в цих сплавах.

3. Дослідити мікроструктури сплавів Б89, Б83, БС, БК, Б16. Результати представити у виді таблиці:

№ п/п	Система	Марка сплаву	Хімічний склад	Схема мікроструктури

Прилади, матеріали і інструменти

Для проведення роботи необхідно мати металографічний мікроскоп, набір мікрошліфів, атлас мікроструктур.

Контрольні питання

1. Проаналізуйте структуру і властивості олова і свинцю.
2. Визначте класифікацію бабітів.
3. Проаналізуйте структуру і властивості бабітів на основі олову.
4. Проаналізуйте структуру і властивості бабітів на основі свинцю.
5. Проаналізуйте структуру і властивості бабітів на основі олову і свинцю.

Лабораторна робота № 5

**ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОСТРУКТУРИ
ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ****Мета роботи**

Вивчити особливості мікроструктури титанових сплавів.

Загальні відомості

Титан є одним з найважливіших конструкційних матеріалів. Він майже в два рази легше вуглецевих та легированих сталей, а також багатьох кольорових сплавів. За корозійною стійкістю у морській воді й ряді агресивних середовищ перевищує нержавіючі сталі. Він є немагнітним, має високу міцність і пластичність та характеризується рядом інших цінних властивостей. За поширенням у природі титан займає серед металів сьоме місце після Al, Fe, Ca, Na, K і Mg.

Титан – метал сірого кольору, який має дві поліморфні модифікації. Низькотемпературна (до 882 °С) модифікація α -Ті характеризується ГЦУ-ґратками з періодами $a = 0,296$ нм, $c = 0,472$ нм, високотемпературна β -Ті має об'ємноцентровані кубічні ґрати з періодом $a = 0,332$ нм при 900 °С. Щільність α -Ті при 20 °С складає 4,5 г/см³, а β -Ті при 900 °С – 4,32 г/см³. Коефіцієнт лінійного розширення при 100 °С складає $8,3 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Поліморфне перетворення (882 °С) при повільному охолодженні відбувається за нормальним механізмом з утворенням полієдричної структури, а при швидкому – за мартенситним з утворенням голчастої структури. Особливостями титану і його сплавів є високі механічні властивості, низька щільність, висока питома міцність, гарні технологічні властивості та відмінна корозійна стійкість. Титан має низький модуль пружності, майже в два рази менший, ніж у заліза і нікелю, що утрудняє виготовлення з нього жорстких конструкцій. Механічні властивості титану характеризуються гарним поєднанням міцності та пластичності.

Механічні властивості титану дуже залежать від наявності домішок, особливо водню, кисню, азоту і вуглецю, які утворюють з ним тверді розчини проникнення та проміжні фази: гідриди, оксиди,

нітриди й карбіди. Невелика кількість кисню, азоту і вуглецю підвищує твердість, тимчасовий опір та межу текучості, проте при цьому значно зменшується пластичність, знижується корозійна стійкість, погіршуються зварюваність, здатність до паяння і штампованість. Тому вміст цих домішок у титані обмежений сотими, а іноді тисячними частками відсотка. Аналогічним чином, але у меншій мірі впливають на його властивості залізо і кремній, що утворюють з титаном тверді розчини заміщення.

При підвищенні температури до 250 °С міцність титану знижується майже в 2 рази. Титан характеризується схильністю до повзучості навіть при 20...25 °С. Його границя повзучості складає близько 60 % від межі плинності. Домішки кисню, азоту, а також пластична деформація підвищують опір повзучості титану.

Титан – холодостійкий метал. При температурі рідкого гелію його $\sigma_B = 1250$ МПа. При цьому, якщо вміст водню малий (менше 0,002 %), титан зберігає високу пластичність ($\delta = 15...20$ %). Пластична деформація значно підвищує міцність титану. При ступені деформації 60...70 % σ_B і $\sigma_{0,2}$ зростають майже в 2 рази. Для зняття наклепу проводять рекристалізаційний відпал при 650...750 °С.

Легуючі елементи за характером впливу на поліморфні перетворення титану поділяють на три групи: α -стабілізатори, β -стабілізатори та нейтральні елементи.

Титанові сплави в порівнянні з технічним титаном мають при достатньо добрій пластичності, високій корозійній стійкості та малій щільності вищу міцність при 20...25 °С і підвищених температурах. Порівняно з берилієм вони більш пластичні й технологічні, менше коштують, безпечні для здоров'я при обробці. Титан у порівнянні з алюмінієвими і магнієвими сплавами мають вищу питому міцність, жароміцність й корозійну стійкість. Тому титанові сплави отримали широке застосування в авіації, ракетній техніці, суднобудуванні, хімічній та інших галузях промисловості. Їх використовують для обшивки надзвукових літаків, виготовлення деталей конструкцій реактивних авіаційних двигунів (дисків і лопаток компресора, деталей повітрязабірника та ін.), корпусів ракетних двигунів 2 і 3-го ступенів, балонів для стислих і зріджених газів, обшивки морських суден, підводних човнів і т. д.

За технологією виготовлення титанові сплави підрозділяють на

деформівні й ливарні; за механічними властивостями – на сплави нормальної міцності, високої, жароміцної та підвищеної пластичності; за здатністю змінюватися за допомогою термічної обробки – на зміцнювальні й незміцнювальні термічною обробкою; за структурою у відпаленому стані – на α , псевдо- α , $(\alpha + \beta)$ -, псевдо- β -і β -сплави.

Деформівні сплави. До сплавів з α -структурою належать сплави титану з алюмінієм (наприклад, VT5), а також сплави, додатково леговані оловом або цирконієм (наприклад, VT5-1). Вони характеризуються середньою міцністю при 20 °С, високими механічними властивостями при криогенних і підвищених (450...500 °С) температурах. Сплави мають високу термічну стабільність властивостей, гарну зварюваність і задовільну оброблюваність різанням. Міцність зварного шва складає 90 % міцності основного сплаву.

Недоліком сплавів з α -структурою є неможливість зміцнювати їх термічною обробкою і низька технологічна пластичність. Сплави з оловом більш технологічні, але це найдорожчі з α -сплавів. У гарячому стані α -сплави кують, прокатують і штампують. Їх постачають у вигляді прутків, сортового прокату, поковок, труб і дроту. Призначені вони для виготовлення деталей, що працюють у широкому діапазоні температур: від криогенних до 450 °С (VT5) і 500 °С (VT5-1).

Псевдо- α -сплави мають переважно α -структуру і невелику кількість α -фази (1...5 %) внаслідок додаткового легування β -стабілізаторами: Mn, V, Nb, Mo та ін. Зберігаючи переваги α -сплавів, вони завдяки наявності β -фази мають високу технологічну пластичність. Сплави з низьким вмістом алюмінію (2...3 %) обробляються тиском у холодному стані та лише при виготовленні складних деталей їх нагрівають до 500...700 °С (OT4, OT4-1). Сплави з великим вмістом алюмінію при обробці тиском потребують підігріву до 600...800 °С. На міцність цих сплавів, крім алюмінію, сприятливо впливають цирконій і кремній. Цирконій, необмежено розчиняючись в α -фазі, підвищує температуру рекристалізації. Крім того, він сприяє збільшенню розчинності β -стабілізаторів у α -фазі, що викликає зростання міцності як при 20 °С, так і при високих температурах. У тих же умовах кремній підвищує міцність у результаті утворення тонкодисперсних силіцидів, важкорозчинних в α -фазі. Тому псевдо- α -сплави з вмістом алюмінію 7...8 %, леговані Zr, Si, Mo, Nb, V (VT20), використовують у виробках, що працюють при найбільш високих

(серед титанових сплавів) температурах.

Недолік цих сплавів – схильність до водневої крихкості. Водень малорозчинний в α -фазі та присутній у структурі у вигляді гідридів, які знижують пластичність, особливо при повільному навантаженні, та в'язкість сплавів. Допустимий вміст водню в псевдо- α -сплавах коливається в межах 0,005...0,020 %.

Двофазні ($\alpha + \beta$)-сплави мають краще поєднання технологічних і механічних властивостей. Вони леговані в основному алюмінієм і β -стабілізаторами. Необхідність легування алюмінієм обумовлена тим, що він значно зміцнює α -фазу при 20 °С і підвищених температурах, тоді як β -стабілізатори в ній малорозчинні й тому істотно не впливають на її властивості. Особливо цінною для цих сплавів є здатність алюмінію збільшувати термічну стабільність β -фази, оскільки евтектоїдоутворюючі β -стабілізатори, які найбільш ефективно зміцнюють сплави, викликають схильність цієї фази до евтектоїдного розпаду. Крім того, алюміній знижує щільність ($\alpha + \beta$)-сплавів, що дозволяє утримувати її приблизно на рівні титану, не дивлячись на наявність елементів з великою щільністю: V, Cr, Mo, Fe тощо.

Стійкість β -фази і термічну стабільність сплавів істотно підвищують ізоморфні β -стабілізатори: Mo, V, Nb. На властивості вони впливають по-різному. Сильніше зміцнює Mo, особливо при вмісті його в сплаві більше 4 %, слабше зміцнюють V і Nb, але вони мало знижують пластичність сплавів. Проте найбільше зміцнення досягається при легуванні титану евтектоїдоутворюючими β -стабілізаторами: Fe, Cr, Mn. Тому двофазні промислові сплави містять і ті, й інші β -стабілізатори.

Сплави ($\alpha + \beta$) зміцнюються за допомогою термічної обробки – гартування і старіння. У відпаленому і загартованому станах вони мають гарну пластичність, а після старіння – високу міцність при 20...25 °С і підвищених температурах. При цьому, чим більше β -фази міститься в структурі сплаву, тим він міцніше у відпаленому стані, й сильніше зміцнюється при термічній обробці. За структурою після гартування їх поділяють на два класи: мартенситний і перехідний.

Сплави мартенситного класу менш леговані та в рівноважному стані містять у собі порівняно небагато β -фази (5...25 %). Після гартування вони мають структуру мартенситу α' (або α''). До цього класу належать сплави титану з алюмінієм і ванадієм (BT6),

високоміцні сплави, додатково леговані молібденом (BT14, BT16), а також сплави, призначені для роботи при підвищених температурах (BT25, BT3-1). Сплави перехідного класу більш леговані й відповідно мають більше β -фази після відпалу (25...50 %). Структура і властивості цих сплавів дуже чутливі до коливань хімічного складу. Так, після гартування з β -області можна отримати однофазну β' - або двофазну ($\alpha'' + \beta'$)-структуру. Наявність великої кількості β -фази (наприклад, структура сплаву BT22 складається на 50 % з β -фази) забезпечує сплавам перехідного класу найвищу міцність серед ($\alpha + \beta$)-сплавів у відпаленому і в загартованому станах: тимчасовий опір сплаву BT22 після відпалу має те ж значення, що у сплаву BT6 після гартування і старіння. У сплаву BT22 $K_{Ic} = 69,5...82,2 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$, а у сплаву BT6 – $82,2...94,8 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$. Це дозволяє застосовувати сплави перехідного класу як у загартованому і постареному, так і у відпаленому станах, що дуже важливо при виготовленні великогабаритних деталей.

Двофазні сплави задовільно зварюються та обробляються різанням. Після зварювання потрібен відпал для підвищення пластичності зварного шва. Термоводнева обробка дає можливість отримати рівноміцні з основним сплавом зварні шви. Сплави $\alpha + \beta$ менш схильні до водневої крихкості, чим α і псевдо- α , оскільки водень має більшу розчинність у β -фазі; вони легше куються, штамуються і прокатуються, ніж сплави з α -структурою. Їх постачають у вигляді поковок, штампових заготовок, прутків, листів, стрічок. Однофазні β -сплави не мають промислового застосування, оскільки для отримання стійкої β -структури вони повинні бути леговані великою кількістю дорогих, дефіцитних, таких, що мають високу щільність, ізоморфних β -стабілізаторів (V, Mo, Nb, Ta). Такі сплави дорого коштують і мають знижену питому міцність. Псевдо- β -сплави (BT15) високолеговані в основному β -стабілізаторами. Сумарна кількість легуючих елементів, як правило, перевищує 20 %. Найчастіше для легування використовують Mo, V, Cr, рідше – Fe, Zr, Sn. Алюміній наявний майже у всіх сплавах, але в невеликих кількостях (близько 3 %). У рівноважному стані сплави мають структуру переважно β -фази з невеликою кількістю α -фази. Після гартування їх структура – метастабільна β' -фаза. У цьому стані сплави мають гарну пластичність ($\delta = 12...40 \%$; $\psi \approx 30...60 \%$), легко обробляються тиском, мають порівняно невисоку міцність ($\sigma_B \approx 650...1000 \text{ МПа}$). Залежно від

хімічного складу тимчасовий опір після старіння складає 1300...1800 МПа. У деяких сплавів σ_B при старінні підвищується більш ніж в 1,5 рази. Щільність цих сплавів знаходиться в інтервалі 4,9...5,1 т/м³. Сплави відрізняються високою питомою міцністю, мають низьку схильність до водневої крихкості, задовільно обробляються різанням; їх недоліки – чутливість до домішок кисню і вуглецю, які викликають зниження пластичності та в'язкості, знижена пластичність зварних швів і низька термічна стабільність.

Найбільшого поширення в промисловості набув сплав ВТ15. Його випускають у вигляді листів, смуг, прутків, поковок. Цей сплав рекомендується для тривалої роботи при температурі до 350 °С.

Ливарні сплави. Титанові сплави мають гарні ливарні властивості. Невеликий температурний інтервал кристалізації забезпечує їм високу рідкоплинність і добру щільність виливка. Вони мають малу схильність до утворення гарячих тріщин і невелику лінійну усадку (1 %); їх об'ємна усадка складає близько 3 %.

До недоліків ливарних титанових сплавів відносять велику схильність до поглинання газів і високу активність при взаємодії з формувальними матеріалами. Тому їх плавку і розливання проводять у вакуумі або в середовищі нейтральних газів. Для отримання крупних фасонних відливок (до 300...500 кг) використовують чавунні та сталеві форми; дрібні деталі відливають в оболонкові форми, виготовлені із спеціальних сумішей. Для фасонного литва застосовують сплави, аналогічні за хімічним складом деяким деформівним (ВТ5Л, ВТ3-1Л, ВТ14Л), а також спеціальні ливарні сплави.

Ливарні титанові сплави характеризуються нижчими механічними властивостями, ніж ті, що деформуються. Зміцнювальна термічна обробка різко знижує пластичність ливарних сплавів і тому не застосовується. Перспективним способом підвищення механічних властивостей відливок, особливо для деталей невеликих розмірів і складної форми, є термоводнева обробка. Гарні результати дає поєднання термоводневої обробки з гарячим ізостатичним пресуванням. Така комбінована обробка призводить до значного зниження (більш ніж у 2 рази) пористості й підвищення механічних властивостей, особливо межі втоми.

Порошкові сплави. При виготовленні деталей порошковою технологією використовують порошки технічного титану, а також

деяких його сплавів. Механічні властивості порошкових титанових сплавів залежать від багатьох чинників: якості початкових порошків, режимів гарячого компактування, пресування і спікання. Технологічні труднощі обумовлені головним чином активною взаємодією титану при підвищених температурах з домішками впровадження, що утворюють неметалічні проникнення, які знижують механічні властивості порошкових титанових сплавів. Проте сучасні технології, наприклад розпилювання металу у вакуумі, гаряче компактування гранули, гаряче ізостатичне пресування з подальшим вакуумним відпалом, дозволяють отримати напівфабрикати і вироби складної форми високої якості й 100 % – у щільність. У цьому випадку порошкові сплави наближаються за міцністю до деформівних сплавів у відпаленому стані. Так, напівфабрикати (прутки, профілі, листи та ін.) зі сплаву ВТ6, що деформується, у відпаленому стані мають $\sigma_B = 950 \dots 1100$ МПа, а у напівфабрикатів з того ж сплаву, але отриманого порошковою технологією із цього сплаву, $\sigma_B = 920 \dots 950$ МПа.

Сплави на основі інтерметалідів титану підрозділяються на дві групи: жароміцні та сплави з пам'яттю форми (ефект пам'яті форми).

Жароміцні сплави належать до системи Ti–Al, їх структура складається з α_2 - і γ -фази (Ti₃Al і TiAl відповідно). При малій щільності (3,5 т/м³) вони за жароміцністю перевершують усі титанові сплави і багато жароміцних сталей, наближаючись за властивостями до сплавів на основі нікелю.

Ефект пам'яті форми – це здатність сплаву усувати в процесі зворотного мартенситного перетворення деформацію, отриману ним після прямого мартенситного перетворення, тобто у мартенситному стані. Основним сплавом з ефектом пам'яті форми нікелід титану (TiNi), що має $t_{пл} = 1250 \dots 1310$ °С, $\rho = 6,44$ т/м³, $E = 66,7 \dots 72,6$ Па, $G = 22,5 \dots 24,5$ ГПа, $\sigma_B = 735 \dots 970$ МПа, $\sigma_{0,2} = 127 \dots 333$ МПа, $\delta = 7 \dots 25$ %. Ефект пам'яті форми спостерігається у сплавах з термопружним мартенситним перетворенням, а також з оборотною деформацією, найбільша величина якої визначається деформацією ґратки при мартенситних перетвореннях. Ефект пам'яті форми TiNi виникає у вузькому інтервалі температур; він максимальний при стехіометричному складі, відхилення від якого викликає різку зміну температури початку й кінця прямого і зворотного мартенситних

перетворень.

При прямому мартенситному перетворенні ($M_p \sim 60^\circ\text{C}$) TiNi змінює складну впорядковану кристалічну ґратку типу CsCl на триклінну ґратку мартенситу. Надана в цьому стані нова форма зразка (деталі) з TiNi зникає при нагріві до температур, що перевищують температуру зворотного мартенситного перетворення ($100\dots 120^\circ\text{C}$).

Сплави з ефектом пам'яті форми доцільно застосовувати в різних галузях техніки, в яких інші матеріали використовувати неможливо. Наприклад, у космічній техніці для антен, що саморозкриваються, які заздалегідь отримали компактну форму для полегшення доставки на космічний корабель; при установці заклепок, що саморозклеплюються, у важкодоступних місцях конструкції; для з'єднувальних муфт трубопроводів, що самоспрацьовуються; для дистанційного ремонту обсадних труб нафтових і газових свердловин; як матеріал виробів, що багато разів змінюють свою форму при нагріві та охолодженні (клапани, важелі та ін.).

Порядок виконання роботи

1. Дослідити мікроструктури сплавів: VT5, VT6, VT8, VT14, OT4, VT20, VT3-1.
2. Результати мікроаналізу представити в виді таблиці:

№ п/п	Система	Марка сплаву	Хімічний склад	Схема мікроструктури

Прилади, матеріали і інструменти

Для проведення роботи необхідно мати металографічний мікроскоп, набір мікрошліфів, атлас мікроструктур.

Контрольні питання

1. Проаналізуйте структуру і властивості титану і вплив домішок на них.
2. Проаналізуйте структуру і властивості фазові перетворення в титані та його сплавах.

3. Дайте класифікацію титанових сплавів.
4. Визначте основні види термічної обробки титана та його сплавів.
5. Проаналізуйте водородну крихкість титану і його сплавів.
6. Проаналізуйте структуру і властивості деформівних α -титанових сплавів.
7. Проаналізуйте структуру і властивості деформівних $(\alpha + \beta)$ - титанових сплавів.
8. Проаналізуйте структуру і властивості β -титанових сплавів.
9. Проаналізуйте структуру і властивості ливарних титанових сплавів.
10. Визначте області застосування титану та його сплавів.

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. Богуслаєв В.О. Авіаційно-космічні матеріали та технології / В.О. Богуслаєв, О.Я. Качан, 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. Богуслаєв В.О. Сплави на основі магнію для імплантатів при остеосинтезі / В.О. Богуслаєв, С.Б. Беліков, Ю.М. Колесник, В.А. Шаломєєв, Е.І. Цивірко, В.М. Чорний, М.Л. Головаха, Є.В. Яцун. – Запоріжжя: Вид. АТ «Мотор Січ», 2020. – 127 с.
10. Богуслаєв В.О. Магнієві сплави підвищеної якості для авіаційного машинобудування / В.О. Богуслаєв, П.Д. Жеманюк, С.Б. Беліков, Е.І. Цивірко, В.А. Шаломєєв, В.В. Клочихін, 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.