МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Український державний університет науки і технологій

Кафедра «Матеріалознавства та термічної обробки металів»

В авторській редакції

МЕТАЛЕВІ МАТЕРІАЛИ НА НЕЗАЛІЗНІЙ ОСНОВІ

Навчально-методичні рекомендації
до виконання лабораторного практикуму
для студентів спеціальності 132 – матеріалознавство ОПП
«Матеріалознавство»
(магістерський рівень)

Електронне видання

ДНІПРО
2025

УДК 669.2/8(076.5)
М 54

Упорядники:
Т. А. Аюпова, О. А. Носко, Д. О. Коваль

Електронне видання

Схвалено Групою забезпечення якості освітньої програми
«Матеріалознавство»
Протокол № 2 від 03.09.2025 р.

М 54 Металеві матеріали на незалізній основі : навчально-методичні рекомендації до виконання лабораторного практикуму / упоряд. Т. А. Аюпова, О. А. Носко, Д. О. Коваль ; Укр. держ. ун-т науки і технологій. – Електрон. вид. – Дніпро : УДУНТ, 2025. – 65 с.

Викладено загальні навчально - методичні рекомендації щодо виконання, оформлення, змісту і послідовності виконання лабораторного практикуму.

Навчально-методичні рекомендації призначені для студентів спеціальності 132 – матеріалознавство ОПП «Матеріалознавство» (магістерський рівень).

© Аюпова Т. А. та ін., упорядкування, 2025
© Укр. держ. ун-т науки і технологій, 2025

ЗМІСТ

ВСТУП ……..4

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1 ……5

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2 ……12

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3 ……19

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4 ……28

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5 ……35

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6 ……44

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №7 ……49

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №8 ……53

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №9 ……60

ЛІТЕРАТУРА ……..64

ВСТУП

Сучасний розвиток техніки та промисловості неможливий без широкого використання металевих матеріалів на незалізній основі. Легкі та кольорові метали й їхні сплави (алюміній, магній, титан, мідь, нікель та інші) відіграють ключову роль у машинобудуванні, авіакосмічній техніці, енергетиці та будівництві завдяки поєднанню високих експлуатаційних властивостей, корозійної стійкості та технологічності. Так, алюмінієві сплави широко застосовуються у виробництві авіаційних конструкцій і сучасних швидкісних поїздів; магнієві сплави використовують у приладобудуванні та автомобілебудуванні для зменшення маси деталей; титанові сплави є основним матеріалом для медичних імплантатів і вузлів літальних апаратів; мідь та її сплави (бронза, латунь) незамінні у виробництві електротехнічного обладнання та теплообмінників; нікель та його сплави забезпечують високу жаростійкість у турбінах і реакторах.

Метою вивчення дисципліни є формування системних знань про властивості, структуру, технології виробництва та застосування металевих матеріалів на незалізній основі, розвиток навичок аналітичного підходу до вибору матеріалів у різних галузях промисловості, аргументованого вибору матеріалів відповідно до вимог експлуатації, планування технологічних процесів обробки та використання незалізних сплавів для підвищення ефективності виробництва та довговічності конструкцій.

Методичні рекомендації містять узагальнені теоретичні відомості, приклади практичного застосування, а також орієнтовні завдання для самостійної роботи студентів. Їх використання сприятиме більш глибокому засвоєнню навчального матеріалу та формуванню професійних компетентностей у сфері матеріалознавства.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТАЛЕВИХ МАТЕРІАЛІВ: МАКРОАНАЛІЗ, МІКРОАНАЛІЗ, МЕТОДИ КІЛЬКІСНОЇ МЕТАЛОГРАФІЇ

1.1 Ціль проведення лабораторного заняття: Ознайомитися з основними методами дослідження металевих матеріалів (макроаналізом, мікроаналізом та методами кількісної металографії), навчитися виявляти особливості їхньої структури на різних масштабних рівнях та оцінювати вплив структури на властивості металів і сплавів..

Завдання проведення лабораторного заняття

В результаті проведення заняття студенти повинні:

- знати: задачі макроаналізу та мікроаналізу, методи приготування металографічних зразків (шліфування, полірування, травлення), суть кількісної металографії та основні параметри, які вимірюються, вплив структурних особливостей на механічні та експлуатаційні властивості металевих матеріалів;

- вміти: проводити макроаналіз металів та виявляти макродефекти; здійснювати підготовку зразків до мікроструктурних досліджень; користуватися оптичним мікроскопом для вивчення мікроструктури; описувати та класифікувати типові мікроструктурні складові металів і сплавів; застосовувати методи кількісної металографії для визначення параметрів структури; робити висновки про якість металу на основі структурних досліджень.

1.2 Основні теоретичні положення

Для дослідження структури металів та їхніх сплавів сьогодні використовують широкий спектр сучасних методів, однак макроструктурний аналіз зберігає своє значення вже протягом багатьох століть.

Макроструктурний аналіз полягає у вивченні поверхні металу неозброєним оком або через лупу (збільшення до 30 разів) [1]. Для цього використовують злами деталей та спеціально підготовлені макрошліфи. Його

головна перевага – можливість одночасного огляду великих поверхонь, що дає уявлення про загальну будову металу, наявність дефектів, розподіл домішок тощо. Водночас він не дає детальних відомостей про мікроструктуру, тому часто виступає попереднім етапом перед мікроаналізом.

Макроаналіз дозволяє виявляти поверхневі та внутрішні дефекти: втомні тріщини, непровари у зварних з'єднаннях, ливарні дефекти (бульбашки, раковини, тріщини, короблення), а також дефекти після термообробки. Дослідження зламів дає змогу визначити причину руйнування деталей. Так, втомний злам зазвичай складається з двох зон: втомної (гладка, шліфована поверхня) та зони долому (крихкої або в'язкої). Сучасний напрям, що спеціалізується на таких дослідженнях, називається фрактографією [1].

За характером руйнування злами поділяють на в'язкі, крихкі та змішані. В'язкий злам супроводжується значною пластичною деформацією, що лише підтверджує пластичність металу. Крихкий злам дає більше інформації: дозволяє оцінити розміри зерен, вид термічної обробки, виявити дефекти. Він може бути міжкристалічним (руйнування по межах зерен) або транскристалічним (через зерно). Наприклад, загартовані сплави мають дрібнозернистий матовий злам, тоді як після відпалу – крупнозернистий. На зламі також можна визначити глибину дифузійних шарів після хіміко-термічної обробки чи гарту, тип чавуну, наявність флокенів і неметалевих включень.

Макрошліфи – це спеціально підготовлені зразки, що дають змогу вивчати структуру злитків і заготовок. На них виявляють усадкові раковини, ліквацийні зони, волокнисту будову металу, гарячі й холодні тріщини, розшарування, а також зміни в зварних швах. Після обробки поверхня макрошліфа протравлюється відповідними реактивами, що дозволяє побачити кристалічну будову, дендритну структуру, зони дифузії тощо. Дослідження необхідно проводити відразу після травлення, адже з часом поверхня окислюється [1].

Отже, макроструктурний аналіз – простий і доступний метод, який дає змогу швидко оцінити якість металу або сплаву, виявити дефекти, визначити особливості термообробки та структури. Він є ефективним доповненням до більш точних методів мікроаналізу та кількісної металографії.

На відміну від мікроаналізу макроструктурний аналіз не дозволяє визначити подробиці структури металу. Тому він часто є не остаточним, а лише попереднім видом дослідження. Характеризуючи багато особливостей будови

металів, макроаналіз дозволяє вибрати ті ділянки, для яких потрібне подальше мікроскопічне дослідження.

Наступним етапом у металографічному дослідженні металів після макроаналізу є мікроструктурний аналіз [1]. Він проводиться на спеціально підготовлених зразках за допомогою металографічного мікроскопа зі збільшенням від 50 разів і вище. Вивчення структури металів при більш високих, ніж при макроаналізі, збільшеннях дозволяє значно розширити знання про структуру металу, пояснити вплив хімічного складу, різних видів обробки та умов кристалізації на властивості металів і сплавів. Завдання, що вирішуються мікроструктурним аналізом, мають як кількісний, так і якісний характер.

У промисловості використовують чисті метали та однофазні тверді розчини зі структурами, сформованими під час кристалізації (литими), після відпалу, після пластичної деформації або поєднанням цих процесів. У литому стані такі метали мають дендритну структуру, яка відображає умови кристалізації, напрям тепловідведення та наявність включень. За допомогою травлення виявляють фігури травлення, дислокації та тонку структуру кристалів, а також ступінь дендритної ліквації. Для цього застосовують різні збільшення мікроскопа: невеликі (×50–200) для вивчення ліквації, великі — для дислокацій та блокової будови.

При холодній пластичній деформації зерна витягуються, формуючи текстуру деформації; подальший відпал сприяє утворенню нових рівноосних зерен. За гарячої деформації цей процес поєднаний із рекристалізацією, що одразу дає рівноосну структуру [1]. Неметалеві включення при деформації змінюють форму, яка зазвичай зберігається після відпалу. Таким чином, мікроскопічний аналіз дозволяє визначити, чи структура є литою, деформованою або відпаленим металом.

Крім якісного аналізу, здійснюють і кількісний — зокрема визначають середній розмір зерна, що істотно впливає на механічні та технологічні властивості. Такий контроль проводять у лабораторіях металургійних і машинобудівних підприємств [2].

У багатофазних сплавах мікроаналіз дає змогу визначити кількість і розподіл фаз, що впливають на властивості. Багатофазні структури часто утворюються за евтектоїдним і перитектоїдним механізмами. Важливим є вивчення фаз, що виділяються з пересичених твердих розчинів під час

охолодження та старіння, адже їх форма й розподіл визначають механічні властивості сплавів. Первинні багатофазні структури після кристалізації чи фазових перетворень часто піддають відпалу, щоб зняти внутрішні напруги та покращити морфологію фаз.

Металографічний аналіз дозволяє оцінити вплив температури нагріву та умов пластичної деформації на структуру й властивості багатофазних сплавів [1]. Особливу увагу приділяють нерівноважним станам, що виникають при швидкому охолодженні (наприклад, загартуванні) та різко змінюють властивості металу. Контроль процесів структуроутворення забезпечує вибір оптимальних режимів нагрівання й охолодження для досягнення необхідних експлуатаційних характеристик сплавів.

1.3 Обладнання, приладдя, матеріали

Для виконання лабораторної роботи використовуються:

1.3.1. Обладнання:

– оптичний металографічний мікроскоп з різними збільшеннями;

– обладнання для макроаналізу (лупа, освітлювальні прилади, установка для травлення макрошліфів);

– шліфувально-полірувальний верстат;

– витяжна шафа для проведення травлення;

1.3.2. Приладдя:

– набір шліфувальних та полірувальних матеріалів (наждачний папір різної зернистості, полірувальні пасти);

– скляний посуд для розчинів (чашки Петрі, колби, піпетки);

– мікрометр або штангенциркуль для вимірювання розмірів зразків;

1.3.3. Матеріали:

– Зразки алюмінієвих сплавів для макро- і мікродосліджень;

– реактиви для травлення (наприклад, 0,1% водний розчин плавікової кислоти);

– дистильована вода та спирт для промивання зразків.

1.4 Порядок проведення досліджень

1.4.1. Підготовка зразків до макроаналізу

– Відібрати зразки металів та сплавів.

– Зробити шліфи (відрізати частину зразка, відшліфувати поверхню).

– Провести травлення поверхні зразків відповідними реактивами.

– Дослідити макроструктуру неозброєним оком або за допомогою лупи.

– Виявити можливі макродефекти (усадкові раковини, тріщини, пористість, сегрегацію тощо).

1.4.2. Підготовка зразків до мікроаналізу

– Виконати послідовне шліфування поверхні зразка наждачним папером різної зернистості.

– Провести полірування зразка до дзеркальної поверхні.

– Здійснити травлення полірувальної поверхні 0,1% водним HF реактивами для виявлення мікроструктури.

1.4.3. Проведення мікроаналізу

– Розглянути зразки під металографічним мікроскопом при різних збільшеннях.

– Визначити характерні структурні складові металу (зерна, фази, карбіди, графіт, неметалеві включення тощо).

– Описати тип мікроструктури та зіставити її з відомими еталонними прикладами.

1.4.4. Методи кількісної металографії

– Визначити середній розмір зерна (методом січних).

– Оцінити частку структурних складових методом Глаголєва.

1.5 Обробка експериментальних даних та порядок оформлення звіту

1.5.1 За результатами макроаналізу:

– зафіксувати виявлені макродефекти (якщо наявні);

– зробити замальовки або фотознімки макроструктур;

– описати характер зон кристалізації металу.

1.5.2 За результатами мікроаналізу:

– замалювати або сфотографувати мікроструктуру при різних збільшеннях;

– визначити та описати структурні складові;

– порівняти отриману мікроструктуру з еталонними прикладами.

1.5.3. Для кількісної металографії:

– провести вимірювання розміру зерна / дендритної комірки (методом січних) за формулою:

$$Dcp = \frac{\sum ділень \cdot Z_0}{\sum зерен} \; ; \qquad (1.1)$$

Де Dcp – середній діаметр зерна;

Z_0 – ціна ділення окуляр-мікрометра:

$$Z_0 = \frac{M \cdot 0.01}{N} \qquad (1.2)$$

– оцінити кількісний вміст основних структурних складових методом Глаголєва: за формулою (1.3) визначити частку структурних складових сплавів, розрахунок провести для 10 полів.

$$E = \frac{X \cdot 100}{289} \qquad (1.3)$$

Де X – кількість точок перетину ліній на структурній складовій

– занести результати у таблицю 1.1.

1.5.4 Виконати аналіз одержаних даних та сформулювати висновки щодо впливу структури металу на його властивості.

Таблиця 1.1 - Результати макро- і мікродосліджень металевих матеріалів

№ зразка	Метод дослідження	Спостереження (опис)	Замальовка / фото	Виміряні параметри	Висновок
1	Макроаналіз		рисунок 1.1		
2	Мікроаналіз		рисунок 1.2		
3	Кількісна металографія		рисунок 1.3	Середній розмір зерна / дендритної комірки Частка фазових складових	

1.6 Завдання на самостійну роботу

За матеріалами лекцій та навчальним посібникам вивчити принцип дії та улаштування металографічного мікроскопа та підготуватися до виконання роботи.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Назвіть задачі та можливості макроструктурного та мікроструктурного аналізу.
2. З якою метою проводять травлення мікрошліфів?
3. Які кількісні дані можна отримати методо=ом мікроаналізу?
4. В чому полягає суть визначення частки фаз та структурних складових методом Глаголєва?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ НЕЗАЛІЗНИХ МЕТАЛЕВИХ МАТЕРІАЛІВ: МЕХАНІЧНІ ВИПРОБУВАННЯ

2.1. Ціль проведення лабораторного заняття

Ознайомитися з основними методами механічних випробувань незалізних металів та їх сплавів, навчитися визначати їхні механічні характеристики (межу міцності, межу плинності, відносне подовження, твердість тощо) та зробити висновки про придатність матеріалів до практичного використання.

Завдання проведення лабораторного заняття:

Внаслідок проведення лабораторного заняття студенти повинні:

знати: основні механічні властивості металів та їх характеристику, особливості поведінки незалізних металів і сплавів під навантаженням, методи випробувань та їх стандартизацію, значення механічних випробувань у контролі якості та підборі матеріалів для промислових потреб.

вміти: фіксувати та обробляти експериментальні дані, аналізувати результати випробувань та робити висновки щодо властивостей матеріалу.

2.2. Основні теоретичні положення

Механічні властивості металів і сплавів відображають їх здатність чинити опір зовнішнім навантаженням, деформуванню та руйнуванню [2-3]. Для їх вивчення застосовують різні методи випробувань, які відтворюють реальні умови експлуатації виробів. Методи поділяють на статичні, динамічні та циклічні.

Статичні випробування проводять при повільному зростанні навантаження, що дає можливість детально дослідити поведінку матеріалу в умовах рівномірної дії сили. До таких належать випробування на розтяг, стиск, згин та кручення [2]. Вони дозволяють визначити як міцнісні, так і

пластичні характеристики, а також зробити висновки про межі пружної та пластичної деформацій.

Найбільш поширеним методом є випробування на розтяг [2, 4], яке дає змогу встановити одразу кілька важливих параметрів: межу пропорційності, що визначає область дії закону Гука; межу пружності, після якої залишкова деформація стає незворотною; межу плинності, що характеризує початок значних пластичних деформацій; умовну межу плинності, яка фіксується при подовженні на 0,2%; а також тимчасовий опір розриву – максимальне напруження, яке матеріал може витримати. Після руйнування зразка визначають відносне подовження та звуження, що свідчать про його пластичність.

Стискання, як метод випробувань, застосовують переважно для крихких матеріалів, наприклад чавуну, адже вони не витримують розтягувальних навантажень [2-3]. При цьому також визначають межі пружності, плинності та міцності, хоча картина деформацій відрізняється від розтягу.

Згин використовують у тих випадках, коли необхідно оцінити властивості крихких матеріалів, що часто руйнуються саме при такому виді навантаження. Кручення дозволяє досліджувати поведінку металів під дією крутних моментів і дає змогу визначити межу пружності, плинності, міцності та оцінити пластичність через відносний зсув [3].

Динамічні випробування [2], на відміну від статичних, характеризуються швидкою дією навантаження. Найчастіше проводять випробування на ударний згин, що дає змогу визначити ударну в’язкість. Цей показник особливо важливий для оцінки схильності матеріалів до крихкого руйнування.

Окрему групу становлять випробування на твердість, які відображають опір матеріалу місцевій пластичній деформації. Для цього застосовують методи Бринелля, Роквелла та Віккерса, що відрізняються формою індентора, способом прикладання навантаження та сферою застосування [2-3].

Не менш важливими є випробування на втому, повзучість та тривалу міцність, які дозволяють оцінити довговічність матеріалів у складних умовах експлуатації – при змінних навантаженнях, високих температурах або тривалому статичному впливі.

Усі ці методи є складовою металографічного контролю, адже лише завдяки випробуванням можна об’єктивно оцінити, чи відповідає матеріал заданим вимогам та чи придатний він для використання у виробах, що працюють у різних умовах.

Випробування на розтяг

Основні характеристики, що визначаються:

- межа пропорційності Rp– напруження, за якого відхилення від прямолінійної залежності стає помітним;
- умовна межа пружності $R_{p0,05}$, $R_{p0,1}$– напруження, при якому виникає залишкова деформація 0,05–0,1 %;
- межа плинності (рисунок 2.1):
  - фізична Re– при наявності площадки плинності;
  - верхня R_{eH} і нижня R_{eL}– у випадку «зуба» плинності;
  - умовна $R_{p0,2}$– коли перехід у пластичний стан відбувається поступово.

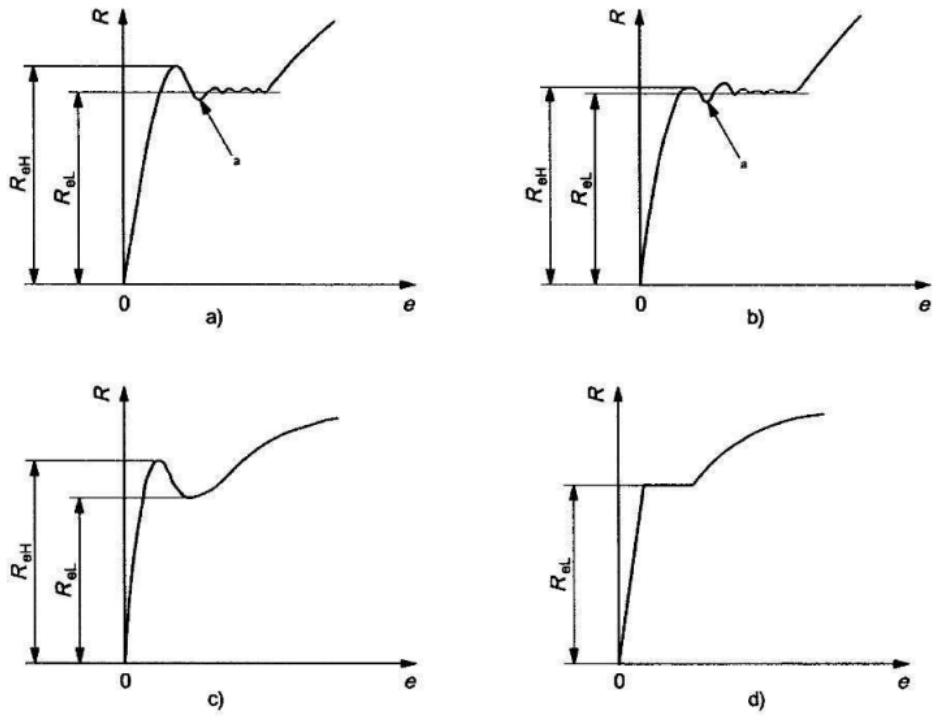


Рисунок 2.1 - Приклади верхньої та нижньої границь плинності на кривих різного типу

Тимчасовий опір розриву Rm визначається за найбільшим навантаженням, яке витримує зразок перед руйнуванням:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad (2.1)$$

де Fm– максимальне навантаження.

Пластичність матеріалу оцінюють за:

- відносним подовженням

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} * 100\% \quad (2.2)$$

де L_u та L_0– кінцева та початкова довжина після випробування;

- відносним звуженням

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} * 100\% \quad (2.3)$$

де S_u – площа найменшого поперечного перерізу після розриву, S_0 – вихідна площа поперечного перерізу.

Якщо зразок утворює шийку, подовження стає нерівномірним, тому додатково враховують **рівномірне подовження** A_g– до моменту утворення шийки.

Для випробувань використовують стандартні зразки круглого перерізу згідно з **ДСТУ ISO 6892-1:2019**. Найпоширеніші – з початковим діаметром d_0=10 мм d і розрахунковою довжиною $L_0=5d_0$ або $10d_0$. Форма головки зразка залежить від конструкції захватів випробувальної машини.

Перед випробуванням зразки розмічають, визначають початкові розміри L_0,d_0,S_0. Після розриву вимірюють кінцеву довжину Lu та діаметр d_u щоб розрахувати A та Z.

2.3. Обладнання, приладдя, матеріали

2.3.1. Обладнання: універсальна випробувальна машина.

2.3.2. Приладдя: штангенциркуль, мікрометр.

2.3.3. Матеріали: п’ятикратні циліндричні зразки для випробування.

2.4. Порядок проведення досліджень згідно з ДСТУ ISO 6892-1:2019

2.4.1. Перед початком роботи ознайомитися з випробувальним обладнанням.

2.4.2. Проведення вимірювань і випробувань

2.4.2.1. Вимірювання початкових розмірів зразка. Початковий діаметр зразка d_0 вимірюють мікрометром з точністю до 0,01 мм не менш ніж у трьох місцях – у середній частині та на межах робочої довжини.

За початкову площу поперечного перерізу S_0 приймають найменше з отриманих значень, округлене до 0,05 мм².

2.4.2.2 Обчислення розрахункової довжини. Початкову розрахункову довжину зразка L_0 визначають за формулою:

$$L_0=5{,}65\ d_0 \qquad (2.4)$$

Отримане значення округлюють у більшу сторону до найближчого числа, кратного 5.

2.4.2.3. Розмітка зразка.Студенти проводять розмітку початкової розрахункової довжини на робочій поверхні зразка за допомогою керна.

2.4.3. Проведення випробування. Навчальний майстер здійснює розтягування зраз..ків на випробувальній машині під дією плавно зростаючого навантаження до руйнування (згідно з ДСТУ ISO 6892-1:2019).Найбільше навантаження перед руйнуванням приймають за F_m.

Результати вимірювань та розрахунків заносять у таблицю 2.1.

2.5. Обробка експериментальних даних

2.5.1. Тимчасовий опір розриву. Тимчасовий опір Rm, Н/мм², обчислюють за формулою (2.1).

2.5.2. Межа плинності (див. рис. 2.1).

2.5.2.1. Якщо на діаграмі розтягу є площадка плинності, визначають фізичну межу плинності R_e (верхню R_{eH} і нижню R_{eL}:

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \qquad (2.4)$$

де F_e – навантаження, що відповідає межі плинності.

2.5.2.2. Якщо площадка плинності відсутня, визначають умовну межу плинності Rp0,2:

$$R_{p0.2} = \frac{F_{0.2}}{S_0} \qquad (2.5)$$

де $F_{0,2}$ – навантаження, при якому залишкова пластична деформація становить 0,2% від початкової довжини L_0. Схема визначення $Rp_{0,2}$ наведена на рисунку 2.2.

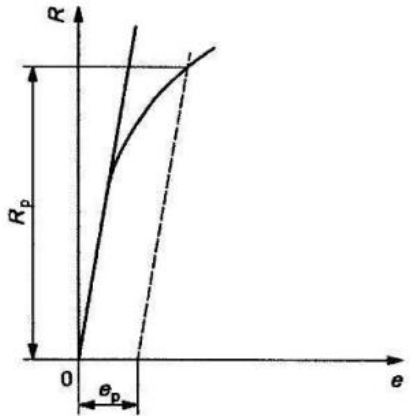


Рисунок 2.2 – Схема визначення умовної межі плинності $R_{p0,2}$

2.5.3. **Відносне подовження після розриву.** Відносне подовження A, % обчислюють за формулою (2.2)

Для визначення L_u зруйновані частини зразка складають так, щоб їх осі утворювали пряму лінію. Вимірювання проводять штангенциркулем між мітками, що обмежують початкову розрахункову довжину.

2.5.4. **Відносне звуження після розриву.** Для визначення відносного звуження Z, % вимірюють мінімальний діаметр після розриву du у двох взаємно перпендикулярних напрямах. За середнім арифметичним значенням обчислюють площу мінімального поперечного перерізу Su. Відносне звуження обчислюють за формулою (2.3)

2.5.5. Усі дані заносять у таблицю.

Таблиця 2.1 – Результати вимірювань і розрахунку характеристик механічних властивостей при статичному розтягуванні

№ зразка	**d_0 мм**	**L_0 мм**	**S_0 мм²**	**D_u, мм**	**L_u, мм**	**F_m, Н**	**F_e або $F_{0,2}$, Н**	**R_m, Н/мм²**	**R_e або $R_{p0,2}$, Н/мм²**	**A, %**	**Z, %**	**Примітка**
1												
2												
3												

2.6. Завдання на самостійну роботу

За матеріалами лекцій та навчальним посібникам вивчити методики визначення твердості та підготуватися до виконання роботи.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Якими параметрами характеризують міцнісні та пластичні властивості матеріалів?
2. Які властивості матеріалу відображає модуль нормальної пружності?
3. Що таке межа плинності, умовна межа плинності, межа міцності і яким чином їх визначають?
4. Що таке відносне подовження та відносне стискання? Яким чином їх визначають?
5. Яким чином можна визначити залишкову деформацію за діаграмою розтягу та за зразком для випробувань?
6. Які зразки використовують для випробувань на статичний розтяг і як їх готують до випробувань?
7. Яка нормативно-технічна документація застосовується для оцінки механічних властивостей матеріалів?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

ВИВЧЕННЯ СТРУКТУРИ ТА ФАЗОВОГО СКЛАДУ ЛИВАРНИХ ТА ДЕФОРМОВАНИХ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

3.1. Ціль проведення лабораторного заняття

Вивчити структуру, фазовий склад та властивості найбільш уживаних у промисловості сплавів на основі алюмінію.

Завдання проведення лабораторного заняття:

Внаслідок проведення лабораторного заняття студенти повинні:

- знати: структуру та властивості найбільш уживаних у промисловості алюмінієвих сплавів, взаємозв'язок між їх фазовим складом, структурою та експлуатаційними властивостями та основні галузі їх застосування;

- вміти: знаходити на діаграмах стану відповідний сплав та визначати його положення у системі; визначати структуру і фазовий склад сплавів у рівноважному та нерівноважному станах; аналізувати отримані дані та робити висновки щодо вибору матеріалу для конкретних умов експлуатації; обґрунтовувати доцільність застосування певного металу чи сплаву в залежності від технічних вимог і сфери використання.

3.2. Основні теоретичні положення

Алюміній – легкий метал із питомою вагою 2,7 г/см³, що визначає його цінність у конструкційних сплавах для зменшення маси машин і споруд. У чистому вигляді він має низьку міцність (σВ = 60–100 МПа), проте відзначається високою пластичністю (δ до 60%) та корозійною стійкістю. Основне застосування знаходить у вигляді сплавів з міддю, магнієм, кремнієм та іншими елементами, що значно підвищують його міцність [5].

Кристалізується алюміній у гранецентрованій кубічній ґратці, не має алотропічних перетворень, плавиться при 660 °С і характеризується високою прихованою теплотою плавлення. За електро- та теплопровідністю поступається лише сріблу й міді, що зумовило його широке використання в електротехніці. Метал добре деформується тиском, зміцнюється при

пластичній деформації, однак межа міцності не перевищує 170–180 МПа; відпал при 300–350 °С відновлює пластичність.

Висока хімічна стійкість алюмінію пояснюється утворенням на поверхні щільної оксидної плівки, яка захищає від корозії; чим менше домішок, тим краща стійкість. Додавання 0,7–0,8% літію додатково підвищує цей показник. Основними домішками технічного алюмінію є залізо та кремній. Залізо утворює крихкі включення $FeAl_3$ на межах зерен, а кремній – тверді розчини та евтектику (11,7% Si), що збільшують твердість, але знижують пластичність. При одночасній наявності Fe і Si формується тверда крихка потрійна евтектика, яка значно знижує в’язкість литого алюмінію. Усунути її негативний вплив можна куванням або тривалим сфероїдизуючим відпалом.

Алюмінієві сплави

Легування алюмінію міддю, магнієм, кремнієм, марганцем і цинком підвищує його міцність при зниженні пластичності. Найбільш поширені системи Al–Cu, Al–Mg, Al–Zn, Al–Mg–Si, Al–Cu–Mg поєднують малу густину, високу міцність і достатню корозійну стійкість. Властивості поліпшуються введенням Cr, Ni, Li, Mn та модифікуванням (Ti, Na, Be, РЗМ) [5].

Алюміній не утворює твердих розчинів із необмеженою розчинністю: зростання розчинності відбувається лише з підвищенням температури (рис. 3.1). Інтерметалідні сполуки, що виникають у сплавах, підвищують міцність, але зменшують пластичність.

Наявність змінної розчинності дозволяє зміцнювати сплави термічною обробкою (загартування + старіння), що забезпечує високі характеристики міцності (рис. 3.2). Найбільший ефект мають складні системи Al–Mg–Si, Al–Mg–Cu, Al–Zn–Cu–Mg.

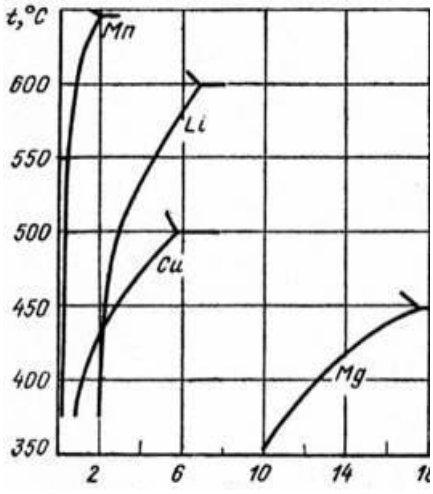
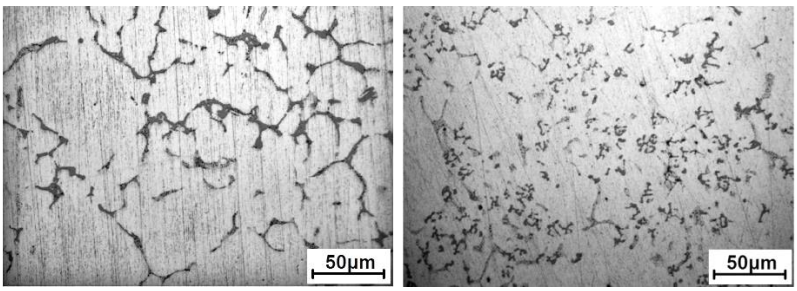


Рисунок 3.1 — Криві розчинності легувальних елементів в алюмінії



а б

Рисунок 3.2 – Мікроструктура сплаву Д16 в литому стані (а) та після загартування та штучного старіння (б)

Усі алюмінієві сплави умовно поділяють на ливарні та деформовані, які бувають зміцнюваними і незміцнюваними термообробкою (рис. 3.3) [5]. Деформовані незміцнювані мають високу пластичність і зміцнюються лише холодною деформацією, тоді як зміцнювані набувають високої міцності після загартування й старіння. Ливарні сплави з евтектикою відзначаються міцністю та хорошими ливарними властивостями, але низькою пластичністю.

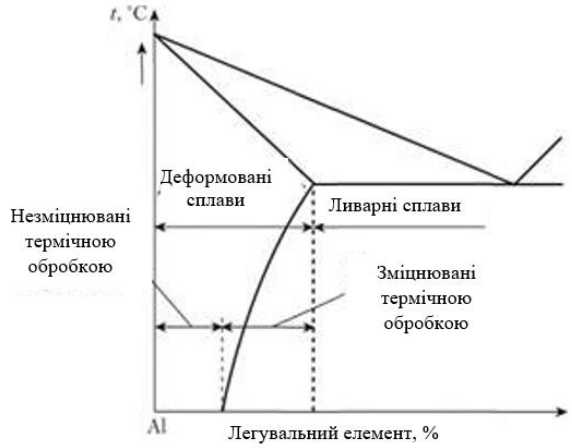


Рисунок 3.3 — Класифікація алюмінієвих сплавів за фазовою діаграмою

Алюмінієві сплави, що деформуються

Сплави, які не зміцнюються термічною обробкою, представлені алюмінієво-магнієвими (АМг) і алюмінієво-марганцевими (АМц). У системах з 2–5% Mg (іноді з добавками Cr, Mn, Ti) сплави мають високу пластичність (δ = 18–25% при σВ до 280–300 МПа). За міцністю вони поступаються дуралюміну, проте значно стійкіші до корозії. При підвищенні вмісту магнію до 8–12% межа міцності зростає до 380–400 МПа, але пластичність різко зменшується, і обробка тиском ускладнюється. АМг-сплави не піддаються термообробці, застосовуються у відпаленому або зміцненому стані.

АМц-сплави (1–1,6% Mn) мають меншу міцність ($\sigma_В$ = 120–200 МПа при δ = 10–20%), зате відрізняються дуже високою корозійною стійкістю. Сплави АМг і АМц використовуються для штампованих виробів, де потрібні хороша зварюваність і захист від корозії; у разі необхідності підвищення міцності застосовуються у зміцненому стані.

Сплави, що зміцнюються термічною обробкою, містять мідь, магній, кремній та інші елементи в кількості, що перевищує їх розчинність при кімнатній температурі, завдяки чому підлягають загартуванню і старінню. Найбільшого застосування набули сплави систем Al–Cu, Al–Mg–Si, Al–Mg–Cu, Al–Zn–Cu–Mg.

Подвійні сплави Al–Cu (до 5,6% Cu) після загартування і старіння при 100–150 °C помітно зміцнюються. Наприклад, при 5% Cu після старіння міцність сягає 400–420 МПа проти 300 МПа у свіжезагартованому стані.

Сплави Al–Mg–Si (авіаль) зміцнюються завдяки фазі Mg_2Si. Оптимальні властивості формуються після старіння при 140–160 °C: σВ = 300–380 МПа при δ = 8–18%. У відпаленому стані міцність лише 120–130 МПа, після загартування – 170–200 МПа. Механічні характеристики додатково підвищуються нагартуванням.

До найбільш поширених термооброблюваних сплавів належить дуралюмін (Al–Cu–Mg) [5]. Його типовий склад: 3,8–4,9% Cu, 0,4–0,8% Mg, 0,4–0,8% Mn, домішки Si та Fe. Мідь і марганець забезпечують зміцнення, тоді як залізо є шкідливою домішкою, що знижує пластичність і зміцнюваність. У литому стані структура дуралюміну складається з твердого розчину, інтерметалідів $CuAl_2$, Mg_2Si, Al_2CuMg та залізовмісної евтектики. У відпаленому стані його міцність невисока ($\sigma_B \approx 220$ МПа, δ = 20%).

Значне підвищення міцності забезпечує термічна обробка за рахунок виділення вторинних інтерметалідів.

Загартування дуралюміну проводиться при ~500 °C (див. рис. 3.2). Природне старіння пов’язане з формуванням зон Гіньє–Престона, що підвищують міцність до 380–500 МПа. Оптимальні властивості: σВ = 440–480 МПа при δ = 15–17%. Додаткове нагартування дозволяє підняти σВ до 600 МПа, але з падінням пластичності до 4%.

До близьких за складом сплавів належать жароміцні АК2 і АК4 (Al–Cu–Mg–Si з підвищеним Fe), що працюють при 150–250 °C. Їх міцність у нормальних умовах близька до дуралюміну ($\sigma_B \approx 370$ МПа, δ = 5%), але при високих температурах вони перевершують його завдяки стабільним хімічним сполукам. Використовуються для деталей двигунів – поршнів, головок циліндрів тощо.

Найбільш високу міцність серед термооброблюваних мають складні сплави Al–Mg–Zn–Cu. Типовий представник – сплав В95 (6% Zn, 2,3% Mg, 1,7% Cu, 0,4% Mn, 0,2% Cr), який після загартування при 460–480 °C і старіння при 120–150 °C досягає σВ ≈ 600 МПа при δ = 12%. Проте при температурах вище 150 °C його міцність швидко знижується, а корозійна

стійкість нижча, ніж у дуралюміну. У деяких випадках σ_B може досягати 700–800 МПа, але при дуже низькій пластичності.

Ливарні алюмінієві сплави

Найбільш поширені – силуміни (Al–Si з 5–14% Si) [5]. Це до- і заевтектичні сплави з невисокою температурою плавлення (таблиця 3.1). Евтектика Al–Si забезпечує їм високу рідкотекучість, добру заповнюваність форми, малу усадку, стійкість до утворення тріщин при затвердінні. Силуміни відзначаються доброю зварюваністю та високою корозійною стійкістю.

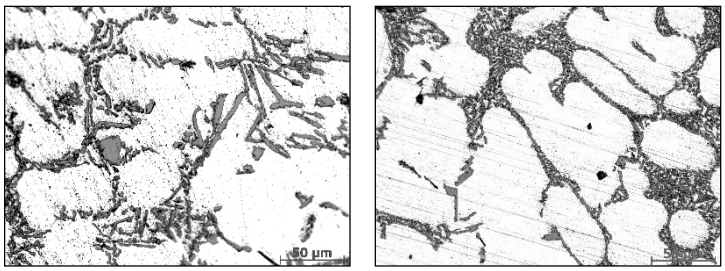
Звичайний силумін (12–13% Si) має структуру грубодиференційованої евтектики α-Al+β-Si і кристалів первинного кремнію. Немодифікований силумін характеризується невисокою міцністю (σ_B = 120–160 МПа, $\delta \leq 1\%$) і застосовується для не навантажених деталей. Термічна обробка майже не зміцнює такі сплави.

Таблиця 3.1 – Хімічний склад і механічні властивості ливарних алюмінієвих сплавів

Марка сплаву	Mg	Si	Mn	Cu	Fe	∑ домішок	σB, МПа	σ0,2, МПа	НВ
АК9ч	0,17–0,3	8,0–10,5	0,25–0,50	–	0,6–1,2	1,1–1,7	260	200	60
АК5м	0,35–0,6	4,5–5,5	–	1,0–1,5	0,6–1,5	1,0–1,7	240	180	80
АК7ч	0,2–0,4	6,0–8,0	–	–	0,3–1,0	1,0–1,9	200	110	75

Властивості силумінів значно покращує модифікування – введення в розплав малих добавок (Na, Sr, РЗМ).

Так, модифікування Sr приводить до формування токнодиференційованої евтектики і забезпечує значно кращі властивості. Наприклад, АК7ч після модифікування Sr: σ_B = 250–270 МПа, δ = 8–12%.



а б

Рисунок 3.4 – Структура сплава АК7ч вихідного складу (а) та при модифікуванні 0,1% Sr

3.3. Обладнання, приладдя, матеріали

3.3.1. Обладнання: металографічний мікроскоп, окуляр мікрометр, окуляр з сіткою на 289 точок (метод Глаголєва).

3.3.2. Фазові діаграми алюмінієвих сплавів (каталог).

3.3.3. Матеріали: металографічні зразки деформованих та ливарних алюмінієвих сплавів.

3.4. Порядок проведення досліджень

3.4.1. Роздивитися мікроструктури металографічних зразків деформованих та ливарних алюмінієвих сплавів.

3.4.2. Методом Глаголєва визначити долі фаз та структурних складових дослідних сплавів.

3.4.3. За допомогою окуляр-мікрометра визначити середній розмір зерна (дендритної комірки).

3.4.4. Розрахувати приблизний хімічний склад дослідних сплавів, знайти на діаграмах стану відповідний сплав та визначати його положення у системі.

3.4.5. За допомогою довідкової літератури оцінити механічні властивості дослідних сплавів.

3.5. Обробка експериментальних даних

3.5.1. Точковим методом Глаголєва за формулою (1.3) визначити частку структурних складових сплавів, розрахунок провести для 10 полів.

3.5.2. Визначити середній розмір зерна (дендритної комірки) за формулами 1.1-1.2.

3.5.3. Розрахувати кількість другого компоненту алюмінієвого сплаву, виходячи з кількісного аналізу мікроструктури за формулою:

$$Si(Cu) = \frac{Si(Cu)_{Al} \cdot \%Al}{100} + \frac{Si(Cu)_{\text{евт}} \cdot \%\text{евт}}{100} \qquad (3.4)$$

3.5.4. На фазовій діаграмі позначити дослідний сплав, визначити за діаграмою фазовий склад.

3.5.5. Користуючись довідником, визначити механічні властивості дослідного сплаву.

3.5.6. Занести отримані дані до табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Кількісні дані мікроструктури алюмінієвих сплавів

№	Сплав	Структурна складова		Хімічний склад сплаву	Фазовий склад за діаграмою	Механічні властивості за довідником
		Кількість евтектики, %	Розмір зерна/ дендритної комірки, мкм			

3.6. Завдання на самостійну роботу

За матеріалами лекцій та навчальним посібникам вивчити питання впливу легуючих елементів та домішок на структуру, фазовий склад та властивості алюмінієвих сплавів та підготуватися до виконання лабораторної роботи.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Чим відрізняються ливарні та деформовані алюмінієві сплави? Як досягається необхідний ефект?

2. Від чого залежить, чи піддається ливаний / деформований алюмінієвий сплав термічній обробці?

3. Опишіть структуру ливарного алюмінієвого сплаву АК7ч в литому стані. Опишіть структуру деформованого алюмінієвогго сплаву 7075 в литому стані.

4. Який вплив робить модифікування на структуру силумінів?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4

ВИВЧЕННЯ СТРУКТУРИ ТА ФАЗОВОГО СКЛАДУ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ

4.1. Ціль проведення лабораторного заняття

Вивчення структури та фазового складу титанових сплавів із використанням методів металографічного аналізу для встановлення залежності між фазовим станом, мікроструктурою та експлуатаційними властивостями матеріалу.

Завдання проведення лабораторного заняття:

Внаслідок проведення лабораторного заняття студенти повинні:

- знати: основні кристалічні модифікації титану (α- і β-фази) та їхні характеристики, вплив легувальних елементів на фазовий склад титанових сплавів, зв'язок між структурою, фазовим складом і механічними властивостями титанових сплавів;
- вміти: визначати фазовий склад за мікроструктурними ознаками, аналізувати вплив складу і термічної обробки на структуру титанових сплавів, робити висновки про можливе використання сплавів залежно від їх структури та властивостей.

4.2. Основні теоретичні положення

Титан — легкий метал із високою питомою міцністю, корозійною стійкістю та здатністю зберігати міцність при підвищених температурах [5]. За поширеністю (0,6%) він посідає 4-те місце серед конструкційних металів після Al, Fe, Mg. Він алотропний:

α-модифікація (до 882,5 °C) має гексагональну гратку;

β-модифікація (від 882,5 °C до температури плавлення) — кубічну.

Корозійна стійкість титану перевищує навіть нержавіючі сталі завдяки захисній оксидній плівці. Він стійкий у морській воді, органічних кислотах, багатьох агресивних середовищах, проте активно реагує з HF, HCl, H_2SO_4, H_3PO_4. Легування (Re, Mo, Nb тощо) ще більше підвищує його стійкість.

При високих температурах титан активно взаємодіє з газами (O_2, N_2, H_2) та іншими речовинами. При нагріванні на повітрі утворюється оксид TiO_2. Він добре поглинає водень (у 25 000 разів інтенсивніше, ніж алюміній), але водень можна видалити вакуумним відпалом.

Титан утворює тверді розчини з багатьма елементами. За впливом на поліморфізм їх поділяють:

– α-стабілізатори (Al, Ga, O, N, C) — підвищують температуру перетворення;

– β-стабілізатори:

– евтектоїдоутворювачі (Cr, Mn, Fe, Ni тощо);

– ізоморфні (V, Mo, Nb, Ta, W);

– квазі-ізоморфні (Re, Ru, Ir та ін.);

– нейтральні елементи (Sn, Zr, Hf, Ge) майже не впливають.

Найважливішим є легування алюмінієм. У системі Ti–Al (рисунок 4.1) утворюються інтерметаліди Ti_3Al (α_2-фаза) та TiAl (γ-фаза), які зміцнюють сплави.

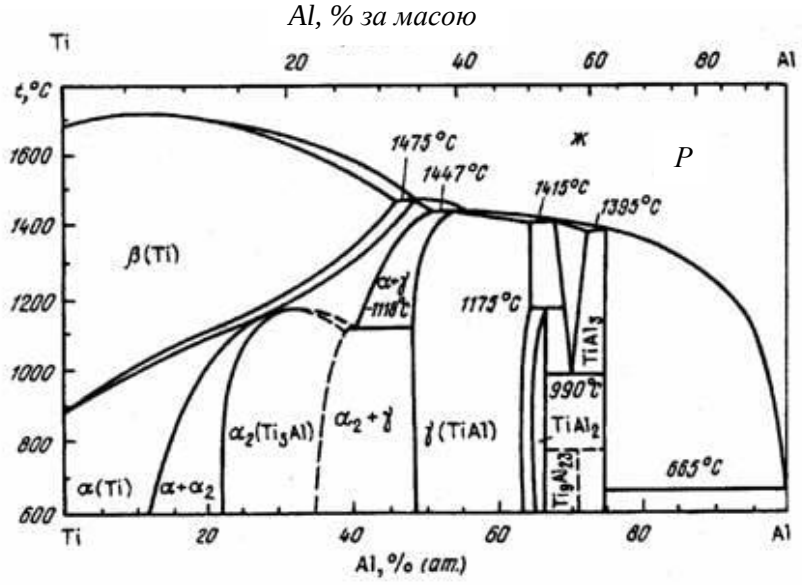


Рисунок 4.1 – Діаграма станv системи Ti-Al

Al, % am

У титані головним є поліморфне перетворення α⇄β. При повільному охолодженні воно відбувається дифузійно, утворюючи зернисту структуру, а при швидкому — мартенситно, формуючи пластинчасту або голчату. У сплавах це перетворення відбувається в інтервалі температур і може давати

три типи мікроструктур: β-перетворену (пластинчасту), дуплексну (суміш α і β) та рівноважну глобулярну.

Евтектоїдне перетворення β→α+γ виникає у сплавах із β-стабілізаторами. У перехідних елементів воно йде дуже повільно, а у неперехідних — швидко, що ускладнює фіксацію β-фази при кімнатній температурі. Оскільки евтектоїд погіршує механічні властивості, його утворення намагаються запобігати.

При швидкому охолодженні β-фаза може перетворюватися у мартенсит. Фаза α′ (гексагональна) має пластинчасту будову і є пересиченим розчином заміщення. При сильнішому пересиченні виникає α″-фаза з ромбічною граткою, яка знижує міцність, але підвищує пластичність. У ряді випадків формується ω-фаза — наночастки всередині β-матриці, які підвищують зміцнення, але зменшують пластичність.

Стабільність β-фази визначається кількістю β-стабілізаторів: при малих концентраціях вона механічно нестійка, при середніх — розкладається з виділенням зміцнюючих фаз, а при високих стає термодинамічно стабільною.

До метастабільних фаз у титанових сплавах належать пересичена αН, мартенсити α′ та α″, ω- і βН-фази. αН виникає при зниженні розчинності легуючих елементів, α′-мартенсит зберігає пластичність, α″ підвищує деформівність за рахунок зниження міцності, ω-фаза існує у вигляді наночасток, а βН характеризується нестачею стабілізаторів і є нерівноважною.

Класифікація титану та його сплавів

Основою виробництва титану є титанова губка, яку отримують магнієтермічним методом із TiO_2. Вона має високу в’язкість і маркується за твердістю (ТГ90–ТГ150). Для отримання монолітного титану губку переплавляють у вакуумі або інертному газі, утворюючи електрод, з якого методом вакуумно-дугового переплаву (ВДП) отримують злитки. Технічний титан класифікують за чистотою (ВТ1-00, ВТ1-0, ВТ1-1, ВТ1-2). Найчистіший йодидний титан виробляють методом термічної дисоціації.

За технологією виробництва титан поділяють на деформівні та ливарні сплави. За здатністю до зміцнення – на термічно зміцнювані (дисперсійне

твердіння) та незміцнювані. За призначенням – на конструкційні загального призначення, жароміцні, корозійностійкі та кріогенні. За міцністю сплави бувають: маломіцні (σв < 500 МПа), середньої міцності (500–1000 МПа) та високоміцні (σв > 1000 МПа).

Класифікація за структурою (за С.Г. Глазуновим):

- α-сплави – структура тільки α-фази;
- псевдо-α-сплави – α-фаза + невелика кількість β;
- (α+β)-сплави – рівномірне поєднання α та β;
- псевдо-β-сплави – α-фаза з великою кількістю β, при загартуванні переходять у β;
- β-сплави – структура β-фази.

У загартованому стані розрізняють:

- мартенситні сплави (α′, α″);
- перехідні (мартенсит + β);
- β-сплави (стабільна β або β+ω).

Найсильніше зміцнюють титан Fe, Mn, Si; середньо – Sn, V, Al; слабко – Zr, Nb, Ta. Вплив легуючих елементів на властивості титану представлені в таблиці 4.1

Таблиця 4.1 – Вплив легуючих елементів на властивості титану та титанових сплавів [5]

Група елементів	Приклади	Вплив на властивості	Обмеження / Недоліки
α-стабілізатори (розчини заміщення)	Al, Ga, In	- Підвищують жароміцність і міцність. - Збільшують температуру поліморфного перетворення.	При вмісті Al > ~9% знижується термічна стабільність.
Елементи впровадження (α-стабілізатори)	O, N	- Значно зміцнюють тверді розчини. - Підвищують температуру поліморфного перетворення.	- Втрачають зміцнювальний ефект при високих Т. - Викликають крихкість, знижують пластичність, технологічність і термічну стабільність.
Нейтральні зміцнювачі	Sn, Zr	- Підвищують міцність без зниження температури поліморфного перетворення. - Поліпшують жароміцність.	У великих концентраціях знижують термічну стабільність (еквівалентність до Al: 1% Al ≈ 3% Sn ≈ 6% Zr).
β-стабілізатори (ізоморфні)	Mo, Nb, W	- Знижують температуру поліморфного перетворення. - У малих концентраціях сприяють зміцненню і жароміцності.	Через високу дифузію у β-Ti застосовуються обмежено.
β-стабілізатори (евтектоїдні)	Fe, Mn, Cr	- Стабілізують β-фазу.	Викликають евтектоїдний розпад β-фази → крихкість

Група елементів	Приклади	Вплив на властивості	Обмеження / Недоліки
			при тривалій експлуатації.
Si (силіциди)	Si (Ti_5Si_3)	- Підвищує жароміцність, міцність, зносостійкість.	Знижує температуру поліморфного перетворення, у великих кількостях зменшує пластичність.
Домішки впровадження	O, N, C, H	- O: сильно зміцнює, але знижує пластичність (понад 0,7% → повна втрата пластичності). - N: ще сильніше зміцнює, але >0,2% → крихке руйнування. - C: утворює TiC, підвищує T поліморфного перетворення, слабший вплив ніж O, N. - H: викликає водневу крихкість, розширює β-область.	- O, N: знижують технологічність, зварюваність, термічну стабільність. - H: найбільш шкідлива домішка.
Домішки заміщення	Fe, Si	- Fe: стабілізує β-фазу, зміцнює, але слабко (1% Fe ≈ +20 МПа). - Si: підвищує жароміцність, зносостійкість.	Fe у великих кількостях викликає крихкість.

Сплави на основі титану

Легування: найчастіше застосовують Al, також Mo, Sn, Zr, Mn, Cr, Fe, Si. Алюміній — основний елемент: дешевий, легкий, підвищує міцність, жаростійкість, модуль пружності, зменшує водневу крихкість. Але надлишок Al знижує пластичність та корозійну стійкість [5].

Типи сплавів:

- α-сплави (Al, Sn, Zr): міцні, жаростійкі, добре зварюються, але немає термозміцнення, схильні до водневої крихкості. Приклад: ВТ5, ВТ5-1 (до 450 °C, також кріогенні умови), ПТ-7М (труби).
- Псевдо-α (Al + невелика β-фаза): групи Ti-Al-Mn (ОТ4, АТ), Ti-Al-V (ОТ4У), комплекснолеговані (ВТ20, ВТ18У). ВТ20 — до 500 °C, добре зварюється; ВТ18У — до 600 °C, але погано зварюється.
- (α+β)-сплави: універсальні, міцні, добре деформуються. Класичний: ВТ6 (Ti-6Al-4V) — найпоширеніший у світі, робочий діапазон – 196…+450 °C. Інші: ВТ14, ВТ16 (кріпильні деталі), ВТ8, ВТ9 (жароміцні), ВТ22 (великі навантажені деталі).
- β- та псевдо-β-сплави: висока пластичність, зміцнюються старінням. ВТ30 (Mo, Zr, Sn), ВТ35 (аналог Ti-15-3), ВТ32 (сильнолегований).
- β-сплави 4201, 42014 — дуже корозійностійкі, зварювані.

Ливарні титанові сплави

Застосовують ВТ1Л, ВТ5Л, ВТ6Л, ВТ9Л, ВТ14Л, ВТ20Л, ВТ35Л. Вони аналогічні деформованим, але з більшим вмістом домішок. Плавка ведеться у вакуумі, усадка ~1%, текучість висока.

ВТ5Л — α-сплав, добре зварюється, працює до 400 °C.

ВТ20Л, ЛТС — α+β, леговані Al, Mo, V, Zr. Модифікація (Y, Sr) підвищує властивості, наближуючи до деформованих сплавів. Ливарні сплави значно підвищують коефіцієнт використання металу при складних деталях.

4.3. Обладнання, приладдя, матеріали

4.3.1. Металографічний мікроскоп.

4.3.3. Матеріали: металографічні зразки титанових сплавів.

4.4. Порядок проведення досліджень

4.4.1. Ознайомитися з теоретичними відомостями щодо фазового складу та структурних особливостей титанових сплавів.

4.4.2. Виконати мікроскопічне дослідження зразків за допомогою оптичного мікроскопа.

4.4.5. Виявити фазові складові та особливості мікроструктури.

4.4.6. Зробити мікрофотографії характерних ділянок зразка.

4.4.7. Порівняти отримані результати з довідковими даними та побудувати висновки про відповідність структури та фазового складу сплаву його властивостям.

4.4.8. Оформити протокол дослідження та зробити загальні висновки.

4.5. Обробка експериментальних даних

4.5.1. Опрацювати результати мікроскопічних досліджень та описати виявлену структуру.

4.5.2. Визначити фазовий склад сплаву за мікроструктурними ознаками.

4.5.3. Занести результати спостережень у таблицю 4.1 (структурні особливості, фази).

4.5.4. Порівняти отримані результати з літературними даними або довідковими характеристиками.

4.5.5. Занести отримані дані до таблиці 4.1.

4.5.6. Зробити висновки щодо впливу структури та фазового складу на експлуатаційні властивості сплаву.

Таблиця 4.1 – Результати дослідження

№ зразка	Марка сплаву	Виявлені фази (α, β, ін.)	Характеристика мікроструктури (розмір складових, рівномірність)	Властивості та призначення сплаву
1				
2	…	…	…	…

4.6. Завдання на самостійну роботу

За матеріалами лекцій та навчальних посібників вивчити питання впливу термічної обробки на структуроутворення та формування механічних та експлуатаційних властивостей титанових сплавів.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Які основні кристалічні модифікації титану існують та які їх особливості?
2. Як впливають легувальні елементи на фазовий склад титанових сплавів?
3. Яким чином мікроструктура титанових сплавів визначає їхні механічні та експлуатаційні властивості
4. У чому полягає методика металографічного дослідження титанових сплавів?
5. Які відмінності між α- та (α+β)-сплавами титану та сфери їх застосування?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОСТРУКТУРИ БРОНЗ І ЛАТУНЕЙ

5.1. Ціль проведення лабораторного заняття

Ознайомитися з мікроструктурою бронз та латуней, вивчити вплив складу сплавів на їхню структуру та властивості, навчитися визначати характерні структурні складові за допомогою металографічного аналізу.

Завдання лабораторного заняття. В результаті проведення лабораторного заняття студенти повинні:

- знати: класифікацію мідних сплавів (бронзи та латуні), їхні основні марки та властивості; характерні мікроструктури бронз (олов'яних, алюмінієвих тощо) та латуней (однофазних, двофазних); зв'язок між мікроструктурою і механічними властивостями досліджуваних сплавів;
- вміти: розпізнавати структурні складові латуней (α-фаза, β-фаза) та бронз (α-твердий розчин, евтектичні структури тощо); робити висновки про властивості сплаву на основі виявленої мікроструктури.

5.2. Основні теоретичні положення

Мідь — пластичний метал із високою електро- й теплопровідністю (поступається лише сріблу) та доброю корозійною стійкістю [5-6]. Має кубічну гранецентровану гратку, плавиться при 1083 °C, густина — 8,9 г/см³. У відпаленому стані м'яка й маломіцна, але після холодної деформації зміцнюється, втрачаючи пластичність. Відпал при 600–700 °C відновлює нормальну пластичність, а перегрів призводить до грубозернистої структури.

Домішки (вісмут, свинець, сірка, кисень) утворюють крихкі евтектики, що розташовуються по межах зерен і погіршують міцність. Особливо небезпечний контакт міді з воднем — виникає *воднева хвороба* (мікротріщини).

Електропровідність сильно знижується під дією домішок (особливо фосфору й кремнію) та пластичної деформації. Тому чиста мідь використовується там, де важлива саме провідність (кабелі, дроти, шини). Якщо потрібні і міцність, і провідність — беруть нагартовану мідь або сплави, наприклад з кадмієм.

Головна сфера застосування — виготовлення сплавів (латуні, бронзи, берилієва, кремнієва тощо) та легування інших металів.

Сплави міді з цинком

Латуні — це сплави міді з цинком (до 45% Zn), які відрізняються підвищеною міцністю, пластичністю, доброю деформуємістю та корозійною стійкістю [6].

Діаграма стану Cu-Zn (рисунок 5.1) являє собою поєднання кількох перитектичних діаграм. У системі утворюються тверді розчини (α- та β-фази) й проміжні з'єднання (β, γ, ε, δ). При охолодженні відбуваються фазові перетворення: β-фаза при 454–468 °C переходить в упорядковану крихку γ-фазу; δ-фаза розпадається з утворенням евтектоїду (γ+ε).

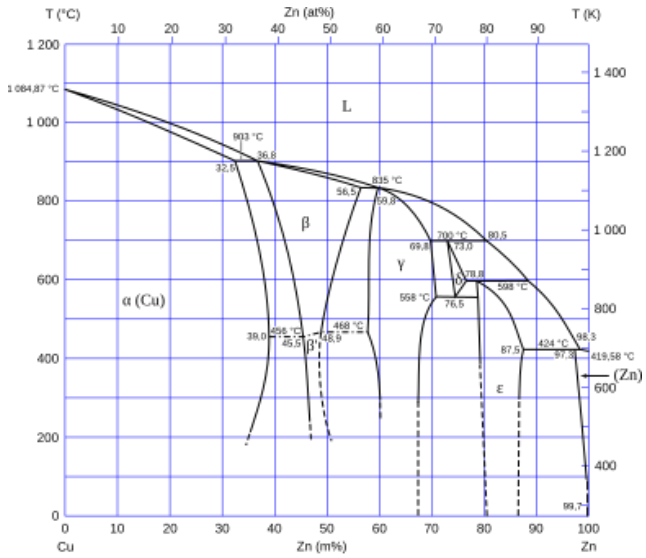
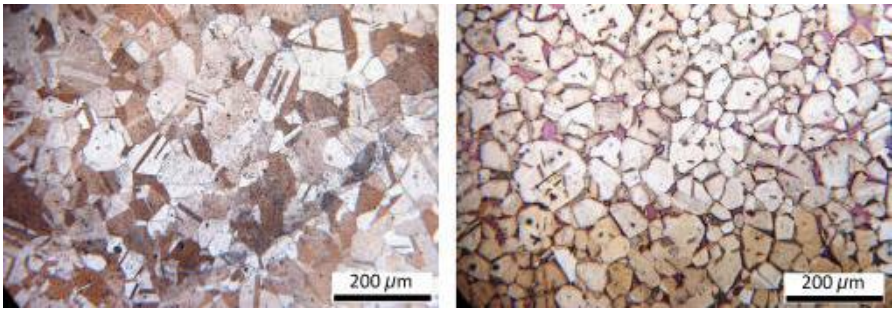


Рисунок 5.1 — Фазова діаграма Cu-Zn

Механічні властивості сплавів змінюються залежно від вмісту цинку. α-латуні зі збільшенням Zn стають міцнішими, а їх пластичність максимальна при 30–32% Zn. Подальше зростання вмісту цинку призводить до появи β'-

фази: міцність зростає, але пластичність падає. Сплави з високим вмістом β', γ- і β'+γ-фаз крихкі й практичного застосування не мають. Найбільше використовуються α-латуні та α+β'-латуні.

Типові мікроструктури наведено на рисунку 5.2: α-латунь у відпаленому стані складається з рівноосних зерен із двійниками (рис. 12.6а), а в α+β'-латуні темні кристали β'-фази розташовані серед α-фази (рис. 12.6б).



а - α-латунь; б - α+β -латунь

Рисунок 5.2 — Мікроструктура латуні

Латуні застосовуються як у литому, так і деформованому стані. Вони мають вузький інтервал кристалізації, гарну рідкотекучість і малу схильність до ліквації. Однофазні α-латуні легко деформуються холодним і гарячим способом, тоді як двофазні α+β — лише гарячим, бо пластичність β-фази вища при температурах понад 500 °C. Хімічний склад і механічні властивості деформованих латуней наведено в таблиці 5.1.

Таблиця 12.1 — Хімічний склад і механічні властивості латуней, що деформуються

Марка	Cu (%)	Pb (%)	Zn (%)	σB, МПа	δ, %
ЛТ 96	95–97	–	решта	240	50
ЛТ 90	88–91	–	решта	270	35
Л 80	79–81	–	решта	300	35
Л 68	67–70	–	решта	300	40
Л 62	60,5–63,5	–	решта	300	40
ЛС 59-1	57–60	0,8–1,9	решта	350	15

В інтервалі температур 300–700 °C α-латуні схильні до «червоноламкості» через Bi і Pb, які утворюють легкоплавкі евтектики на межах зерен. У сплавах із вмістом Zn понад 32% частина включень переміщується всередину зерен, і шкідлива дія свинцю зменшується; у

латунях із 38–40% Zn навіть вводять 1–2% Pb для поліпшення оброблюваності.

Латуні термообробкою не зміцнюються [5-6], але їх структура й властивості можуть змінюватися після деформації та відпалу. Відпалені сплави корозійностійкі, проте при наявності напружень і вологи (особливо з аміаком) можливе сезонне розтріскування. Після відпалу при 260–300 °С ця схильність зникає.

Для підвищення властивостей у латуні вводять спеціальні добавки: Al, Mn, Ni (зміцнюють), P і Si (підвищують корозійну стійкість), Pb (покращує оброблюваність різанням). Такі сплави належать до спеціальних латуней.

Бронзи

Олов'янисті бронзи відрізняються від латуней більшою твердістю, міцністю й корозійною стійкістю [6].

Діаграма стану Cu-Sn (рисунок 5.3) подібна до діаграми Cu-Zn і складається з кількох перитектичних діаграм. У системі утворюються тверді розчини (α- і η-фази) та проміжні з'єднання (β, γ, ε, δ), більшість яких крихкі. Практичне застосування мають сплави з вмістом олова до 10–15%.

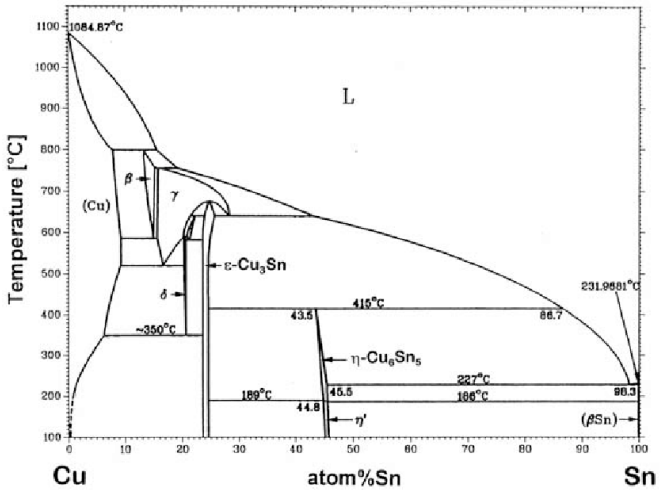
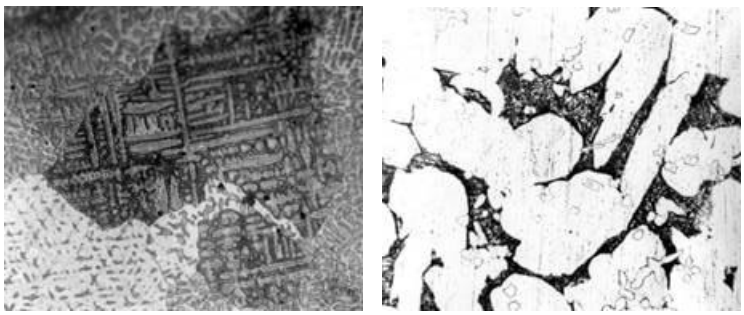


Рисунок 5.3 — Діаграма стану Cu-Sn

Через значний інтервал між ліквідусом і солідусом олов'янисті бронзи схильні до ліквації. Литі сплави з ≤6% Sn мають дендритну структуру з неоднорідним α-розчином (рисунок 12.8), а при 6–10% Sn у міждендритних ділянках з'являється евтектоїд (α+δ) — бронзит (рисунок 12.9). δ-фаза

надзвичайно тверда й крихка, погіршує пластичність, тому такі бронзи майже не піддаються обробці тиском і застосовуються переважно у литому стані.



а б

Рисукнок 5.4- Однофазна (а) та двофазна (б)бронзи

Ливарні властивості. Для бронз характерна мала усадка (<1%), але низька рідкотекучість і схильність до розосередженої усадки. Для поліпшення щільності вводять Zn і Pb, які зменшують інтервал кристалізації. Після відпалу сплави з ≤14% Sn переходять у рівномірний α-твердий розчин.

Механічні властивості (рисунок 12.10) змінюються зі збільшенням олова: зростають міцність і пластичність, але поява δ-фази різко знижує пластичність. При великій кількості δ-фази сплав стає крихким і втрачає міцність. Олов’янисті бронзи мають високі антифрикційні властивості, особливо при >10% Sn, що робить їх цінними підшипниковими матеріалами. Вони також корозійностійкі, тому застосовуються для деталей парових і водяних систем.

Основний недолік — висока вартість. Часткове заміщення олова цинком (5–10%) здешевлює сплави без значних змін структури. Повноцінними замінниками є алюмінієві, кремнієві та інші безолов’янисті бронзи, які мають вищі міцнісні характеристики й кращу рідкотекучість, але поступаються у корозійній стійкості.

Хімічний склад і властивості олов’янистих та безолов’янистих бронз наведені у таблиці 5.2.

Часто олов’янисті підшипникові бронзи замінюють свинцевистими (~30% Pb), де свинець рівномірно розподіляється у вигляді зерен у мідній основі, забезпечуючи високі антифрикційні властивості.

Таблиця 5.2 — Хімічний вміст і механічні властивості бронз

Марка	Sn %	Zn %	Pb %	Інші	σB, МПа	δ, %
БрО 10	9–11	–	–	–	200–250	10
БрОЦ 10-2	9–11	2–4	–	–	200–250	10
БрОЦ 8-4	7–9	4–6	–	–	200–250	6–10
БрОЦС 6-6-3	5–7	5–7	2–4	–	150–200	8–12
БрОЦС 4-4-2,5	3–5	3–5	1,5–3,5	–	200	10
БрОФ 10-1	9–11	–	–	P 0,8–0,2	250–350	3–10
БрОФ 7-0,2	6–8	–	–	P 0,2	250–350	15–20
БрОС 8-12	7–9	–	11–13	–	150–200	3–8
БрА 5	–	–	–	Al 4–6	600	3–4
БрА 7	–	–	–	Al 6–8	600	10
БрА 10	–	–	–	Al 9–10	520	13
БрАЖ 9-4	–	–	–	Al 8–10 Fe 2–4	400	10
БрКМ 3-1	–	–	–	Mn 1,5 Si 2,7–3,5	380	45
БрС-30	–	–	27–33	–	60	4
Бр 2	–	–	–	Be 2–2,3	до 1500	2–3

Алюмінієві бронзи відрізняються високою міцністю та корозійною стійкістю, добре піддаються деформації, але поступаються олов'янистим бронзам за антифрикційними властивостями [5]. Промислово застосовують сплави з вмістом Al до 10%.

Діаграма стану Cu-Al представлена на рисунку 5.5.

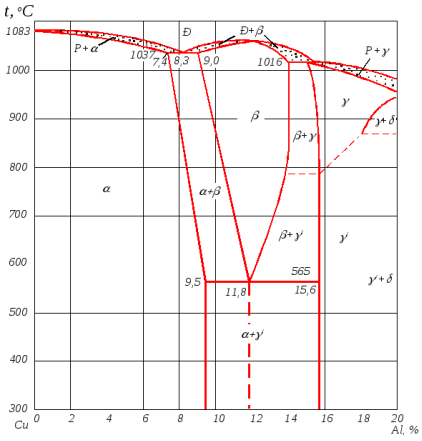


Рисунок 5.5 — Діаграма стану Cu-Al

Однофазні α-бронзи (до 9,8% Al) мають високу пластичність і гарні ливарні властивості. При більшому вмісті Al утворюються β- і γ-фази, які

зміцнюють сплав, але знижують пластичність. Швидке охолодження викликає мартенситне перетворення, що підвищує міцність.

Механічні властивості алюмінієвих бронз зростають зі збільшенням Al, проте пластичність зменшується. Додавання Fe і Mn подрібнює структуру та покращує антифрикційні властивості, а Ni значно підвищує міцність.

Хімічний склад і властивості алюмінієвих бронз подані в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 — Хімічний склад і механічні властивості алюмінієвих бронз

Марка	Al	Fe	Cu	Ni	σB, МПа	δ, %
БрА 5	4,0–6,0	–	ост.	–	600	3–4
БрА 7	6,0–8,0	–	ост.	–	600	10
БрА 10	9,0–11,0	–	ост.	–	520	13
БрАЖ 9-4	8,0–10,0	2,0–4,0	ост.	–	400	10
БрАЖН 10-4-4	9,5–11,0	3,5–5,5	ост.	3,5–5,5	600–650	5

Алюмінієві бронзи широко застосовують у машинобудуванні, часто як замінники дорогих олов'янистих бронз [6].

Берилієві бронзи (до 2–3% Be) відзначаються високою твердістю, міцністю, теплопровідністю, корозійною стійкістю й антифрикційними властивостями [6]. Вони немагнітні, не іскрять при ударі та добре обробляються тиском. Мідь із берилієм утворює тверді розчини з обмеженою розчинністю (рисунок 5.6). При охолодженні з них виділяється тверда β-фаза, що різко зміцнює сплав.

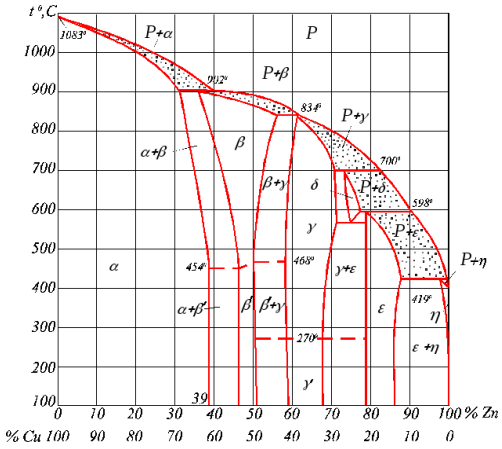


Рисунок 5.6 — Діаграма стану Cu-Be

Механічні властивості сильно змінюються після деформації та відпалу. Термічна обробка (гарт + старіння) забезпечує особливо високу міцність: до 1500 МПа і твердість 300–400 НВ для Cu–2% Be, а в нікелевих бронзах із Be — до 1800 МПа і 700 НВ.

Берилієві бронзи застосовують у приладобудуванні (пружини, мембрани, контакти, інструменти, що не іскрять) і для підшипників, які працюють при високих навантаженнях і температурах.

5.3. Обладнання, приладдя, матеріали

5.3.1. Обладнання: металографічний мікроскоп.

5.3.2. Фазові діаграми мідних сплавів (каталог).

53.3. Матеріали: металографічні зразки мідних сплавів.

5.4. Порядок проведення досліджень

5.4.1. Розшифрувати марку досліджуваного сплаву (визначити його склад за позначенням).

5.4.2. Позначити досліджуваний сплав на відповідній фазовій діаграмі (Cu–Zn для латуней, Cu–Sn або інші системи для бронз).

5.4.3. За допомогою металографічного мікроскопа розглянути зразки. Зафіксувати мікроструктуру (фотографії або замальовки).

5.4.4. Визначити характерні структурні складові (α-фаза, β-фаза, евтектичні структури тощо).

5.4.5. Оцінити фазовий склад сплаву та співвіднести його з положенням на фазовій діаграмі.

5.5. Обробка експериментальних даних

5.5.1. Порівняти результати спостережень із теоретичними відомостями (діаграми стану Cu–Zn, Cu–Sn тощо).

5.5.2. Проаналізувати, які властивості (пластичність, твердість, корозійна стійкість) пояснюються наявністю певних фаз.

5.5.3. Дані внести в таблицю 5.1.

Таблиця 5.1 – Результати дослідження мікроструктури бронз і латуней

Марка сплаву	**Хімічний склад (%)**	**Фазовий склад**	**Мікроструктура (опис/замальовка)**	**Властивості (коротко)**

5.5.4. Зробити узагальнюючі висновки про залежність властивостей мідних сплавів від хімічного складу та параметрів структури.

5.6. Завдання на самостійну роботу

За матеріалами лекцій та навчальних посібників ознайомитися з фазовими діаграмами Cu–Zn (латуні), Cu–Sn (олов’яні бронзи), Cu–Al (алюмінієві бронзи) або Cu–Si (крем’янисті бронзи).

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Назвіть основні властивості чистої міді.
2. Поясніть, як впливає вміст цинку на механічні властивості мідноцинкових сплавів.
3. Порівняйте властивості олов'яних бронз та латуней.
4. Поясніть, які тверді розчини та проміжні з'єднання утворюються у системах Cu–Zn і Cu–Sn.
5. Поясніть, як зв’язок між мікроструктурою та фазовим складом визначає механічні властивості бронз і латуней.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6

СТРУКТУРА, ФАЗОВИЙ СКЛАД ТА ВЛАСТИВОСТІ БАБІТІВ

6.1. Ціль проведення лабораторного заняття

Ознайомитися з будовою, фазовим складом та основними властивостями бабітів.

Завдання лабораторного заняття. В результаті проведення лабораторного заняття студенти повинні:

- знати: склад і структуру бабітів, основні фази та їхній вплив на властивості, області застосування бабітів;
- вміти: визначати фазовий склад за хімічним складом та мікроструктурою, оцінювати властивості бабітів.

6.2. Основні теоретичні положення

Олово та свинець — легкоплавкі, м’які й пластичні метали, що зміцнюються лише холодною деформацією, проте швидко рекристалізуються. Температура плавлення олова становить 232 °C, свинцю — 327 °C; їх густина відповідно 7,3 г/см³ та 11,3 г/см³ [5].

Олово існує у двох модифікаціях:

- β-Sn (біле олово) — тетрагональна гратка, стабільна вище 18 °C;
- α-Sn (сіре олово) — кубічна гратка, стійка нижче 18 °C.

Перетворення β-Sn → α-Sn супроводжується збільшенням об’єму на понад 25 %, що призводить до руйнування металу на порошок — явище «олов’яна чума». Додавання Pb, Sb, Bi (≥0,5 %) істотно гальмує цей процес. Свинець алотропічних перетворень не має.

Обидва метали характеризуються високою хімічною стійкістю: олово інертне до води й розбавлених кислот, свинець стійкий у сухому повітрі та до H_2SO_4 і HCl, але чутливий до міжкристалічної корозії.

При взаємодії з Bi, Cd, Hg утворюються легкоплавкі сплави. Температура плавлення подвійних та потрійних евтектик у системах Sn-Pb,

Pb-Bi, Pb-Cd, Sn-Bi сягає 92–125 °C, а четверних Pb-Bi-Sn-Cd — близько 70 °C.

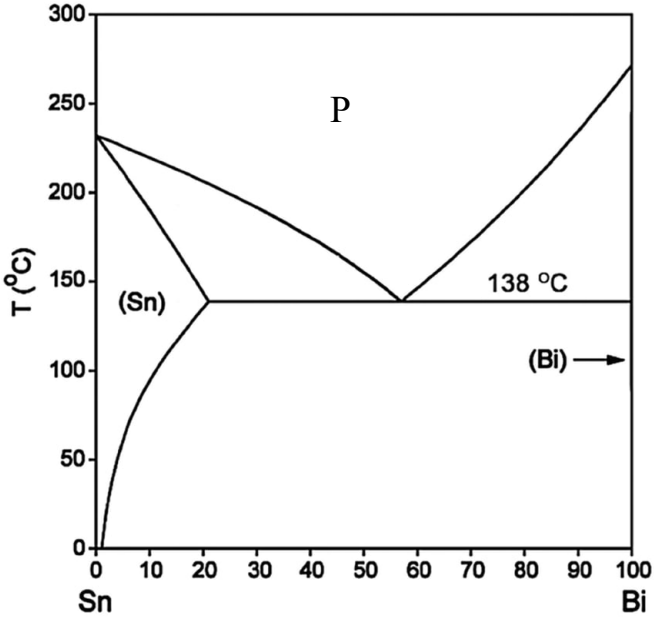


Рисунок 6.1 — Діаграма стану Sn-Bi

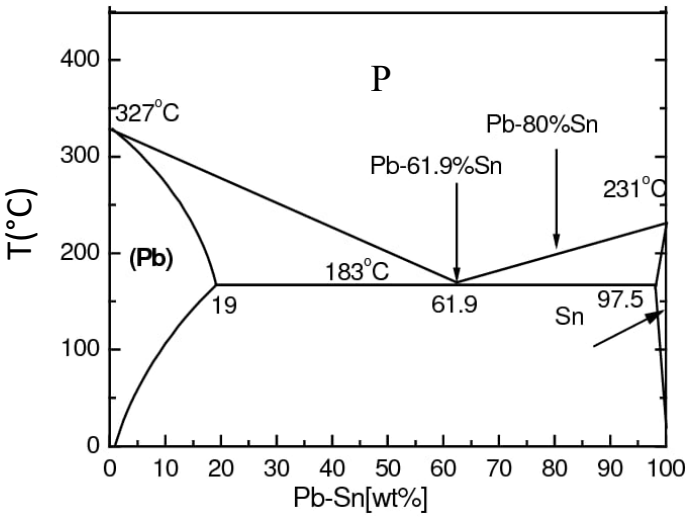


Рисунок 6.2 — Діаграма стану Sn-Pb

Такі сплави використовуються як запобіжники в електротехніці та піротехніці, а також у підшипникових і типографських матеріалах.

Для підшипників ковзання необхідні матеріали з низьким коефіцієнтом тертя, доброю теплопровідністю, зносостійкістю та здатністю прироблюватися до вала. Ці вимоги задовольняють дво- і трифазні сплави, де м’яка основа містить тверді включення, що утримують мастило [5].

Найбільш поширені — бабіти, які поділяються на:

1. олов’яні (Б83, Б88),

2. олов’яно-свинцеві (Б16, БС6),

3. свинцеві (БКА, БК2).

Олов’яні бабіти. Високоякісні сплави (Б83, Б88) застосовують у турбінах, дизелях, компресорах. Їх структура складається з м’якої α-фази (Sn) з твердими включеннями β′(SnSb) та Cu_3Sn, які забезпечують міцність і рівномірність.

Олов’яно-свинцеві та свинцеві бабіти. В олов’яно-свинцевих бабітах (наприклад, БС6) основою є евтектика з твердим розчином Pb і β-фазою, а також інтерметалідами Cu_3Sn, Cu_2Sb. Вони дешевші за олов’яні й застосовуються в електровозах, гідротурбінах, дизелях.

Свинцеві бабіти (з Ca, Na) найдешевші, призначені для транспорту та важких машин.

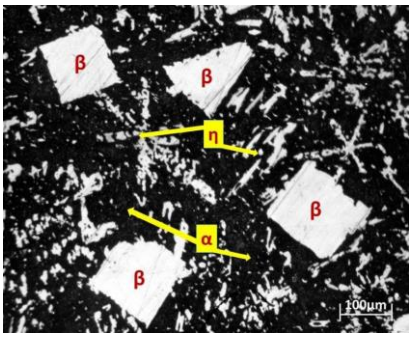


Рисунок 6.3 — Мікроструктура оловянисото бабіту

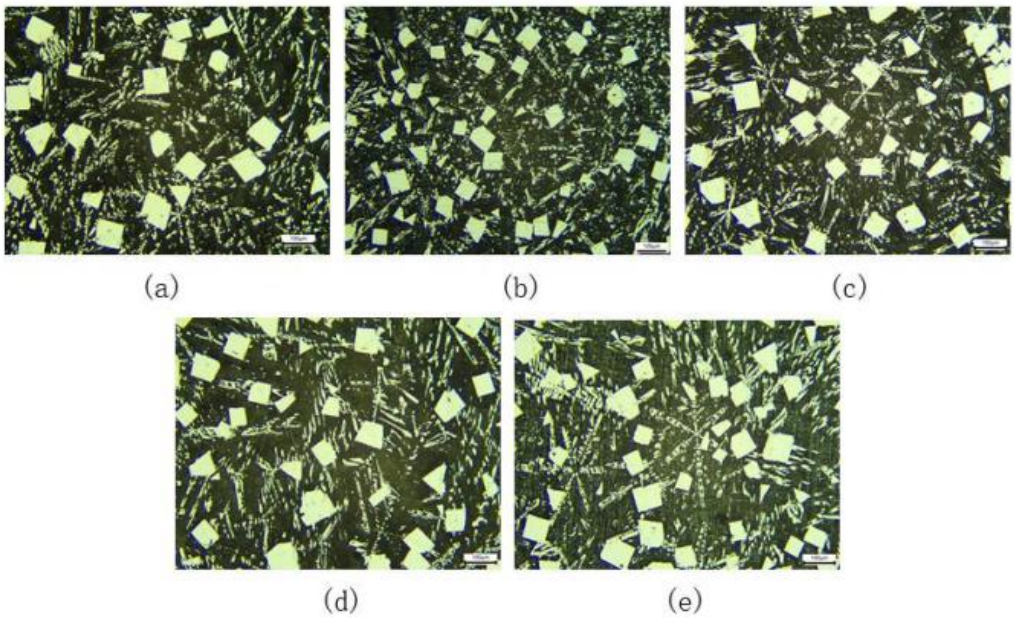


Рисунок 6.4 — Мікроструктура олов’яно-свинцевих бабітів в залежності від вмісту свинцю

6.3. Обладнання, приладдя, матеріали

6.3.1. Обладнання: металографічний мікроскоп.

6.3.2. Фазові діаграми систем Sn–Pb та Sn–Bi (каталог), довідкові таблиці та опис марок бабітів

6.3.3. Матеріали: металографічні зразки бабітів (олов'яних, олов'яно-свинцевих, свинцевих).

6.4. Порядок проведення досліджень

6.4.1. Ознайомитися з діаграмами стану систем Sn–Pb та Sn–Bi.

6.4.2. Позначити досліджуваний сплав на відповідній фазовій діаграмі.

6.4.3. За допомогою металографічного мікроскопа розглянути зразки. Зафіксувати мікроструктуру (фотографії або замальовки).

6.4.4. Визначити фазовий склад і характерні структурні складові.

6.4.5. Зробити висновки про властивості та можливе застосування досліджуваних сплавів.

6.5. Обробка експериментальних даних

6.5.1. За результатами мікроскопічних досліджень описати виявлену мікроструктуру зразків бабітів.

6.5.2. Визначити фазовий склад за характерними ознаками (м'яка основа, тверді включення).

6.5.3. Дані внести в таблицю 6.1.

Таблиця 6.1 – Результати дослідження мікроструктури бабітів

Марка бабіту	**Хімічний склад (%)**	**Структурні складові**	**Мікроструктура (опис/замальовка)**	**Можливе застосування**

6.5.4. Сформулювати висновки щодо властивостей і придатності сплавів для підшипників.

6.6. Завдання на самостійну роботу

За матеріалами лекцій та навчальних посібників ознайомитися з фазовими діаграмами Sn–Pb та Sn–Bi.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Назвіть дві модифікації олова.

2. Поясніть, що називають "олов'янистою чумою".

3. Назвіть легуючі елементи, з якими олово та свинець утворюють легкоплавкі сплави.

4. Перелічте основні вимоги, які пред'являються до бабітів.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 7

СТРУКТУРА, ФАЗОВИЙ СКЛАД ТА ВЛАСТИВОСТІ СПЛАВІВ НА ОСНОВІ ЦИРКОНІЮ

7.1. Ціль проведення лабораторного заняття

Ознайомитися з будовою, фазовим складом і властивостями сплавів на основі цирконію, а також навчитися користуватися діаграмами стану та атласами мікроструктур для їх аналізу.

Завдання лабораторного заняття. В результаті проведення лабораторного заняття студенти повинні:

- знати: основні діаграми стану сплавів цирконію, фазовий склад та особливості мікроструктури, вплив легувальних елементів на властивості цирконієвих сплавів, сфери застосування цих матеріалів;
- вміти: користуватися атласами мікроструктур і діаграмами стану та визначати фазовий склад, робити висновки про властивості й придатність сплавів для практичного використання..

7.2. Основні теоретичні положення

Цирконій (Zr) належить до перехідних елементів із незаповненою внутрішньою *d*-оболонкою. Він алотропний і існує у двох модифікаціях: до 862 °C — α-форма з гексагональною щільно упакованою (ГЩУ) граткою (координаційне число 6,6), вище цієї температури й до плавлення (1852 °C) — β-форма з об’ємно-центрованою кубічною (ОЦК) граткою (координаційне число 8). Плавлення цирконію відбувається при 1845–1860 °C, кипіння — при 3577 °C. Його щільність становить 6,51 г/см³ (при 20 °C). Механічні властивості залежать від способу отримання та чистоти: відпалений цирконій м’якший і пластичніший, тоді як деформований має вищу міцність і твердість [5].

Цирконій активно реагує з киснем, азотом і воднем. Домішки цих елементів зміцнюють метал, проте знижують його пластичність і корозійну

стійкість. Оксид ZrO_2 утворює захисну плівку до 450–500 °C, однак при вищих температурах вона руйнується, що зумовлює низьку жаростійкість. Метал корозійностійкий у лугах, більшості кислот, морській та прісній воді, але втрачає стійкість при високих температурах і тисках. У земній корі цирконію в середньому 0,025%. Основна сировина — мінерал циркон ($ZrSiO_4$), що містить 64–67% ZrO_2; більш цінним є баделіт (до 90% ZrO_2).

Застосування [5].

Ядерна енергетика. Цирконій та його сплави (циркалой-1, -2, -3) використовуються для виготовлення труб і деталей реакторів завдяки поєднанню корозійної стійкості та низького перетину поглинання нейтронів.

Чорна металургія. Цирконієві сплави застосовують як розкислювачі й модифікатори при виробництві високоякісних сталей та чавунів.

Кольорова металургія. Додавання цирконію покращує структуру та корозійну стійкість магнієвих і алюмінієвих сплавів.

Вогнетриви, кераміка, електроніка, медицина. На основі ZrO_2 виготовляють кераміку, емалі, вогнетриви; металевий цирконій застосовують у електроніці та хірургії.

Основні промислові сплави.

Fe–Zr — для металургії (розкислення, регуляція зерна).

Mg–Zr — для зміцнення магнію та створення високоміцних сплавів.

Zr–Si та Mn–Si–Zr — у чорній металургії (обробка чавуну).

Zr–Nb та Zr–Sn–Nb — в атомній енергетиці (твели, канальні труби).

7.3. Обладнання, приладдя, матеріали

7.3.1. Фазові діаграми цирконієвих (каталог).

7.3.2. Довідкові та навчально-методичні видання, що містять систематизовану інформацію про цирконій та його сплави, властивості й сфери застосування.

7.4. Порядок проведення досліджень

7.4.1. Ознайомитися з довідковими та навчально-методичними матеріалами: аналіз фізичних, хімічних і механічних властивостей цирконію та його сплавів.

7.4.2. Вивчення фазових діаграм цирконію та цирконієвих сплавів: визначення алотропних перетворень, критичних температур та фазових рівноваг.

7.4.3. За допомогою фазових діаграм Fe–Zr, Mg–Zr, Zr–Si, Zr–Nb визначити фазовий склад заданих сплавів.

7.4.4. За допомогою довідкової літератури визначити властивості зослідних сплавів та зробити висновки про області їх викоритсання.

7.5. Обробка експериментальних даних

Після опрацювання довідкових джерел і фазових діаграм необхідно:

7.5.1. Систематизувати отримані дані щодо фазового складу сплавів.

7.5.2. Зіставити фазовий склад із фізичними та механічними властивостями.

7.5.3. Визначити найбільш доцільні сфери використання для кожного сплаву.

7.5.4. Узагальнити результати у вигляді таблиці 7.1

Таблиця 7.1 – Фазовий склад, властивості та використання сплавів цирконію

Сплав	Фазовий склад	Основні властивості	Використання
Fe–Zr			
Mg–Zr			
Zr–Si			
Zr–Nb			

7.6. Завдання на самостійну роботу

За матеріалами лекцій та навчальних посібників ознайомитися з легуванням, властивостями та областями застосування цирконієвих сплавів.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Опишіть методи одержання цирконію.
2. Наведіть приклади домішок, які знижують корозійну стійкість цирконію.
3. Поясніть, як можна усунути шкідливий вплив домішок на корозійну стійкість.
4. Наведіть приклади застосування цирконієвих сплавів.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 8

ДОСЛІДЖЕННЯ ФАЗОВИХ ДІАГРАМ СПЛАВІВ НА ОСНОВІ СРІБЛА ТА ЗОЛОТА

8.1. Ціль проведення лабораторного заняття

Вивчення фазових діаграм сплавів на основі Ag та Au, дослідження фазових рівноваг, фазового складу та його впливу на властивості.

Завдання лабораторного заняття. В результаті проведення лабораторного заняття студенти повинні:

- знати: основні положення фазових діаграм, види фазових рівноваг та перетворень, вплив складу на властивості сплавів, основні напрями застосування золото-срібних сплавів у техніці та ювелірній справі.
- вміти: користуватись фазовими діаграмами для визначення фазового складу, аналізувати структуру та властивості сплавів на основі золота і срібла й робити висновки щодо їх практичного застосування.

8.2. Основні теоретичні положення

Срібло належить до рідкісних елементів: його вміст у земній корі становить лише близько 7×10^{-6}%, у морській воді — 3×10^{-8}% [7]. У природі зустрічається у вигляді самородків, але основна його частка зосереджена у понад 50 мінералах (аргеніт Ag_2S, хлораргірит та ін.), а промислове отримання здійснюють переважно з поліметалічних руд свинцю, міді й цинку. Самородне срібло — це природний сплав із золотом, міддю та іншими металами, що містить до 98,5% Ag.

Срібло має гранецентровано-кубічну кристалічну ґратку та складається з двох стабільних ізотопів (^{107}Ag і ^{109}Ag). Його температура плавлення при нормальному тиску становить близько 960 °C, густина — 10,1–11,1 г/см³.

Метал характеризується найвищою електро- та теплопровідністю серед усіх металів, значною пластичністю і здатністю до деформаційного зміцнення.

Механічні властивості визначаються чистотою та розміром зерна. Відпалене срібло має межу міцності 140–180 МПа, литі зразки — близько 106 МПа. При холодній деформації спостерігається інтенсивне зміцнення, яке знижується із ростом легування. Зернистість впливає на межу текучості та пластичність: дрібнозернисте срібло міцніше й пластичніше.

Срібло стійке до корозії в більшості середовищ, але розчиняється у концентрованих кислотах та «царській воді». У промисловості його використовують для виготовлення хімічного обладнання, електричних контактів, припоїв та ювелірних виробів. Завдяки широкій розчинності з багатьма елементами срібло утворює численні сплави, зокрема з міддю («тверде срібло» Ag–3%Cu), що мають підвищену твердість і застосовуються в техніці та ювелірній справі.

Для підвищення міцності срібла застосовують методи холодної деформації, легування, утворення твердих розчинів і фазових перетворень [7]. При цьому зберігаються його унікальні фізичні властивості — висока електро- і теплопровідність, відбивна здатність і корозійна стійкість, які зумовлюють широке використання цього металу.

Золото є рідкісним елементом: його вміст у земній корі становить від 1 до $6 \cdot 10^{-7}$ %, що у 20 разів менше, ніж срібла, і у 200 – ніж ртуті. У світовому океані та водах міститься близько 10^{10} тонн золота. У природі воно трапляється переважно у самородковій формі, часто з домішками срібла, заліза, свинцю, рідше – вісмуту, ртуті, платини тощо. До золотовмісних мінералів належать самородне золото, електрум, калаверит та інші.

Золото (Z=79, Ar=197) має ГЦК-гратку, щільність 19,3 г/см³, температуру плавлення 1064 °C. Висока теплопровідність і корозійна стійкість зумовлюють його інертність до більшості речовин, за винятком «царської води» та деяких концентрованих кислот. Природне золото моноізотопне (^{197}Au), відоме понад 20 штучних радіоактивних ізотопів [7].

Чисте золото характеризується малою міцністю (~130 МПа), високою пластичністю (δ≈50%) і низькою температурою рекристалізації, що робить його легкооброблюваним. Легуючі добавки підвищують міцність і впливають на температуру рекристалізації.

Сплави та легування.

Нікель, паладій – надають білий колір, підвищують твердість і міцність; Pd-сплави благородніші та пластичніші за Ni-сплави.

Кобальт, індій, цинк, кадмій – зміцнюють золото, застосовуються у припоях; цинк і кадмій змінюють колір сплавів.

Алюміній, олово, свинець – погіршують якість поверхні, спричиняють крихкість. Залізо, кремній, миш'як, вісмут – утворюють крихкі сполуки, що знижують пластичність.

Золото практично інертне, однак руйнується у «царській воді», концентрованій селеновій кислоті та розплавах деяких металів.

Золото здавна використовують у ювелірній справі, монетарному обігу та позолоті архітектурних споруд. Технічне застосування активно розвивається останні десятиліття завдяки унікальним фізико-хімічним властивостям металу: високій електропровідності, корозійній стійкості та пластичності.

Основні напрями використання [7]:

Електроніка й мікроелектроніка – провідники, мікродріт, пасти на основі золота, покриття та з'єднання інтегральних схем.

Контактні матеріали – сплави Au-Re, Au-Pd, Au-Pt забезпечують довговічність і надійність у слаботокових апаратах.

Припої – Au-Cu, Au-Ni та інші сплави використовують у радіоелектроніці, авіаційній та космічній техніці завдяки жаростійкості й хімічній інертності.

Провідникові матеріали – тонкі плівки та мікродріт для мікросхем і напівпровідників.

Термопари – сплави Au-Pd застосовують у вимірювальній техніці при високих температурах.

Ювелірні сплави – системи Au-Ag-Cu з домішками Zn, Ni, Co, Pd, що визначають колір і механічні властивості виробів. Використовуються метрична, каратна та золотникова системи проб.

У сучасній стоматології для виготовлення коронок та зубних протезів застосовують велику кількість сплавів кольорового та білого золота, що містять 55–90% Au. До їх складу входять легуючі елементи — срібло, мідь, нікель, платина, паладій, цинк, співвідношення яких визначає колір,

механічні властивості та здатність до зміцнення при старінні. Термообробка дозволяє досягати оптимальної твердості та міцності.

За технологією виготовлення стоматологічні сплави поділяють на ливарні, деформовані та припої. Найбільш поширені саме ливарні, оскільки сучасна техніка лиття забезпечує високу точність і якість виробів. Умовно виділяють чотири типи таких сплавів:

I тип — м'які, пластичні, легко деформуються, застосовуються при невеликих навантаженнях;

II тип — твердіші, придатні для середніх напружень;

III тип — характеризуються схильністю до дисперсійного твердіння під час охолодження, що підвищує їхню міцність;

IV тип — найбільш тверді, зміцнюються термообробкою, використовуються для великих відливок.

Окрім сплавів жовтого золота, у стоматології застосовують білозолоті сплави (тверді й особливо тверді). Їх відмінною властивістю є висока корозійна стійкість. Проте головною проблемою стоматологічних матеріалів залишається сегрегація компонентів, що може призводити до корозії.

Деформовані сплави мають вищу міцність і пластичність порівняно з ливарними, однак використовуються рідше. У сучасних варіантах вони містять більше міді, паладію та нікелю і менше золота й платини.

Окремо виділяють сплави для впалювання в кераміку. Вони повинні мати фізико-механічні характеристики, близькі до властивостей кераміки, та коефіцієнт теплового розширення трохи вищий за керамічний. Це забезпечує міцне і надійне зчеплення.

Важливим є також використання припоїв, необхідних для з'єднання окремих деталей складних конструкцій. Вони містять золото, срібло, мідь, а також невеликі кількості олова і цинку, що знижують температуру плавлення. Для білого золота замість міді додають нікель. Вибір припою визначається його кольором, температурою плавлення та міцністю, яка повинна відповідати властивостям основного сплаву.

Таким чином, стоматологічні сплави на основі золота відзначаються різноманітністю складів і властивостей, що дозволяє підбирати оптимальні матеріали для конкретних умов застосування — від м'яких протезів до масивних відливок чи керамічних конструкцій.

Фазові діаграми двокомпонентних сплавів на основі золота та срібла представлені на рисунку 8.1

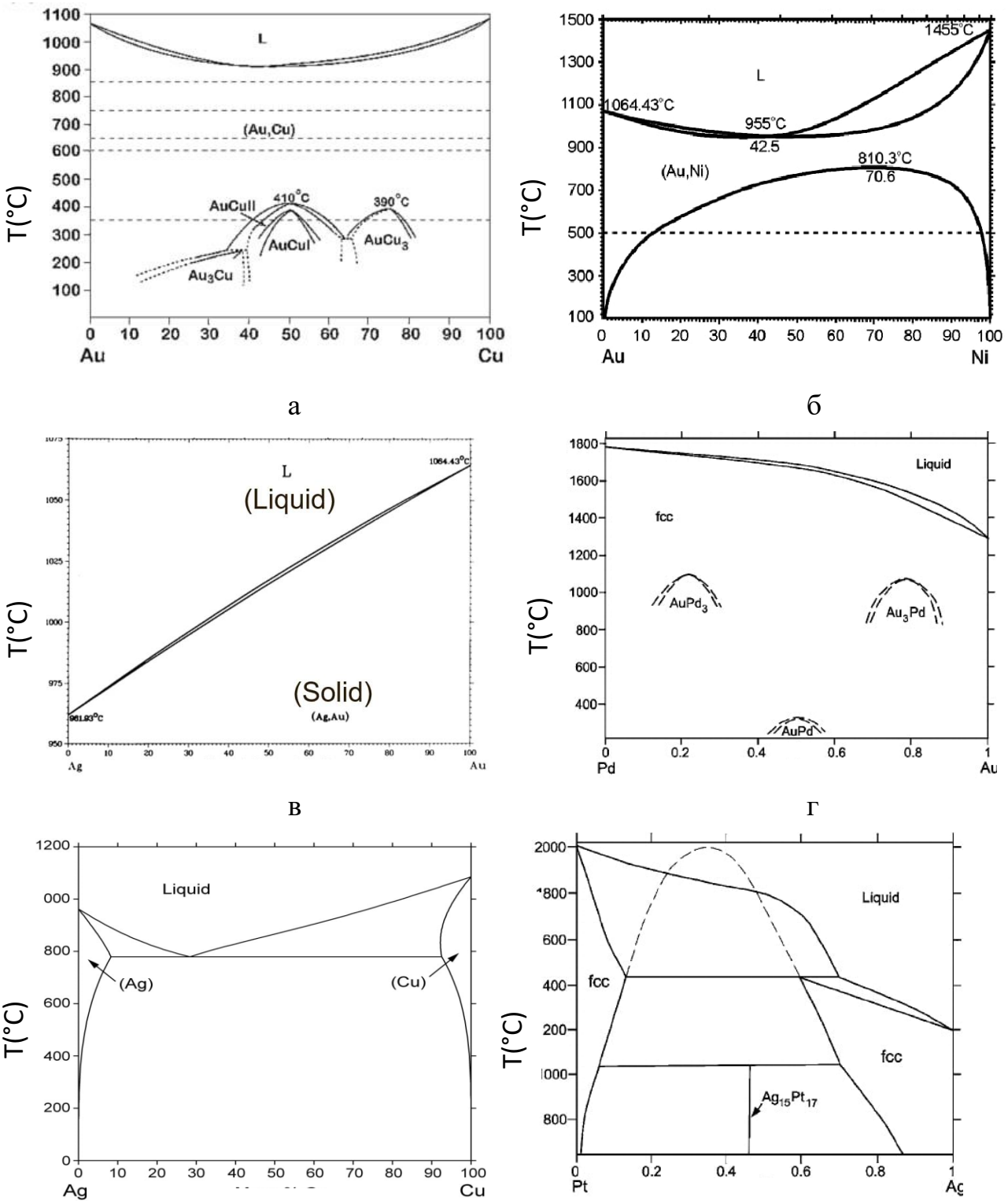


Рисунок 8.1 – Фазові діаграми двокомпонентних сплавів на основі золота та срібла

8.3. Обладнання, приладдя, матеріали

8.3.1. Фазові діаграми сплавів на основі срібла та золота (каталог).

7.3.2. Довідкові та навчально-методичні видання, що містять систематизовану інформацію про срібло, золото та їхні, властивості й сфери застосування.

8.4. Порядок проведення досліджень

8.4.1. Ознайомитися з довідковими та навчально-методичними матеріалами: аналіз фізичних, хімічних і механічних властивостей золота, срібла та їхніх сплавів.

8.4.2. Вивчити фазові діаграми систем Au–Ag, Au–Cu, Ag–Cu та пов’язаних потрійних сплавів. Визначити області твердих розчинів, евтектичні та перитектичні перетворення, критичні температури.

8.4.3. На основі фазових діаграм визначити фазовий склад заданих золотих і срібних сплавів (ювелірних, стоматологічних, технічних).

8.4.4. Використовуючи довідкову літературу, проаналізувати властивості досліджуваних сплавів (твердість, міцність, пластичність, корозійна стійкість, колір) та зробити висновки щодо сфер їх застосування (ювелірна справа, електроніка, стоматологія, техніка).

8.5. Обробка експериментальних даних

8.5.1. Систематизувати отримані дані щодо фазового складу заданих золотих та срібних сплавів.

8.5.2. Зіставити фазовий склад із фізичними, хімічними та механічними властивостями.

8.5.3. Визначити найбільш доцільні сфери використання для кожної групи сплавів (наприклад: ювелірні сплави Au–Ag–Cu; стоматологічні Au–Ag–Cu–Pd–Pt; провідникові матеріали Au–Ga, Au–In; припої Au–Cu, Au–Ni).

8.5.4. Узагальнити результати у вигляді таблиці 8.1 (марка сплаву - склад – фазовий склад – властивості – застосування).

Таблиця 8.1 – Склад, властивості та застосування золотих і срібних сплавів

Група сплавів	Основний склад	Фазовий стан	Основні властивості	Типові марки	Галузі застосування

5.6. Завдання на самостійну роботу

За матеріалами лекцій та навчальних посібників ознайомитися з фазовими діаграмами Au-Cu, Au-Ag, Au-Pd, Ag-Cu, Ag-Pt.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Опишіть використання золота в науці і техніці (загальні відомості).
2. Охарактеризуйте ядерні і корозійні властивості Au.
3. Охарактеризуйте механічні властивості Au, вплив температури і легуючих елементів на механічні властивості Au.
4. Опишіть використання Au і його сплавів в електроніці.
5. Охарактеризуйте матеріали на основі Au для електричних контактів.
6. Охарактеризуйте матеріали на основі Au для припоїв.
7. Охарактеризуйте провідникові матеріали на основі Au.
8. Охарактеризуйте структуру і корозійну стійкість срібла.
9. Охарактеризуйте області використання срібла (загальні відомості).
10. Охарактеризуйте ювелірні і стоматологічні сплави на основі Au.
11. Охарактеризуйте матеріали на основі Au для припоїв.

Охарактеризуйте ювелірні і стоматологічні сплави на основі Au

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 9

ВИВЧЕННЯ СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ СПЕЧЕНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ МІДІ

9.1. Ціль проведення лабораторного заняття

Метою даної роботи є дослідження структури та властивостей спечених композиційних матеріалів на основі міді, встановлення залежності між складом, мікроструктурою та експлуатаційними характеристиками.

Завдання лабораторного заняття. В результаті проведення лабораторного заняття студенти повинні:

- знати: основні властивості міді та її сплавів, принципи отримання порошкових композиційних матеріалів та особливості технології спікання; вплив технологічних параметрів на структуру та характеристики матеріалів;
- вміти: визначати основні властивості (щільність, твердість, пористість тощо) спечених матеріалів; аналізувати структуру композиційних матеріалів за мікрофотографіями, робити висновки про зв’язок між структурою та властивостями матеріалів.

9.2. Основні теоретичні положення

У сучасному матеріалознавстві значна увага приділяється створенню композиційних матеріалів, оскільки вони дозволяють поєднувати у собі властивості, які практично неможливо отримати в рамках традиційних сплавів [8-9]. Особливе місце серед них займають матеріали на основі міді. Мідь відзначається високою електропровідністю, доброю теплопровідністю, пластичністю та технологічністю, проте її м’якість і невисока зносостійкість обмежують сфери використання, особливо в умовах тертя чи циклічних механічних навантажень. Для подолання цих недоліків застосовують методи порошкової металургії, які відкривають можливість створення багатокомпонентних систем на основі міді [8].

Серед них особливої уваги заслуговують мідно-графітові композиційні матеріали, які поєднують у собі високу електропровідність і теплопровідність міді з унікальними антифрикційними властивостями графіту. В основі їхньої роботи лежить синергетичний ефект: мідь формує міцну та провідну матрицю, а графіт завдяки своїй шаруватій кристалічній структурі виконує роль твердого мастила. Площини атомів вуглецю у графіті з'єднані слабкими ван-дер-ваальсовими зв'язками, тому вони легко зсуваються одна відносно одної під дією навантаження, зменшуючи тертя. У процесі роботи на поверхні деталей утворюється тонка графітова плівка, яка додатково знижує коефіцієнт тертя й захищає матеріал від інтенсивного зношування [8].

Технологія виготовлення мідно-графітових композицій базується на пресуванні порошкових сумішей із подальшим спіканням при температурах, нижчих за температуру плавлення міді. На властивості кінцевого матеріалу впливають розмір і форма частинок, вміст графіту, режим спікання (температура, час, атмосфера), що дозволяє регулювати щільність, пористість, твердість і зносостійкість. Наявність контрольованої пористості є важливою особливістю: пори здатні утримувати мастильні речовини, що додатково підвищує працездатність деталей у реальних умовах експлуатації.

Практичне значення таких матеріалів важко переоцінити. Вони широко застосовуються у виготовленні електричних щіток для генераторів та електродвигунів, у підшипниках ковзання, які працюють без додаткового змащування, у струмопровідних контактах залізничного транспорту, а також у багатьох інших деталях, що потребують поєднання високої електропровідності та зносостійкості. Таким чином, мідно-графітові композиційні матеріали є яскравим прикладом того, як завдяки використанню наукових принципів — структурних особливостей графіту, електропровідності міді та методів порошкової металургії — вдається створювати матеріали з унікальними властивостями, що забезпечують ефективну роботу складних технічних систем.

9.3. Обладнання, приладдя, матеріали

9.3.1. Обладнання: лабораторний змішувач, прес гідравлічний, піч спікання, твердомір, металографічний мікроскоп.

9.3.2. Приладдя: прес-форма, ваги технічні.

9.3.2. Матеріали: порошки міді та графіту.

9.4. Порядок проведення досліджень

9.4.1. Ознайомитися з теоретичними відомостями про мідні композиційні матеріали та технологію їх отримання.

9.4.2. Підготувати зразки порошкових композиційних матеріалів на основі міді для дослідження.

9.4.3. Провести операцію спікання зразків при заданих параметрах (температура, час, атмосфера).

9.4.4. Визначити фізико-механічні властивості спечених зразків: щільність; твердість.

9.4.5. Дослідити мікроструктуру зразків за допомогою мікроскопа.

9.5. Обробка експериментальних даних

9.5.1. Занести отримані дані до табл. 9.1.

Таблиця 9.1 – Властивості спечених композиційних матеріалів залежно від складу

№ зразка	Склад композиції (мас. %)	Умови спікання (T, °C / t, хв)	Щільність, г/см³	Твердість, НВ	Особливості мікроструктури
1	Cu – 100%	850 / 60			
2	Cu – 95% графіт – 10%	850 / 60			
3	Cu – 90%, Графіт -10%	850/60			

9.5.2. Визначити щільність пресування за формулою

$$\rho = \frac{m}{V} \qquad (9.1)$$

де

m - маса пресування, г;

V - об'єм пресування, см³.

9.5.3. Зробити узагальнюючі висновки про залежність властивостей спечених мідних композиційних матеріалів від хімічного складу та параметрів структури.

5.6. Завдання на самостійну роботу

За матеріалами лекцій та навчальних посібників ознайомитися з властивостями та галузями застосування мідноо-графітних композитів.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Які основні властивості має мідь та чому вона використовується як основа композиційних матеріалів?
2. У чому полягає суть процесу спікання порошкових матеріалів та які фактори впливають на його ефективність?
3. Як склад композиційного матеріалу (домішки, добавки) впливає на його мікроструктуру та властивості?
4. Яким чином визначають щільність і пористість спечених матеріалів у лабораторних умовах?

ЛІТЕРАТУРА

1. Холявко В. В. Фізичні властивості та методи дослідження матеріалів: навчальний посібник для студентів галузі знань 13 – Механічна інженерія спеціальності 132 – Матеріалознавство денної та заочної форм навчання / В. В. Холявко, І. А. Владимирський, О. О. Жабинська. – Київ: Центр учбової літератури, 2016. – 156 с.

2. Механічні властивості та конструкційна міцність матеріалів. Частина І. Основні види механічних випробувань: методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт для студентів напряму підготовки 6.050403 «Інженерне матеріалознавство» денної та заочної форм підготовки / Уклад. В.В. Холявко, Ю.М. Подрезов. - К.: КАПРІ, 2010. - 80 с

3. Погребна Н.Е., Куцова В.З., Котова Т.В. Механічна стабільність матеріалів: Навчальний посібник. – Дніпро: НметАУ, 2021. – 109 с.

4. Державний стандарт України ДСТУ ISO 6892-1:2019. Металеві матеріали. Випробування на розтяг. Частина 1: Метод випробування за кімнатної температури. Ідентичний за змістом до ISO 6892-1:2016 “Metallic materials — Tensile testing — Part 1: Method of test at room temperature”. — Київ: УкрНДНЦ, дата прийняття — 10 травня 2019 р., введення в дію — 01 липня 2020 р.

5. Кольорові метали і сплави: Навчальний посібник /В. Л. Грешта, О. В. Климов, О. В. Лисиця, Л. П. Степанова. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2015. – 336 с.

6. Кольорові метали та сплави [текст]: навч.посіб. / за заг.ред. З. Дурягіної; Нац.ун-т «Львівська політехніка». Львів: Вид-во Львів. Політехніка, 2017. – Ч.1: Мідь та мідні сплави / А.Богун [та ін.]. – 2017. – 122с.

7. Спеціальні сплави, РЗМ та благородні метали. Навчальний посібник / Куцова В.З., Носко О.А., Ковзель М.А. – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2007. – 163 с.

8. Спечені матеріали на основі кольорових металів та сплавів: підручник / О.А. Носко, А.М. Ковзік, Т.А. Аюпова та ін. // Дніпро: Журфонд. – 2025 р. 442 с. ISBN 978-966-934-696-4.

9. Композиційні та порошкові матеріали: навчальний посібник / П.П. Савчук, В.П. Кашицький, М.Д. Мельничук, О.Л. Садова. Луцьк. Вид. ФОП Тепліцин О.В. – 2017. – 368 с.

Навчально-методичне видання

Аюпова Тетяна Анатоліївна,
Носко Ольга Анатоліївна,
Коваль Данило Олегович

МЕТАЛЕВІ МАТЕРІАЛИ НА НЕЗАЛІЗНІЙ ОСНОВІ

Навчально-методичні рекомендації до виконання
лабораторного практикуму
для студентів спеціальності 132 – матеріалознавство
ОПП «Матеріалознавство»
(магістерський рівень)

Електронне видання

Експертний висновок склав канд. техн. наук, доц. Тетяна Котова
Зареєстровано НМВ УДУНТ (№ 73 від 03.09.2025)

В авторській редакції

Комп’ютерна верстка Т. А. Аюпова

Формат 60х84 1/16. Ум. друк. арк. 3,77.Обл.-вид. арк. 3,82.
Зам. № 105.

Видавець: Український державний університет науки і технологій
вул. Лазаряна, 2, ауд. 2216, м. Дніпро, 49010.
Свідоцтво суб’єкта видавничої справи ДК № 7709 від 14.12.2022

Адреса видавця та дільниці оперативної поліграфії:
вул. Лазаряна, 2, Дніпро, 49010