

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ТА ЗАВДАННЯ**

**до лабораторних робіт,
курсової і контрольної роботи
з дисципліни «Фазові рівноваги»
для студентів спеціальності 132
«Матеріалознавство»
денної та заочної форми навчання**

2022

Методичні вказівки та завдання до лабораторних робіт, курсової і контрольної роботи з дисципліни «Фазові рівноваги» для студентів спеціальності 132 «Матеріалознавство» денної та заочної форми навчання /Укл.: Л.П. Степанова, О.В. Лисиця, Г.Г. Трикоз. Комп'ютерний набір – Г.Г. Трикоз, графіка – О.В. Лисиця. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2022. – 76 с.

Укладачі: Л.П. Степанова, доц., к.т.н.
О.В. Лисиця, ст. викладач
Г.Г. Трикоз, зав.лаб.

Рецензенти: В.Я. Грабовський, доц., к.т.н.

Відповідальний за випуск: В.Ю. Ольшанецький, проф., д.т.н.

Затверджено
на засіданні кафедри
Фізичне матеріалознавство
Протокол № 7
від 29 квітня 2022 р.

Затверджено
радою фізико-технічного інституту
Протокол №9
від 10 травня 2022 р

ЗМІСТ

ПРОГРАМА ДИСЦИПЛІНИ	5
МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ	7
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1 Побудова діаграм стану сплавів подвійних систем за допомогою термічного аналізу	7
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2 Діаграма стану сплавів із необмеженою розчинністю компонентів у твердому і рідкому станах	11
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3 Діаграма стану сплавів із обмеженою розчинністю компонентів у твердому стані і утворенням евтектики	18
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4 Діаграми стану сплавів з обмеженою розчинністю у твердому стані та з перитектичною рівновагою і діаграми стану з проміжними фазами	26
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5 Діаграми стану сплавів із моно- і нонваріантними рівновагами твердих розчинів на основі поліморфних модифікацій компонентів та проміжних фаз	33
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6 Фазові рівноваги в потрійних системах. Діаграма стану сплавів із незначною розчинністю компонентів у твердому стані і утворенням потрійної евтектики	41
МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ТА ЗАВДАННЯ ДО КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ ДЛЯ СТУДЕНТІВ ЗАОЧНОГО ВІДДІЛЕННЯ	52

ЗАВДАННЯ НА КУРСОВУ РОБОТУ ДЛЯ СТУДЕНТІВ ЗАОЧНОЇ ФОРМИ НАВЧАННЯ І ВИМОГИ ДО ЇЇ ОФОРМЛЕННЯ	69
ЛІТЕРАТУРА	72
Додаток А. Кристалічні структури металів і неметалів	73

ПРОГРАМА ДИСЦИПЛІНИ

Основи побудови діаграм стану подвійних систем

Предмет і завдання курсу. Основні поняття і терміни: система, фаза, компонент, структурна складова. Стабільний і метастабільний рівноважний стан у системах. Фази в металевих системах. Координатні осі діаграми стану. Побудова діаграм стану за допомогою термічного методу. Критичні точки.

Діаграми стану із необмеженою розчинністю компонентів у твердому і рідкому станах

Умови утворення діаграм стану із безперервними твердими розчинами. Правило важеля або правило відрізків і концентрацій. Правило фаз Гібса. Побудова кривих охолодження за допомогою правила фаз. Кристалізація і структура сплавів. Темп кристалізації.

Діаграми стану з точками екстремуму на кривих солідусу і ліквідусу. Система з бінодальною кривою. Поняття розпаду твердого розчину. Діаграми стану з упорядкованими твердими розчинами.

Діаграми стану із обмеженою розчинністю компонентів у твердому стані.

Умови утворення обмежених твердих розчинів на основі компонентів. Діаграма стану із евтектичною рівновагою. Кристалізація і структура сплавів. Механізм кристалізації і структура евтектики. Поняття фазової суміші. Трикутник Тамана.

Діаграма стану із змінною взаємною розчинністю компонентів. Крива сольвусу. Поняття вторинної кристалізації. Класифікація сплавів за структурою Діаграма стану з майже відсутньою розчинністю компонентів у твердому стані. Вироджена евтектика.

Діаграма стану з ретроградним солідусом. Діаграма стану системи з перитектичною рівновагою. Механізм перитектичного перетворення. Кристалізація і структура сплавів. Вироджена перитектика.

Діаграми стану систем із проміжними фазами.

Класифікація проміжних фаз за складом і характером плавлення (постійного і змінного складу, стійкі і нестійкі, або фази з конгруентним і інконгруентним плавленням). Діаграми стану систем з конгруентним плавленням проміжних фаз. Поняття твердого розчину на основі кристалічної ґратки хімічної сполуки.

Діаграми стану систем із інконгруентним плавленням проміжних фаз. Діаграми стану систем з утворенням проміжної фази в твер-

дому стані за перитектоїдною реакцією. Діаграма стану системи з існуванням проміжної фази в певному інтервалі температур.

Діаграми стану систем з поліморфними модифікаціями компонентів.

Поняття поліморфізму. Діаграми стану з ізоморфними модифікаціями високотемпературної та низькотемпературною модифікаціями другого компонента. Поняття α - і β -стабілізаторів. Діаграма стану з евтектоїдною рівновагою. Фазові перетворення і структура сплавів.

Діаграма стану системи з поліморфними модифікаціями компонентів і відсутньою розчинністю компонентів у твердому стані. Діаграма стану, коли один із компонентів має три інтервали існування поліморфних модифікацій (типу Fe-Cr). Діаграма стану з евтектоїдною рівновагою. Фазові перетворення і класифікація сплавів системи.

Діаграми стану систем з метатектичною та монотектоїдною рівновагами.

Зв'язок між типом діаграми і властивостями сплавів.

Діаграми стану з обмеженою розчинністю у рідкому стані.

Діаграма стану з обмеженою розчинністю компонентів у всьому інтервалі концентрацій сплавів.

Діаграми стану потрійних систем.

Геометричні основи зображення діаграм стану потрійних систем. Концентраційний трикутник і його властивості. Правило фаз. Правило відрізків у потрійній системі для двофазних сплавів. Правило центру маси конодного трикутника.

Діаграма стану системи з необмеженою розчинністю компонентів як у рідкому так і у твердому стані. Умови кристалізації потрійних сплавів.

Ізотермічні і політермічні перерізи. Можливості аналізу фазових перетворень в сплавах при користуванні перерізами.

Діаграма стану системи з відсутньою розчинністю компонентів у твердому стані і утворенням потрійної евтектики. Проекції поверхонь діаграми на площину концентраційного трикутника. Кристалізація і структура типових сплавів.

Побудова ізотермічних і політермічних перерізів в системі. Аналіз політермічних перерізів реальних систем.

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

Студенти, виконуючі лабораторні роботи з курсу «Фазові рівноваги», навчаються: розбирати діаграми стану систем з двох та трьох компонентів; проводити їх якісний і кількісний аналіз; визначати структуру та фазовий склад сплавів та прогнозувати зміну властивостей сплавів системи в залежності від типу діаграми і температури.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

Побудова діаграм стану сплавів подвійних систем за допомогою термічного аналізу

Мета роботи: ознайомитись з термічним методом побудови діаграм стану; навчитись будувати діаграми двокомпонентних систем за допомогою кривих охолодження.

Загальні положення

Будь яка термодинамічна система складається із певної кількості фаз. *Фаза* – однорідна частина системи, що має однаковий хімічний склад, кристалічну будову та властивості і відокремлена від інших фаз поверхнею поділу, при переході через яку хімічний склад та будова речовини різко змінюються. *Компонент* – хімічно чиста речовина (елементи або прості хімічні сполуки), що входять до системи.

Властивості сплавів насамперед визначаються складом фаз та їх кількісним співвідношенням за масою. Відомості про фази можна отримати при аналізі *діаграм фазових рівноваг*. Діаграми стану експериментально будують при дуже повільному охолодженні сплавів, тому вони відповідають майже рівноважному стану системи. Використовують термічний, металографічний, дилатометричний, рентгеноструктурний та інші методи у сукупності.

Завдяки тому, що будь яке фазове перетворення в сплаві супроводжується зміною фізичних властивостей (електроопір, питома вага, параметр кристалічної ґратки і таке інше) можна експериментально побудувати діаграму стану. Так, у термічному методі використовується тепловий ефект, коли при фазових перетвореннях поглинається або виділяється тепло.

На рис. 1.1 показано обладнання для проведення термічного

аналізу. Це електропіч 1 із кришкою, тигель 2; термопара 3 у захисній трубці; холодні кінці термопари за допомогою з'єднувальних проводів підводяться до прибору 4. Термопара – це два різних метала або сплава у вигляді скручених дротів, кожен із яких ізольовано один від одного фарфоровими трубками. Гарячий спай термопари зварюють за допомогою електродугової зварки. У замкнутій системі виникає термоелектрорушійна сила, що породжує електричний струм, який відхиляє стрілку гальванометра, шкала якого найчастіше показує температуру.

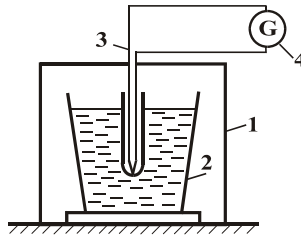


Рисунок 1.1 – Схема обладнання для проведення термічного аналізу

Використовуючи таке обладнання, будують *криві охолодження* (або *нагрівання*) в координатах «температура–час». Для побудови кривої охолодження сплав нагрівають до рідкого стану, а потім при повільному охолодженні фіксують температуру через певний проміжок часу (10...20 с).

На рис. 1.2 наведено криві охолодження в координатах «температура–час» для чистих металів і сплавів системи А–В.

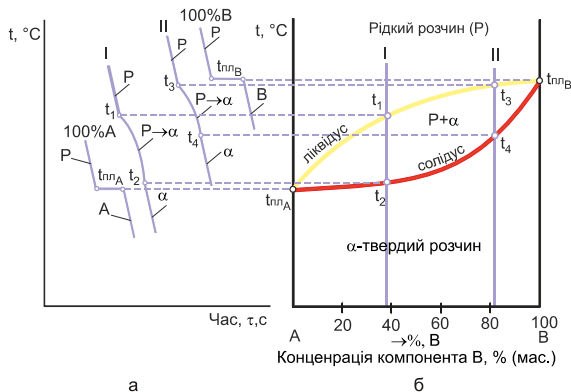


Рисунок 1.2 – Побудова діаграми стану системи А–В за допомогою кривих охолодження

Перехід фази із рідкого стану в твердий, утворення надлишкових фаз, а також зміна кристалічної ґратки при поліморфному перетворенні може супроводжуватися значним виділенням або поглинанням тепла. Внаслідок чого на кривих охолодження спостерігаються або горизонтальні зупинки або перегини, що відповідають певним температурам фазових перетворень. Ці температури називають критичними точками. Криві охолодження одержують для цілого ряду сплавів системи, визначені температури критичних точок переносять на координатну сітку з осями «температура–хімічний склад сплавів» та з'єднують плавними лініями. На горизонтальній осі склад сплавів позначають атомними або масовими процентами. Таким чином, *діаграма стану* зображає області стабільного існування фаз в залежності від температури і хімічного складу сплавів даної системи.

Верхня лінія на діаграмі, що є кривою *ліквідусу*, відповідає температурам початку кристалізації, нижня (крива *солідусу*) – кінця кристалізації. Отже, маємо три області: вище лінії ліквідусу всі сплави знаходяться в рідкому стані, нижче солідусу – в твердому. В проміжній області, тобто між лініями ліквідусу і солідусу, в рівновазі існує дві фази: рідка і α -тверда фаза.

Температурний інтервал між цими лініями називають *інтервалом первинної кристалізації сплавів*. Для сплаву I це t_1-t_2 , для II – (t_3-t_4) . Чисті компоненти А і В кристалізуються при постійній температурі і інтервал кристалізації для них дорівнює нулю. *Криві ліквідусу і солідусу на діаграмі стану сходяться в точках температур плавлення компонентів ($t_{пл}$).*

Діаграми рівноваги характеризують рівноважний стан, який відповідає мінімуму вільної енергії, що досягається тільки при повільному охолодженні. Зазвичай сплави знаходяться у метастабільному стані з підвищеною енергією і обмеженою стійкістю фаз. З часом досягається більш стійка рівновага.

Аналіз діаграм стану дає змогу визначити умови кристалізації, прогнозувати структуру, а також розробити раціональні режими різних видів термічної обробки сплавів та передбачити напрямки зміни властивостей.

Завдання на підготовку до лабораторної роботи

1. Стисло записати основні положення методу побудови діаграм стану з використанням термічного аналізу.

2. Одержати варіант завдання у викладача і виконати його відповідно до порядку виконання роботи.

Контрольні питання

1. Термічний метод побудови діаграм стану.
2. Як отримати криві охолодження ?
3. Як визначити критичні точки і як їх використати для побудови діаграм стану?
4. Назвіть фазові перетворення, що відбуваються при температурах ліквідусу та солідусу ?
5. Що можна визначити з аналізу діаграми стану ?

Порядок виконання роботи

1. Відповідно до одержаного завдання зарисувати криві охолодження.
2. Визначити температури критичних точок, інтервал первинної кристалізації (Δt) для кожного сплаву і записати ці дані в табл.1.1.

Таблиця 1.1 – Хімічний склад, критичні точки та інтервал первинної кристалізації заданих сплавів

Порядковий номер	Хімічний склад, % (мас.)	Критичні точки, °C	Інтервал первинної кристалізації (Δt), °C
1			
2			
...			

3. Одержані точки нанести на площину з координатами «температура–концентрація» для всіх сплавів і з'єднати їх лініями.
4. Вказати ліквідує і солідус, у кожній області діаграми записати фази, що існують в сплавах у стані рівноваги.
5. Серед розглянутих сплавів знайти сплави з найменшим та найбільшим інтервалом кристалізації.
6. Для останнього сплаву побудувати криву нагрівання і описати фазові перетворення, що відбуваються при нагріванні сплаву.

Зміст звіту

Мета роботи, загальні відомості (рис.1.1. 1.2), криві охолодження, табл.1.1, діаграма стану, відповіді і необхідні пояснення.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

Діаграма стану сплавів із необмеженою розчинністю компонентів у твердому і рідкому станах

Мета роботи: з'ясувати фазові перетворення в сплавах системи при рівноважній і нерівноважній кристалізації; навчитись використовувати правило відрізків та правило фаз.

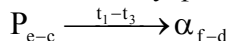
Загальні положення

Рівноважна кристалізація сплавів. Розглянемо рівноважну кристалізацію на прикладі сплавів діаграми стану Cu–Ni (рис.2.1). Критичні точки визначені при дуже повільному охолодженні. Компоненти системи утворюють безперервний ряд твердих розчинів, тобто розчиняються як у твердому, так і в рідкому стані необмежено. *Розчини* – фази, в яких кількісне співвідношення між компонентами може змінюватися без порушення гомогенності. *Необмежений твердий розчин* може бути тільки твердим розчином заміщення, тобто таким, коли атоми другого компонента Ni заміщують атоми міді у просторовій ґратці компонента Cu, не змінюючи її типу. Тверді розчини є фазами змінного складу і позначаються грецькими літерами α , β , γ , ϵ і т. інше.

Умови утворення необмежених твердих розчинів: 1) компоненти повинні бути ізоморфними, тобто мати однаковий тип ґратки (у Cu і Ni ґратки ГЦК); 2) різниця в розмірах атомів компонентів не повинна перевищувати 8...12% ($r_{Cu} = 0,128$ нм, $r_{Ni} = 0,124$ нм); 3) компоненти повинні мати ідентичну електронну структуру атомів.

Розглянемо кристалізацію сплаву X_2 з хімічним складом 40% Ni, 60% Cu (рис. 2.1).

Кристалізація сплаву починається при деякому переохолодженні Δt нижче температури t_1 , коли вільна енергія α -фази менша за вільну енергію рідини ($F_\alpha < F_p$). Сплав кристалізується в інтервалі t_1 – t_3 , з безперервною зміною хімічного складу фаз:



Хімічний склад рідини змінюється відповідно точкам ліквідусу від точки **e** до точки **c**; хімічний склад α -твердої фази – відповідно до точок солідусу від точки **f** до точки **d**. Перші кристали α -фази при температурі t_1 мають склад точки **f** і збагачені більш тугоплавким Ni, у рідині при цій температурі нікелю менше (точка **e**).

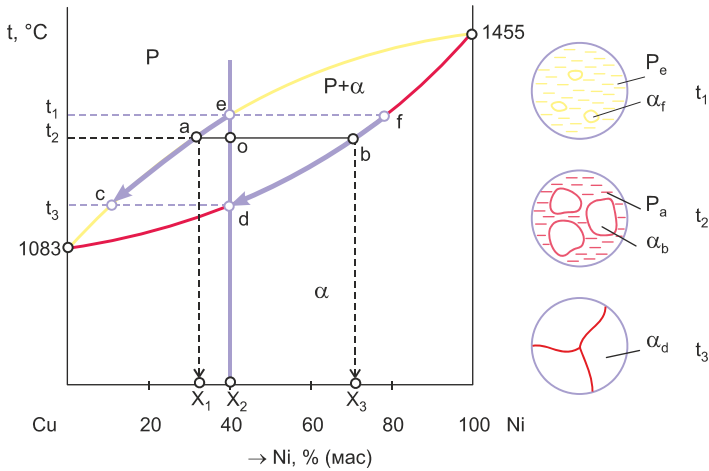


Рисунок 2.1 – Діаграма стану Cu–Ni

Кристалізація сплаву закінчується при температурі t_3 і останні краплі рідини мають склад точки **c**: склад α -фази визначає точка **d** (це хімічний склад сплаву X_2).

Таким чином, при повільному охолодженні дифузія атомів встигає за процесом кристалізації і хімічний склад кристалів вирівнюється і стає однорідним (*гомогенним*) для всіх кристалів твердого розчину. Таку структуру при розгляді в мікроскопі неможливо відрізнити від структури чистого металу. Лише спеціальними дослідженнями (рентгеноструктурний аналіз, вимір мікротвердості) можна довести наявність твердого розчину.

Кількісний аналіз процесів фазових перетворень здійснюється за допомогою *правила відрізків* або *правила важеля*. В будь якій точці двофазної області діаграми можна визначити концентрацію компонентів у фазах, а також масу кожної фази відносно маси усього сплаву. Аналіз проводимо для конкретного сплаву при певній температурі. Точка, що відповідає цим умовам, називається *фігуративною точкою сплаву*. На рис. 2.1 сплав X_2 при температурі t_2 (фігуративна точка **o**) складається із двох фаз: рідини та кристалів α -твердого розчину. Через точку **o** проводимо *коноду aob* – горизонтальну лінію (*ізотерму*) до перетину з лініями діаграми. Кінцеві точки коноди **a** і **b** вказують на хімічний склад фаз, що знаходяться в рівновазі при температурі t_2 : точка **a** визначає хімічний склад рідини, точка **b** – α -твердої фази.

Друге положення правила відрізків. Якщо коноду **ao** вважати важелем, точку сплаву **o** – точкою опори, відрізки **ao** і **ob** – плечами важеля, то маса кожної фази визначається за формулами:

$$Q_p = \frac{ob}{ab} \cdot M; \quad Q_\alpha = \frac{ao}{ab} \cdot M$$

де M – маса сплаву. Якщо прийняти масу сплаву за 100%, то кількість кожної фази в процентах відносно маси всього сплаву дорівнює:

$$Q_p = \frac{ob}{ab} \cdot 100\%; \quad Q_\alpha = \frac{ao}{ab} \cdot 100\%$$

Відрізки коноди між заданою точкою сплаву і точками, що визначають хімічний склад фаз, обернено пропорційні кількісному співвідношенню фаз (за масою):

$$\frac{Q_\alpha}{Q_p} = \frac{ao}{ob} = \frac{x_2 - x_1}{x_3 - x_2}$$

Довжину відрізків **ao**, **ob**, **ab** зазвичай визначають проекціями точок **a**, **o**, **b** на вісь концентрацій (відповідні значення X_1 , X_2 та X_3).

В будь якій однофазній області маса фази дорівнює масі сплаву, а склад фази відповідає складу сплаву, тобто коноду для цього випадку не проводять.

Правило фаз. Закономірності існування стійких фаз, що відповідають умовам рівноваги, можуть бути описані формулою, яку називають правилом фаз (правилом Гіббса):

$$C = K - \Phi + 2$$

де C – кількість ступенів свободи або варіантність системи;

K – кількість компонентів;

Φ – кількість фаз, що знаходяться у рівновазі;

2 – кількість зовнішніх параметрів рівноваги (температура, тиск).

Для металевих систем вплив тиску на температуру фазових перетворень при переході від твердої фази до рідкої дуже незначний, тому за цих умов його не враховують:

$$C = K - \Phi + 1$$

Кількість ступенів свободи – це незалежні параметри (температура, концентрація), які можна змінювати в деякому інтервалі без зміни кількості фаз, тобто за умов, коли не утворюються нові і не зникають старі фази.

Аналіз подвійних діаграм ($K = 2$) у однофазній області $C = K - \Phi + 1 = 2 - 1 + 1 = 2$ показує, що система *біваріантна* (можуть змінюватися як температура так і хімічний склад фаз). У двофазній області $C = 2 - 2 + 1 = 1$ система *моноваріантна* (змінюється або температура, або склад фаз).

В двокомпонентній системі одночасно можуть існувати не більше трьох фаз, коли $C = 2 - 3 + 1 = 0$, тобто у випадку *новваріантної рівноваги*. Нонваріантна рівновага у подвійній системі – це рівновага трьох фаз. Вона реалізується при постійній температурі та незмінній концентрації компонентів для кожної із рівноважних фаз.

На кривих охолодження при зміні кількості фаз спостерігаються точки перегину або температурні зупинки, так звані критичні точки.

Нерівноважна кристалізація. При дуже повільному охолодженні (обов'язкова умова рівноважної кристалізації) процеси об'ємної дифузії у рідкій та твердій фазах, а також міжфазної дифузії рідина– α -тверда фаза встигають за процесом первинної кристалізації і хімічний склад кристалів вирівнюється. Сплав після твердіння складається із однорідних кристалів α -твердого розчину, його хімічний склад відповідає складу сплаву.

В умовах прискореного охолодження (при одержанні зливків, литих деталей або зварених), дифузія, особливо у середині твердої фази, відбувається повільно, тому склад α -фази, навіть у межах одного кристала, не встигає вирівнюватися і буде значно відрізнятися від рівноважного значення за цієї температури.

Розглянемо кристалізацію сплаву (40% Ni і 60% Cu) при швидкому охолодженні (рис. 2.2). Відмічаємо, що процеси дифузії легко вирівнюють склад рідкої фази відповідно до рівноважного стану за ліквідусом $a_1 a_2 a_3 a_4$. Перші кристали при температурі t_1 мають склад точки b_1 . При охолодженні до температури t_2 , рідина змінить склад від точки a_1 до a_2 . Тверда фаза повинна мати склад відповідно до точки b_2 , але такий склад будуть мати тільки тонкі шари на межі поділу рідина– α -твердий розчин. В об'ємі зерен середній склад буде відповідати точці c_2 , що знаходиться між точками b_1 і b_2 . При подальшому зниженні температури середній склад α -фази ще більше відхиляється від рівноважного. При температурі t_3 , якщо рівновага не досягнута, кристалізація сплаву не завершується тому, що в сплаві ще залишається рідина, яка визначається за правилом відрізків, як

$$Q_p = \frac{b_3 c_3}{a_3 c_3} \cdot 100\% = \frac{54 - 40}{54 - 12} \cdot 100\% \cong 33,3\%$$

Твердіння сплаву відбувається при температурі t_4 коли середній склад α -фази буде збігатися зі складом сплаву (точка c_4) та поверхневі шари кристалів будуть збагачені Ni.

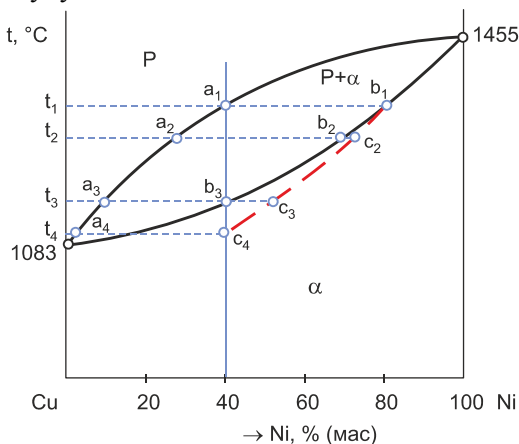


Рисунок 2.2 – Нерівноважна концентрація сплавів системи Cu–Ni

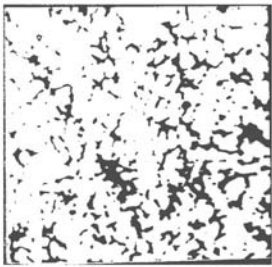
Лінію $b_1c_2c_3c_4$ називають *нерівноважним солідусом*, його положення на діаграмі залежить від швидкості охолодження. Сплав в умовах нерівноважної кристалізації буде мати неоднорідну структуру.

При прискореному охолодженні утворюються кристали *деревоподібної форми (дендрити)*, у яких осі першого порядку, що виникають в початковий момент кристалізації збагачені більш тугоплавким нікелем (рис. 2.3, а). Периферійні шари кристалу та міжосні простори, що кристалізуються в останню чергу, будуть збагачені більш легкоплавкою міддю. Таку неоднорідність складу сплаву в середині окремих кристалів називають *внутрішньозереною*. Внаслідок різної здатності до щавлення, ділянки твердого розчину, які мають неоднаковий хімічний склад, легко виявляють за допомогою макро- та мікроскопічного аналізів (рис. 2.3, а).

Після гарячої деформації в сплаві, який має дендритну ліквідацію, спостерігається анізотропія властивостей, тобто їх різні значення уздовж та поперек напрямку деформації.

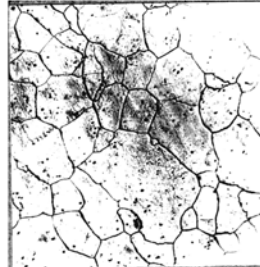
Вирівнювання складу сплаву можна досягти *дифузійним відпаленням* – тривалим нагріванням затверділого металу при температурах, що забезпечують достатню рухомість атомів міді та нікелю. Відпалення проводять при температурах дещо нижче нерівноважного солідусу – t_4 (рис. 2.2). Таку термічну обробку називають *гомогенізацією*.

Після відпалювання дендритна структура литого сплаву вже не виявляється і сплав складається з однорідних кристалів твердого розчину (рис. 2.3, б).



×340

а



×340

б

а – литий стан (світлі осі дендритів твердого розчину збагачені нікелем, темні – збагачені міддю); б – після дифузійного відпалення
Рисунок 2.3 – Мікроструктура сплаву «мідь–нікель»

Завдання на підготовку до лабораторної роботи

1. Зарисувати і описати рівноважну діаграму стану системи Cu–Ni, взаємодію компонентів у рідкому і твердому стані.
2. Записати умови утворення необмежених твердих розчинів заміщення.
3. Вказати, які зміни відбуваються при нерівноважній кристалізації.
4. Одержати варіант завдання і виконати його.

Контрольні питання

1. Тверді розчини, їх позначення. Чим вони відрізняються від хімічних сполук?
2. Які атоми знаходяться в кристалічній ґратці твердого розчину?
3. Умови утворення необмежених твердих розчинів.
4. Які фактори впливають на розчинність компонентів один в одному?
5. Правило відрізків. Як визначити хімічний склад і масу фази

для заданої температури?

6. Правило фаз, його застосування для побудови кривих охолодження сплавів.

7. Які зміни відбуваються при нерівноважній кристалізації ?

8. Умови нерівноважної кристалізації в системі Cu–Ni.

9 Що таке дендритна ліквіація, як пояснити її утворення в структурі сплавів та як її можна усунути ?

Порядок виконання роботи

1. Нарисувати одержану діаграму стану, в кожній області записати фази, вказати лінії ліквідусу і солідусу.

2. Вказати хімічний склад сплаву, кристалізація якого починається при заданій температурі.

3. Провести лінію заданого сплаву 1, визначити температури критичних точок. Побудувати криву охолодження за допомогою правила фаз і описати фазові перетворення при охолодженні.

4. Схематично зарисувати структуру сплаву після твердіння.

5. Визначити хімічний склад рідини в початкову і кінцеву мить кристалізації.

6. Вказати температурний інтервал кристалізації та зміну хімічного складу фаз у цьому інтервалі.

7. Для вказаної температури провести коноду і за правилом відрізків визначити хімічний склад кожної фази та її масу у процентах відносно маси усього сплаву.

8. Для нерівноважної кристалізації показати відхилення кривої солідусу у позначеному сплаві при швидкому охолодженні від рівноважного положення.

Зміст звіту

Мета роботи, загальні відомості (рис. 2.1, 2.2); схематичне зображення мікроструктури Cu, Ni та сплаву (40% Ni і 60% Cu); задана діаграма стану, відповіді, необхідні пояснення та розрахунки, схеми мікроструктур відповідно до порядку виконання роботи.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

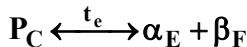
Діаграма стану сплавів із обмеженою розчинністю компонентів у твердому стані і утворенням евтектики

Мета роботи: навчитись аналізувати характер фазових перетворень в сплавах при рівноважній кристалізації; ознайомитись з типовими структурами сплавів даної системи.

Загальні положення

Сплави з обмеженою розчинністю компонентів у твердому стані належать до найбільш поширеного класу металевих систем. Якщо компоненти відрізняються типом кристалічної ґратки, розміром та електронною будовою атомів, тобто фізико-хімічними властивостями, то утворюється обмежена розчинність. Обмежені розчини за типом ділять на заміщення та втілення, останні є завжди обмеженими. Області обмежених розчинів мають різну протяжність; за межами цих областей можуть утворюватися різні за природою фазові суміші: евтектичні, евтектоїдні.

На рис. 3.1. показана структурна діаграма компонентів **A** і **B** з обмеженою розчинністю і утворенням евтектики. *Ліквідус* **MCN** зображено двома кривими **MC** і **CN**, що перетинаються в точці **C**. Лінії **MC** та **CN** відповідають температурам початку кристалізації відповідно α - та β -твердих розчинів на основі компонентів **A** і **B**. При температурі t_e рідка фаза, що має хімічний склад точки **C**, перебуває в рівновазі одночасно із α та β -фазами



Це *нонваріантна евтектична рівновага*, тому що в рівновазі знаходяться три фази (**P**, α , β). Відповідно до правила фаз в сплаві X_3 при температурі t_e кількість ступенів свободи дорівнює нулю ($C_e = K - \Phi + 1 = 2 - 3 + 1 = 0$). Тому на кривих охолодження сплавів X_3 та X_2 при $t = t_e$ спостерігаються температурні зупинки (рис. 3.1. б).

При деякому незначному переохолодженні (Δt) відносно температури t_e із рідини складу точки **C** при постійній температурі одночасно кристалізуються α - і β -фази, що утворюють фазову суміш, яку називають *евтектикою*:



Евтектичний сплав X_2 має найнижчу температуру плавлення в системі.

Солідус **MECFN** складається із відрізків ME, FM та горизонтальної прямої ECF (рис.3.1). Якщо криві ME та FN характеризують температури кінця первинної кристалізації α - і β - твердих розчинів, то горизонталь ECF (лінія евтектики) – температуру кристалізації евтектики.

Однофазні області α і β на діаграмі – це обмежені тверді розчини. Точка **E** – максимальна розчинність компонента B в α -твердому розчині при температурі t_e , відповідно точка F – для компонента A в β -твердому розчині. При охолодженні сплавів нижче t_e розчинність компонентів в фазах α і β зменшується, на що вказують лінії EK та FS діаграми. Ці криві називаються лініями *сольвусу* і визначають вони границю розчинності одного компонента в іншому у твердому стані.

Теорія кристалізації евтектик розроблена А.А. Бочваром. Спочатку зароджуються і ростуть кристали однієї із фаз (так званої ведучої), наприклад β -твердого розчину. Рідина навкруги збагачується компонентом A, внаслідок чого утворюється α -фаза (ведена фаза). Обидві фази кристалізуються у вигляді розвинених дендритів. На перерізі шліфа спостерігається розгалужена евтектика у вигляді зернистої, пластинчастої або іншої форми, подібно зображеної на рис. 3.1, в. Евтектика має характерну будову, чітко виділяється у загальній структурі і тому є структурною складовою.

Сплави, що знаходяться між точками E та C називають *доевтектичними*, а ті, що лежать між точками C і F – *заевтектичними*.

Розглянемо кристалізацію сплаву X_3 . Перші кристали β -твердого розчину мають склад точки **d**. При охолодженні в інтервалі температур t_1 – t_2 їх хімічний склад змінюється вздовж лінії солідусу dF, а склад рідкої фази – за лінією ліквідує від точки l до точки C. Кількісне співвідношення за масою первинних β -кристалів і евтектичної рідини при температурі t_e визначається за правилом відрізків:

$$\frac{Q_{\beta}}{Q_p} = \frac{C2}{2F}$$

Ця рідина буде мати склад точки C і кристалізується із утворенням евтектики ($\alpha + \beta$). Структура сплаву, а також крива охолодження показані на рис. 3.1, б, в. Слід сказати, що евтектику, як складну структурну складову, спостерігаємо в структурі всіх сплавів концентраційного інтервалу **ECF**.

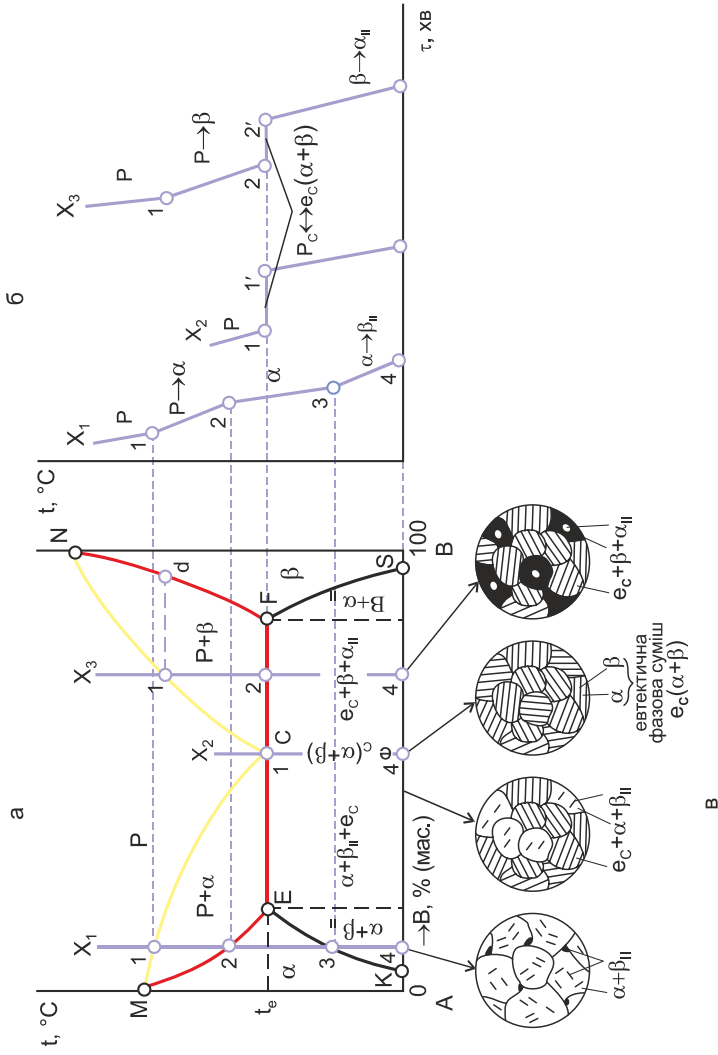


Рисунок 3.1 – Структурна діаграма системи А–В з обмеженою розчинністю (а), криві охолодження (б) та структури сплавів (в)

На кривій охолодження сплаву X_1 критичні точки 1 і 2 відповідають температурам початку і кінця кристалізації α -твердого розчину. В інтервалі t_2 - t_3 існує однофазна область α -твердого розчину, охолодження відбувається без зміни хімічного складу фази. Нижче температури t_3 внаслідок зменшення розчинності компонента В в ґратці метала А, охолодження твердого розчину супроводжується його частковим розпадом з виділенням надлишкової вторинної фази β_{II} . Точка 3 відповідає початку *вторинної кристалізації*, яка вже відбувається в твердому стані.

На рис. 3.2 наведено фазову діаграму, на якій вказано фазовий склад структурних складових. Область **KECFSK** є двофазною. В сплаві X_1 при кімнатній температурі склад α -фази визначає точка К, склад β -фази – точка S, кількісне співвідношення вторинних кристалів β_{II} та первинної α - фази дорівнює:

$$\frac{Q_{\beta_{II}}}{Q_{\alpha}} = \frac{KS}{AS}$$

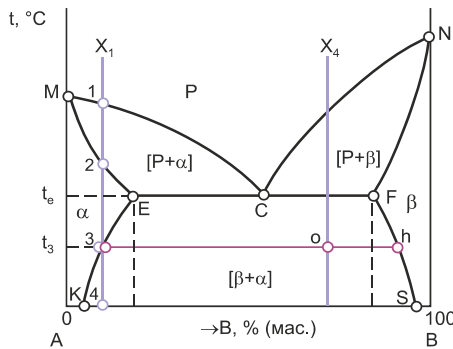


Рисунок 3.2 – Фазова діаграма стану сплавів системи А-В з обмеженою розчинністю компонентів

Вторинна кристалізація спостерігається для усіх сплавів у концентраційному інтервалі **KS**. Нижче лінії **KE** виділяються кристали β_{II} -фази, на лінії **FS** – початок кристалізації α_{II} -фази; нижче лінії **ECF** при охолодженні від t_e до кімнатної із α та β кристалів виділяються відповідно β_{II} та α_{II} фази. В структурі їх можна спостерігати як на межі зерен, так і всередині зерна первинних кристалів (див.рис.3.1, в).

Таким чином, при охолодженні сплавів нижче температури t_e відбувається постійна зміна складу α - та β -фаз за лініями **EK** та **FS**.

Наприклад, при температурі t_3 у сплаві X_4 (фігуративна точка o) склад α -фази визначається точкою 3 , а β -фази – точкою h (рис. 3.2). Долю β -фази, як первинну, так і в складі евтектики, знаходимо із співвідношення:

$$Q_{\beta} = \frac{3o}{3h} \cdot 100\%$$

Для α - фази:

$$Q_{\alpha} = \frac{oh}{3h} \cdot 100\%$$

Якщо розчинність другого компонента з температурою практично не змінюється, сольвуси EK та FS будуть вертикальними (рис. 3.3, а) і нижче температури евтектики α - і β - фази мають постійний склад: α_E та β_F . Виділення вторинних фаз не спостерігаємо.

В металевих системах існують діаграми з дуже незначною розчинністю у твердому стані, що позначено пунктиром (рис. 3.3, б).

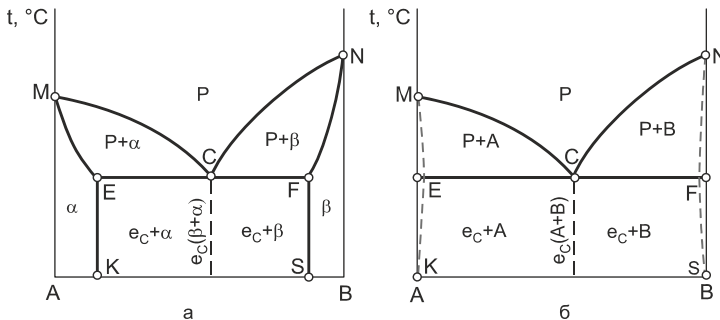


Рисунок 3.3 – Діаграми стану з постійною розчинністю компонентів (а) та незначною розчинністю у твердому стані (б)

Особливістю такої діаграми є відсутність областей твердих розчинів. Треба зважити на те, що абсолютно чистих металів не існує, але при заповненні подібної діаграми умовно припускається ставити чисті компоненти А і В замість твердих розчинів α і β , що підкреслює незначну взаємну розчинність компонентів А і В у твердому стані.

Діаграма рівноваги «свинець–сурма». Діаграма стану системи $Pb-Sb$ наведена на рис. 3.4. Компоненти свинець та сурма значно відрізняються розмірами атомів ($r_{Pb}=0,175$ нм, $r_{Sb}=0,159$ нм) та типом ґратки: у свинцю – ГЦК, у сурми – ромбоєдрична. Максимальна роз-

чинність сурми в α -твердому розчині при температурі 252°C становить 3,5% (т.Е, рис.3.4), при цій же температурі в β -твердому розчині – 5% Pb (т.Ф). При зниженні температури розчинність компонентів зменшується та при кімнатній температурі в ГЦК гратці свинцю розчиняється 0,44% Sb, а в гратці сурми – 1% Pb. Евтектичний сплав містить 11,1% Sb та 88,9% Pb і має температуру плавлення 252°C . Сплави, що містять від 3,5% до 11,1% Sb називають *доевтектичними*, а від 11,1% до 95% сурми – *заевтектичними*.

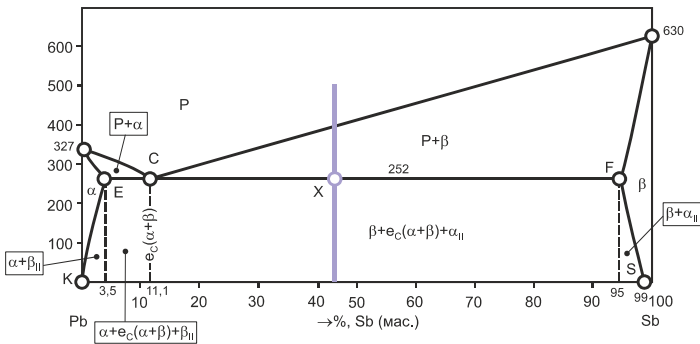


Рисунок 3.4 – Діаграма стану системи Pb–Sb

Однією із практичних задач, яку можна вирішити, використовуючи діаграму стану та правило відрізків, є визначення складу сплаву. Наприклад, за площею, що займає евтектика у мікроструктурі заевтектичного сплаву, можна розрахувати хімічний склад цього сплаву. Структура заевтектичного сплаву складається з евтектики і β -твердого розчину. При мікроскопічному аналізі виявлено, що у сплаві складу, що визначається точкою X (рис.3.4) евтектика займає 60% всієї площі шліфа. Використовуючи правило важеля складаємо наступне співвідношення:

$$Q_e = \frac{F - X}{F - C} = \frac{95 - X}{95 - 11,1} \cdot 100\% = 60\%.$$

Тоді $\frac{95 - X}{95 - 11,1} = \frac{60}{100}$. Після розв'язання цього рівняння знаходимо

хімічний склад сплаву. Довжини відрізків знайдені через процентний вміст сурми, тому хімічний склад сплаву: 44,66% Sb та 55,34% Pb. Визначити хімічний склад інших заданих сплавів та заповнити таблицю

3.1. Визначити $t_{пл}$ сплавів і відповідно інтервал кристалізації Δt . Схематично зарисувати мікроструктуру сплавів.

Таблиця 3.1 – Хімічний склад досліджених сплавів системи Pb–Sb

Сплав	Вміст елементів, %		Фазовий склад	Структура	Температура плавлення, $t_{пл}$, °C	Інтервал кристалізації, Δt , °C
	Pb	Sb				
1						
2	89,9	11,1				
3						

Завдання на підготовку до лабораторної роботи

1. Зарисувати і описати рівноважну діаграму стану (рис.3.1, 3.3, 3.4), взаємодію компонентів у рідкому та твердому станах. Підготувати табл.3.1.

2. Одержати варіант завдання у викладача і виконати його відповідно до порядку виконання роботи.

Контрольні питання

1. За яких умов утворюються обмежені тверді розчини ?
2. Що таке евтектика, як записати евтектичну реакцію і умови її утворення ?
3. Які сплави називають доевтектичними, за- і евтектичним ? Фазові перетворення в них при охолодженні із рідкого стану.
4. Застосувати правило фаз і правило відрізків для окремих фігуративних точок сплавів.
5. Як зображається діаграма стану у випадку незначної взаємної розчинності компонентів ? Із яких фаз складається евтектика ?
6. В якому випадку сольвус є прямою лінією ?

Порядок виконання роботи

1. Зарисувати одержану у викладача діаграму, позначити в кожній області структурні складові, а фази записати у дужках.
2. Знайти ліквідує та солідус.
3. Вказати, як компоненти взаємодіють між собою у твердому стані (обмежена чи незначна розчинність).
4. Знайти найбільшу (максимальну) розчинність компонентів

один в одному і показати, як вона змінюється при охолодженні до кімнатної температури.

5. Вказати структурні складові і фази в системі, дати їм характеристику.

6. Записати концентраційний інтервал сплавів, в яких відбувається вторинна кристалізація, а також вказати температурні інтервали цього процесу.

7. В заданому сплаві **1** знайти температурний інтервал первинної кристалізації та вказати зміну хімічного складу фаз в цьому інтервалі.

8. Використовуючи правило фаз побудувати криву охолодження сплаву **1**. Описати фазові перетворення при охолодженні.

9. Схематично зарисувати структуру цього сплаву і розрахувати кількість кожної структурної складової при кімнатній температурі.

10. Для вказаної температури, використовуючи правило відрізків, визначити концентрацію компонентів у фазах та відносну кількість кожної фази за масою в сплаві у відсотках.

11. Для вказаного сплаву **2** описати фазові перетворення при нагріванні.

Зміст звіту

Мета роботи; загальні відомості (рис. 3.1, 3.3, 3.4), табл.3.1, схематичне зображення мікроструктури заданих сплавів, необхідні розрахунки; діаграма стану, відповіді і необхідні пояснення та розрахунки, схеми мікроструктур відповідно до порядку виконання роботи.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

Діаграми стану з обмеженою розчинністю у твердому стані та з перитектичною рівновагою і діаграми стану з проміжними фазами

Мета роботи: навчитись аналізувати характер фазових перетворень в сплавах при рівноважній кристалізації; ознайомитись із фазовим станом та структурами сплавів даних систем.

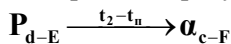
Загальні відомості

Діаграми стану з обмеженою розчинністю в твердому стані і наявністю перитектики. Даний тип діаграми (рис. 4.1) утворюють метали, температури плавлення яких значно відрізняються (точки **N** і **M**), але в той же час, завдяки незначній відмінності в будові атомів та їх розмірах, вони мають близькі фізико-хімічні властивості.

Один з компонентів, а саме **B**, знижує температури початку і кінця первинної кристалізації α -твердого розчину (відповідно криві **NE** та **NF**); компонент **A** підвищує ці температури для β -твердого розчину (лінії **ME** та **MR**).

Слід відмітити такі характерні особливості: криві ліквідусу **NE** та **EM** перетинаються в точці **E**, що розташована по один бік від точок найбільшої взаємної розчинності компонентів (для α -фази це точка **F**, для β -твердого розчину – точка **R**). Нижче ізотерми **FRE** в сплавах інтервалу **R–E**, праворуч від точки **R**, ще існує рідка фаза.

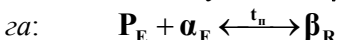
Розглянемо кристалізацію сплаву X_2 . З рідини складу точки **d** при температурі t_2 кристалізується α -тверда фаза складу точки **c**. В інтервалі температур t_2-t_n рідина збагачується компонентом **B**, її склад змінюється за ліквідусом **dE** і при температурі t_n досягає точки **E**:



Кількісне співвідношення фаз (за масою) пропорційне відрізкам коноди **FR** і **RE**:

$$\frac{Q_P}{Q_a} = \frac{FR}{RE}$$

При температурі t_n в рівновазі знаходяться три фази постійного хімічного складу: **P_E**, α_F , β_R . *Це нонваріантна перитектична рівновага:*



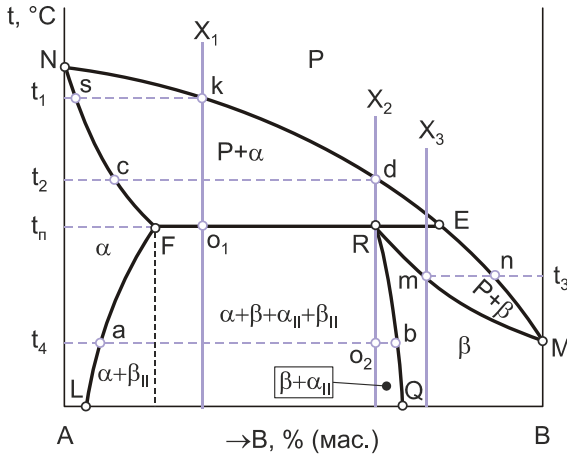


Рисунок. 4.1 – Діаграма стану із обмеженою розчинністю компонентів у твердому стані і перитектикою

На відміну від евтектичного перетворення, коли із рідини певного хімічного складу кристалізуються одночасно дві тверді фази, перитектичне перетворення характеризується послідовною кристалізацією спочатку α -фази, а потім β -твердого розчину. Відбувається це за такою схемою: кристали α -фази перетворюються в β -фазу із надлишком атомів В, рідина кристалізується в β -фазу, але із недостатчею атомів В. Одночасно відбувається вирівнювання концентрації компонентів у β -фазі відповідно до точки Р. Обидві вихідні фази Р і α повністю використані при утворенні β -фази.

При подальшому охолодженні до кімнатної температури з β -фази виділяються вторинні кристали α_{II} -фази внаслідок зменшення розчинності компонента А за сольвусом RQ і структура сплаву стає двофазною. Наприклад, при температурі t_4 (фігуративна точка o_2) маємо таке кількісне співвідношення фаз за масою:

$$\frac{Q_a}{Q_\beta} = \frac{o_2 b}{a o_2}$$

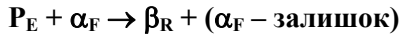
Криві сольвусу FL та RQ характеризують змінну розчинність компонентів А і В один в одному і виділення кристалів β_{II} і α_{II} .

У сплаві X_1 перший етап кристалізації відбувається в інтервалі температур t_1 – t_n і закінчується утворенням кристалів α -фази:

$P_{K-E} \rightarrow \alpha_{S-F}$. Масова кількість рідини і α -фази при температурі t_n визначається із співвідношення відрізків:

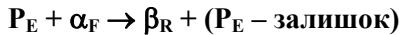
$$\frac{Q_P}{Q_\alpha} = \frac{F o_1}{o_1 E}$$

При переохолодженні, як і в сплаві X_2 , кристалізується β -фаза:

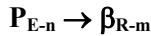


Але на відміну від сплаву X_2 , в сплаві X_1 α -фаза частково залишається і нижче температури t_n . Зародження кристалів β -фази з точки зору термодинаміки можливо, як у рідині, так і на поверхні кристалів α -фази. Обидві фази є самостійними структурними складовими на відміну від евтектичних α і β , які утворюють одну евтектичну суміш.

В сплаві X_3 первинна кристалізація відбувається аналогічно сплавам X_1 і X_2 , але при перитектичному перетворенні залишається рідина



Ця частина рідини не вступає в реакцію і при подальшому охолодженні в інтервалі температур $t_n - t_3$ кристалізується у β -фазу:



Нижче t_3 існує однофазна область β -фази із таким же вмістом компонентів, як і в сплаві X_3 .

Таким чином, перитектична реакція проходить до кінця без залишку фаз тільки тоді, коли їх маси відносяться, як відрізки FR і RE . Тільки у сплаві X_2 кристалізація при температурі t_n відбувається із зникненням як α -фази, так і рідини; в сплавах, розташованих ліворуч від точки R в інтервалі FR , залишається певна кількість α -фази; в сплавах інтервалу RE у залишку буде рідка фаза. В сплавах, склад яких більше або дорівнює точці E а також менше, або дорівнює точці F , перитектичне перетворення відсутнє і вони кристалізуються за звичайною схемою.

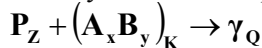
Діаграми стану з проміжними фазами. Проміжними називають фази, що утворюються в інтервалі концентрацій між обмеженими твердими розчинами на основі компонентів, які входять до системи. Між областю твердого розчину і проміжною фазою завжди знаходиться двофазна область.

На рис. 4.2 проміжними фазами є хімічна сполука A_xB_y і твердий розчин γ на основі другої хімічної сполуки, що описується формулою A_mB_n . Їх наявність в системі позначають над кривою ліквідуса стрілками з написаною поруч формулою, що відповідає *стехіометричному складу хімічної сполуки*. Маючи складні кристалічні ґратки, проміжні фази набувають нових властивостей, які значно відрізняються від властивостей компонентів.

В залежності від області гомогенності, проміжні фази поділяють на фази *постійного і змінного хімічного складу*. Фази *постійного складу* – це певні хімічні сполуки. Розчинність компонентів **A** і **B** в кристалічній ґратці A_xB_y практично відсутня, тобто на основі хімічної сполуки тверді розчини не утворюються. Такий поділ є значною мірою умовним, бо в природі взагалі, і в металевих системах зокрема, не зустрічаються фази постійного складу в чистому вигляді. Фази постійного складу на діаграмі стану зображаються вертикальними прямими. На рис.4.2 це лінія $MKNN'$, що позначає хімічну сполуку A_xB_y .

Проміжні фази змінного складу – це обмежені тверді розчини на основі хімічної сполуки. Область гомогенності γ -твердого розчину (заштрихована частина діаграми на рис. 4.2) залежить від характеру взаємодії компонентів. Вертикальна лінія QR відповідає стехіометричному складу хімічної сполуки A_mB_n . Сплави, які розташовані в γ -області, ліворуч від цієї лінії, уявляють з себе тверді розчини на основі ґратки сполуки A_mB_n з надлишком атомів компонента **A**. Можливо також утворення твердого розчину, коли область гомогенності поширюється праворуч від вертикалі QR , в цьому випадку говорять про надлишок атомів компонента **B** в ґратці сполуки A_mB_n .

Кристалізація γ -фази відбувається за перитектичною реакцією:



Лінія ZQK – ізотерма перитектичної рівноваги.

В залежності від характеру плавлення, проміжні фази поділяють на *стійки або нестійки*. Проміжна фаза A_xB_y розплавляється при температурі точки **M** з утворенням рідини того ж складу, що і тверда фаза. Тому хімічна сполука A_xB_y , яка кристалізується за схемою $P_M \rightarrow (A_xB_y)_M$, називається *стійкою, або проміжною фазою, що конгруентно плавиться* (конгруентний – збіжний).

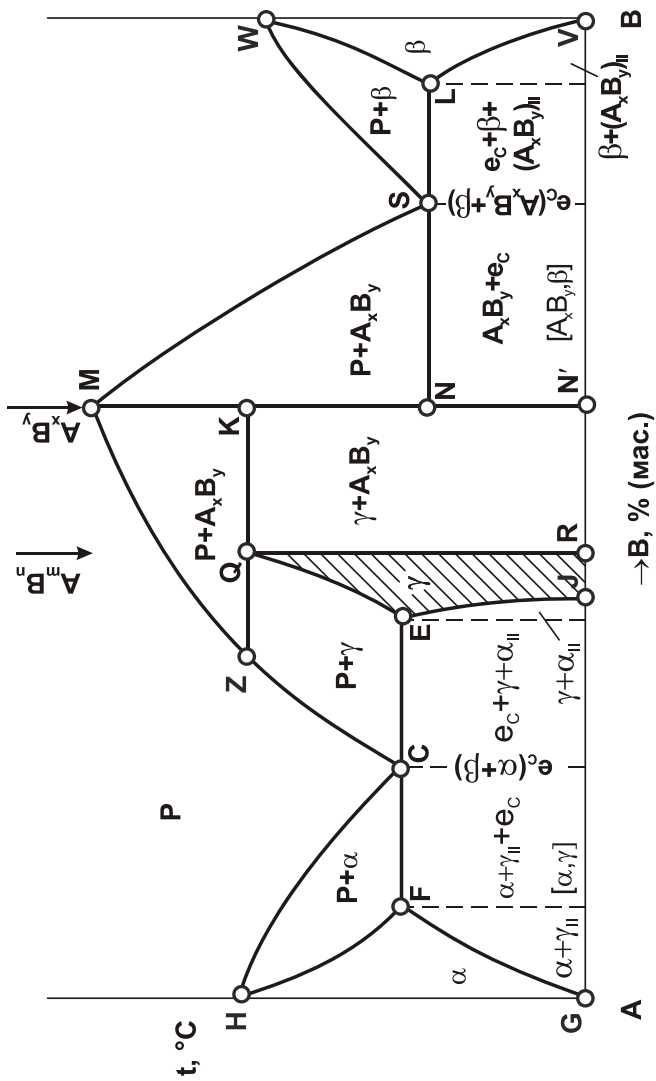
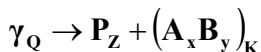


Рисунок 4.2 – Диаграма сатну сплавів системи А-В з проміжними фазами

Згідно правила фаз, коли $q = 1$ (кількість збіжних концентрацій), число ступенів свободи дорівнює: $C_M = K - \Phi + 1 - q = 2(A, B) - 2(P, A_xB_y) + 1 - 1 = 0$, тобто хімічна сполука A_xB_y розплавляється при постійній температурі.

Проміжні фази (на рис. 4.2, γ -твердий розчин), розплавлення яких приводить до утворення рідини іншого складу, ніж склад твердої фази, називають *нестійкими фазами, або фазами, що інконгруентно плавляться*:



Окрім рідини, утворюється нова тверда фаза, склад якої відрізняється як від складу рідини, так і від складу γ -фази.

Таким чином, в розглянутій діаграмі стану існують фази: P , α , β , γ і A_xB_y , де: α -фаза – твердий розчин атомів B в ґратці компонента A ; β -фаза – твердий розчин атомів A в ґратці компонента B ; γ -фаза – проміжна фаза змінного хімічного складу, твердий розчин атомів A в ґратці хімічної сполуки A_mB_n , з інконгруентним плавленням; A_xB_y – проміжна фаза постійного хімічного складу з конгруентним плавленням. Новаріантні рівноваги відповідають двом ізотермам евтектичного перетворення (**FCE** та **NSL**) і одній ізотермі перитектичного перетворення (**ZQK**).

Завдання на підготовку до лабораторної роботи

1. Зарисувати і описати рівноважну діаграму стану з перитектичною рівновагою (в загальному вигляді, для компонентів A і B), взаємодію компонентів у твердому стані.
2. Описати сутність перитектичного перетворення.
3. Зарисувати і стисло описати діаграму стану сплавів системи з проміжними фазами.
4. Дати характеристику і класифікацію проміжних фаз.
5. Одержати варіант завдання і виконати його відповідно до порядку виконання роботи.

Контрольні питання

1. В чому полягає сутність перитектичного перетворення ?
2. Яка принципова відмінність між перитектичним і евтектичним перетвореннями ?
3. Пояснити, чому в сплавах типу X_3 , залишається рідина, а в

сплавах типу X_1 , навпаки, α -фаза.

4. Дати характеристику проміжним фазам.
5. Як зображують на діаграмах стану проміжні фази постійного та змінного хімічного складу ?
6. Як на діаграмі стану визначити стехіометричний склад проміжної фази ?
7. В чому відміна стійких проміжних фаз від нестійких ?
8. Що означають терміни: фаза конгруентно чи інконгруентно плавиться ?

Порядок виконання роботи

1. Накреслити одержану діаграму стану, в кожній області записати структурні складові, а також у дужках вказати їх фазовий склад. Знайти ліквідус і солідус.
2. Вказати, як компоненти взаємодіють між собою у твердому стані та до якого типу діаграм дану діаграму можна віднести.
3. Дати характеристику фазам і структурним складовим.
4. Визначити концентраційний інтервал сплавів, в яких спостерігається нонваріантна рівновага. Вказати температури і записати реакції.
5. Знайти сплави, в яких кристалізуються вторинні фази. Назвати ці фази і вказати температурні інтервали вторинної кристалізації.
6. Побудувати криву охолодження сплаву **1** із застосуванням правила фаз та описати фазові перетворення при охолодженні.
7. Схематично нарисувати структуру цього сплаву при кімнатній температурі. Вказати структурні складові, розрахувати відносну кількість кожної структурної складової.
8. Для вказаної температури, використовуючи правило відрізків, визначити концентрацію компонентів у фазах та відносну кількість кожної фази (в %).
9. Описати фазові перетворення при нагріванні сплаву **2**.
10. Використовуючи правило Курнакова пояснити, як будуть змінюватися властивості сплавів системи в залежності від їх хімічного складу.

Зміст звіту

Мета роботи; загальні відомості (рис. 4.1, 4.2); діаграма стану, відповіді і необхідні пояснення та розрахунки, схеми мікросруктур.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

Діаграми стану сплавів із моно- і нонваріантними рівновагами твердих розчинів на основі поліморфних модифікацій компонентів та проміжних фаз

Мета роботи: навчитись аналізувати характер фазових перетворень в діаграмах складного типу; ознайомитись із структурою та фазовим складом сплавів.

Загальні положення

Здатність деяких кристалічних речовин мати дві або більше кристалічні ґратки різної будови називають *поліморфізмом або алотропією*. Кожна кристалічна структура або поліморфна модифікація буде стійкою в певних інтервалах температур та тиску і позначається літерами α , β , γ , δ ... (наприклад, α -Ti, β -Ti). Перехід від однієї модифікації до іншої називають *поліморфним фазовим перетворенням*. В чистих металах такий процес відбувається при постійній визначеній температурі і супроводжується значною зміною властивостей існуючих фаз.

Поліморфне перетворення обумовлене зменшенням вільної енергії фаз і здійснюються за допомогою таких механізмів: дифузійного (або нормального) і бездифузійного. При повільному охолодженні (або нагріванні) перебудова ґраток обумовлена дифузією атомів і підпорядковуються законам кристалізації. При істотних переохолодженнях, коли дифузійна рухомість атомів стає незначною, перебудова кристалічної ґратки здійснюється шляхом пружного зсуву і переміщення атомів не перевищує міжатомні відстані.

Поліморфізм притаманний таким металам, як Fe, Co, Ti, Zr, Hf та інші, і має суттєве значення для практичного використання при термічній обробці, як спосіб зміцнення сплавів.

На рис. 5.1, а наведена діаграма стану системи **Ti-Ta** з поліморфним перетворенням компонента Ti. При температурі 882°C відбувається перебудова низькотемпературної модифікації α -Ti з ГЦП ґраткою у високотемпературну модифікацію β -Ti з ОЦК ґраткою. Поліморфне перетворення в титані відбувається при постійній температурі, про що свідчить правило фаз: $C = K - \Phi + 1 = 1 - 2(\alpha\text{-Ti}, \beta\text{-Ti}) + 1 = 0$. У компонента Ta поліморфні модифікації відсутні, він має

гратку ОЦК. Тантал необмежено розчиняється в ОЦК гратці високо-температурної модифікації β -Ті.

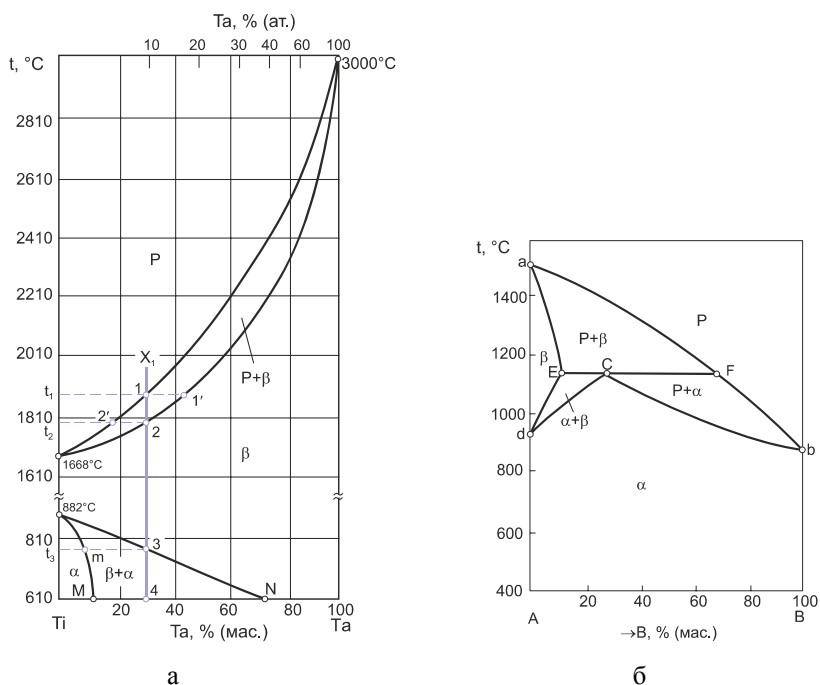
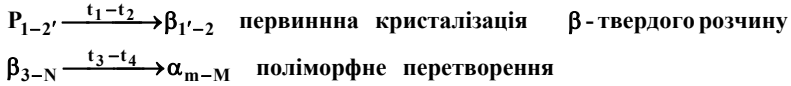


Рисунок 5.1 – Діаграма стану системи Ті–Та з поліморфним перетворенням титана (а) та компонента А у системі А–В (б)

Розглянемо кристалізацію сплаву X_1 . В інтервалі температур t_1 – t_2 кристалізується β -фаза – твердий розчин заміщення атомів Та в ОЦК гратці модифікації β -Ті. В температурному інтервалі t_2 – t_3 сплав має структуру β -фази, стабільну до температури t_3 (фазові перетворення відсутні). При деякому переохолодженні β -фаза стає нестійкою і починає перетворюватися в α -фазу з ГЦП граткою. Перші кристали α -твердого розчину при температурі t_3 мають склад точки m . При подальшому охолодженні склад α -фази змінюється за лінією m – M , а склад β -фази визначається точками лінії 3 – N . Кількість ступенів свободи відповідно дорівнює $C = 2 - 2(\alpha, \beta) + 1 = 1$, тобто *поліморфне перетворення в сплавах проходить в інтервалі температур*. Таким чином в сплаві X_1 фазові перетворення здійснюються в два етапи:

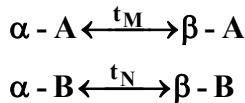


Поліморфне перетворення $\beta \rightarrow \alpha$ в сплавах з концентрацією T_a до точки M відбувається повністю. Сплави, склад яких знаходиться між точками M і N при кімнатній температурі мають двофазну структуру $\alpha + \beta$, тобто поліморфне перетворення проходить лише частково. В сплавах, з вмістом компонента T_a більшим ніж в точці N , в інтервалі температур від кімнатної до точок солідусу поліморфні перетворення не відбуваються і стабільною є β -фаза.

По відношенню до T_i , всі легувальні елементи, що розширюють область існування β -фази, називають *β -стабілізаторами* (наприклад, T_a , рис.5.1, а). Якщо розширюється область α -твердого розчину, то в цьому випадку компонент B є *α -стабілізатором* (рис.5.1, б) він підвищує температуру поліморфного перетворення в сплавах цієї системи.

Розглянуті поліморфні перетворення твердих розчинів складаються з перебудови кристалічної ґратки і дифузійного перерозподілу компонентів між фазами та реалізуються тільки при повільному охолодженні.

У випадку, коли розчинність компонентів взаємно обмежена, як у високотемпературних, так і низькотемпературних модифікаціях, то діаграми стану ускладнюються. На рис. 5.2 наведена діаграма рівноваги, коли обидва компоненти мають поліморфні перетворення:



Високотемпературні модифікації чистих металів $\beta-A$ і $\beta-B$ ізоморфні, тобто мають один і той же тип ґратки і необмежено розчиняються один в одному, низькотемпературні модифікації $\alpha-A$ і $\alpha-B$ навпаки розчиняються обмежено з утворенням твердих розчинів α і γ . На діаграмі нижче лінії солідусу існують однофазні області α , β , γ і три двофазні $\beta+\alpha$, $\beta+\gamma$ та $\alpha+\gamma$. Коли температура досягає ізотерми $E_C F$, β -фаза має склад точки C і знаходиться в рівновазі з кристалами α - та γ -фази. Це нонваріантна рівновага трьох фаз: $C = K - \Phi + 1 = 2 - 3(\alpha, \beta, \gamma) + 1 = 0$. Надалі, при незначному переохолодженні β -фаза розпадається з утворенням фазової суміші ($\alpha+\gamma$): $\beta_C \xrightarrow{t_C-\Delta t} e_{vC}(\alpha_E + \gamma_F)$

Це перетворення подібне до евтектичного, але відбувається воно

в твердому стані і на відміну від евтектичного, його називають *евтектоїдним*. Фазову суміш $ев_c(\alpha + \beta)$ називають *евтектоїдом*; сплав складу точки C – *евтектоїдним*; сплави, що розташовані між точками E і C – *доевтектоїдними*; сплави, що знаходяться між точками C і F , – *заевтектоїдними*.

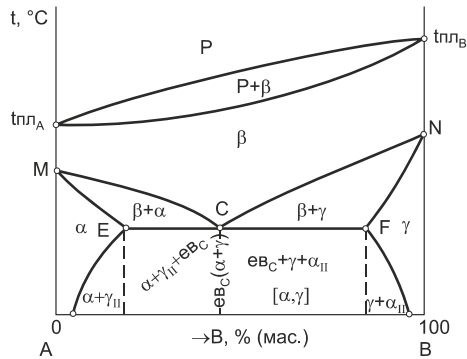


Рисунок 5.2 – Діаграма стану з поліморфними перетвореннями компонентів А і В і утворенням евтектоїда

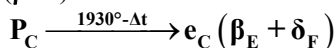
Наявність проміжних фаз і поліморфних модифікацій компонентів значно ускладнюють діаграми стану. Наприклад, розглянемо реальну діаграму рівноваги сплавів системи *гафній–вольфрам*. (рис. 5.3) один із компонентів якої, а саме W , не має поліморфного перетворення, а другий компонент Hf , навпаки, має дві модифікації: α - Hf з гексагональною ґраткою і β - Hf з ОЦК ґраткою. Температура перебудови ґраток відповідає точці G і дорівнює $1750^\circ C$: $\alpha - Hf \xrightarrow{1750^\circ + \Delta t} \beta - Hf \xrightarrow{2205^\circ + \Delta t} P$. Вольфрам має ґратку ОЦК, його температура плавлення становить $3380^\circ C$.

Розчинність компонентів в ґратці один одного обмежена. В гексагональній ґратці низькотемпературної модифікації α - Hf при температурі $1560^\circ C$ розчиняється $0,9\% W$ (точка Z); в ОЦК ґратці високотемпературної β -фази – $14\% W$ при температурі $1930^\circ C$ (точка E). В ОЦК ґратці W при температурі $2650^\circ C$ розчиняється $15\% Hf$ (точка N). На основі W та модифікацій Hf утворюються тверді розчини заміщення.

В системі існує проміжна δ -фаза – твердий розчин атомів Hf і W в ГЦК ґратці нестійкої хімічної сполуки HfW_2 . Утворюється δ -фаза за перитектичною реакцією: $P_M + \gamma_N \xrightarrow{2650 - \Delta t} \delta_H$

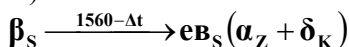
Изотерма **MHN** – лінія нонваріантної перитектичної рівноваги.

При температурі 1930°C (лінія ECF) існує евтектична рівновага трьох фаз: β , δ і **P**, а при деякому переохолодженні із рідини кристалізується фазова суміш ($\beta+\delta$):



Евтектика ($\beta+\delta$) існує в температурному інтервалі 1930...1560°C в структурі всіх сплавів, розташованих між точками **E** і **F**.

При температурі 1560°C (лінія ZSK) β -фаза розпадається з утворенням евтектоїду ($\alpha+\delta$):



Евтектоїдне перетворення супроводжується поліморфним перетворенням $\beta \rightarrow \alpha$. Перетворення за евтектоїдною реакцією відбувається в сплавах концентраційного інтервалу, між точками **Z** і **K**.

Евтектичний сплав складу точки **C** має найнижчу температуру плавлення (1930°C) серед усіх сплавів системи. Між лініями **GS** і **GZ** відбувається поліморфне перетворення $\beta \rightleftharpoons \alpha$. Лінія сольвус **ND** вказує на зменшення концентрації Hf в γ -фазі при охолодженні, що пов'язано з вторинною кристалізацією δ_{II} -фази. Згідно лінії сольвус **ES** спостерігається початок третинної кристалізації δ_{III} -фази внаслідок зменшення розчинності W в β -фазі. При температурах точок лінії **ZQ** утворюється вже четвертинна δ_{IV} -фаза.

Таким чином, в сплавах даної системи існують фази: α , β , γ , δ і **P**. Структура в твердому стані характеризується такими структурними складовими: α , β , γ , δ , евтектика $e_c(\beta+\delta)$, евтектика $e_c(e_{V_S}+\delta)$, евтектоїд $e_{V_S}(\alpha+\delta)$. Фазовий склад області **SECFKS** на рис. 5.3 показаний у квадратних дужках [β , δ], а області **QZSKLQ** – [α , δ].

Розглянемо кристалізацію сплаву **X₁**

В інтервалі температур t_1-t_2 із рідини кристалізуються кристали β -фази. При температурі $t_2 = 1930^\circ\text{C}$ твердіння рідини закінчується кристалізацією евтектики $e_c(\beta + \delta)$. На рис. 5.4, а, на схемі структури сплаву нижче температури t_2 зображені первинні кристали β -фази і евтектика $e_c(\beta + \delta)$ (округлі частинки кристалів β -фази оточені δ -фазою). В інтервалі температур t_2-t_3 внаслідок зменшення розчинності W в β -Hf (лінія сольвус ES), з β -твердого розчину кристалізується тре-

тинна δ_{III} -фаза, яка на рис.5.4, б оточує кристали β -фази, зливаючись з евтектичною δ -фазою. При температурі t_3 маємо евтектоїдну рівновагу $\beta_S \rightleftharpoons \alpha_P + \delta_K$, а далі при деякому переохолодженні β -фаза складу точки **S** розпадається з утворенням евтектоїдної суміші двох фаз:

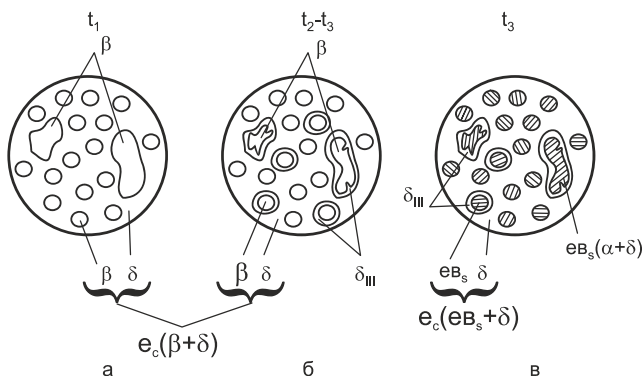
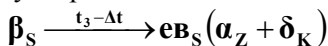
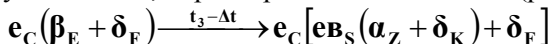


Рисунок 5.4 – Поступові зміни в структурі сплаву X_1 при охолодженні

Змінюється також і будова евтектики, тому що β -фаза, що входить до складу евтектики, перетворюється в евтектоїд (рис. 5.4, в):



При зниженні температури від t_3 до t_4 з α -фази кристалізується четвертинна δ_{IV} -фаза (лінія сольвус ZQ).

Завдання на лабораторну роботу

1. Нарисувати і стисло описати діаграми стану систем з поліморфними модифікаціями компонентів.
2. Одержати варіант завдання у викладача і виконати його відповідно до порядку виконання роботи.

Контрольні питання

1. В чому полягає поліморфізм металів ?
2. Як на діаграмі стану визначити наявність поліморфних перетворень компонентів ?
3. Відміна евтектоїдного перетворення від евтектичного ?

4. Як змінюється структура евтектичного сплаву за умови, що у ньому відбувається ще і евтектоїдне перетворення ?

Порядок виконання роботи

1. Нарисувати одержану діаграму стану, в кожній області записати структурні складові, а також у дужках вказати фази. Знайти ліквідус і солідус.

2. Відмітити поліморфізм компонентів і описати характер взаємної розчинності компонентів один в одному або в поліморфних модифікаціях окремо.

3. З'ясувати, до якого типу діаграм рівноваги можна віднести дану діаграму.

4. Дати характеристику фазам і структурним складовим.

5. Визначити концентраційні інтервали сплавів, в яких спостерігаються нонваріантні рівноваги. Вказати температури і записати відповідні реакції.

6. Знайти сплави, в яких кристалізуються вторинні та третинні фази. Назвати ці фази і вказати лінії діаграми та температурні інтервали кристалізації.

7. Знайти сплави, в яких не спостерігаються нонваріантні рівноваги у всіх діапазонах температур.

8. Побудувати криву охолодження сплаву 1 із застосуванням правила фаз та описати фазові перетворення при охолодженні.

9. Схематично зарисувати структуру цього сплаву при кімнатній температурі. Позначити структурні складові.

10. Для вказаної температури провести коноду і, використовуючи правило відрізків, визначити концентрацію компонентів у фазах та відносну кількість кожної фази у відсотках.

11. Описати фазові перетворення при нагріванні сплаву 2.

12. Використовуючи правило Курнакова, пояснити як будуть змінюватися властивості сплавів в залежності від їх хімічного складу. Вказати деформівні та ливарні сплави.

Зміст звіту

Мета роботи, загальні відомості (рис. 5.1, 5.2), діаграма стану, відповіді і необхідні пояснення та розрахунки, схеми мікроструктур.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6

Фазові рівноваги в потрійних системах. Діаграма стану сплавів із незначною розчинністю компонентів у твердому стані і утворенням потрійної евтектики

Мета роботи: навчитись аналізувати характер фазових перетворень в потрійних системах; ознайомитись з політермічними та ізотермічними перерізами в системі.

Загальні положення

На відміну від плоских подвійних діаграм стану, діаграма рівноваги системи із трьох компонентів в координатах «хімічний склад сплавів–температура» є просторовою фігурою у вигляді тригональної призми, вертикальними гранями якої є подвійні діаграми. Хімічний склад сплавів визначається за допомогою рівнобічного трикутника з нанесеною на нього сіткою концентрацій. З цих причин його називають *концентраційним трикутником* (рис. 6.1). Вершини трикутника відповідають чистим компонентам і позначаються символами елементів (в загальному вигляді **A**, **B**, **C** на рис. 6.1). Сторони трикутника відповідають хімічному складу подвійних сплавів: так на стороні **AB** вказуються концентрації елементів в сплавах системи **A–B** і таке інше. Склад будь-якого потрійного сплаву визначається фігуративною точкою, розташованою на площині трикутника. При цьому треба враховувати одну із властивостей рівнобічного трикутника: якщо з точки сплаву провести прямі лінії паралельно сторонам трикутника, то сума одержаних відрізків па сторонах дорівнює довжині сторони трикутника або 100%. Концентрацію компонентів визначають довжиною відрізків від вершини трикутника або за стрілкою годинника (зазвичай) або проти неї. Треба звертати увагу на напрям зміни вмісту компонентів на сторонах трикутника. Так, сплав **N** має хімічний склад: 20%A, 20%B, 60%C (рис. 6.1).

Процеси кристалізації потрійних сплавів підпорядковуються все тим же основним правилам, що і кристалізація подвійних сплавів, тобто правилу фаз і правилу відрізків. Останнє правило може бути використано тільки для двофазної області. В трифазних областях існує більш складне правило центра ваги.

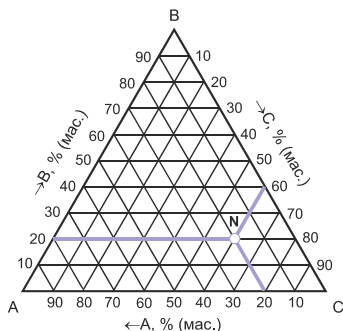


Рисунок 6.1 – Концентраційний трикутник з координатною сіткою для визначення хімічного складу сплавів

Якщо із рідини (рис. 6.2) кристалізуються кристали чистого компонента **B** в сплаві, що визначається точкою **S**, то склад рідини, що залишилася, надалі буде змінюватися за прямою **BSb**, що з'єднує точки **B** і **S**. І якщо склад рідини досягає значення точки **b**, то кількість рідини, що ще залишилася, можна визначити довжиною відрізка **BS**, а кількість кристалів компонента **B** – відрізком **Sb**:

$$Q_B = \frac{Sb}{Bb} \cdot 100\% \quad Q_P = \frac{BS}{Bb} \cdot 100\%$$

Або, якщо сплав за складом точки **O**, має двофазну структуру, склад однієї із фаз, наприклад α , визначається точкою **d**, а склад іншої фази β – точкою **e**, то відносна кількість фаз визначається відрізками:

$$\frac{Q_\alpha}{Q_\beta} = \frac{oe}{do}$$

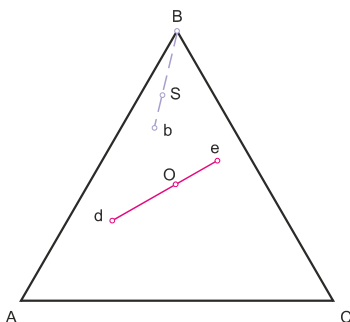


Рисунок 6.2 – Правило відрізків для сплавів, що складаються з двох фаз

На рис. 6.3 показана діаграма стану з потрійною евтектикою та майже відсутньою взаємною розчинністю компонентів (просторове зображення діаграми та проекція ліній подвійних евтектик на концентраційний трикутник **ABC**).

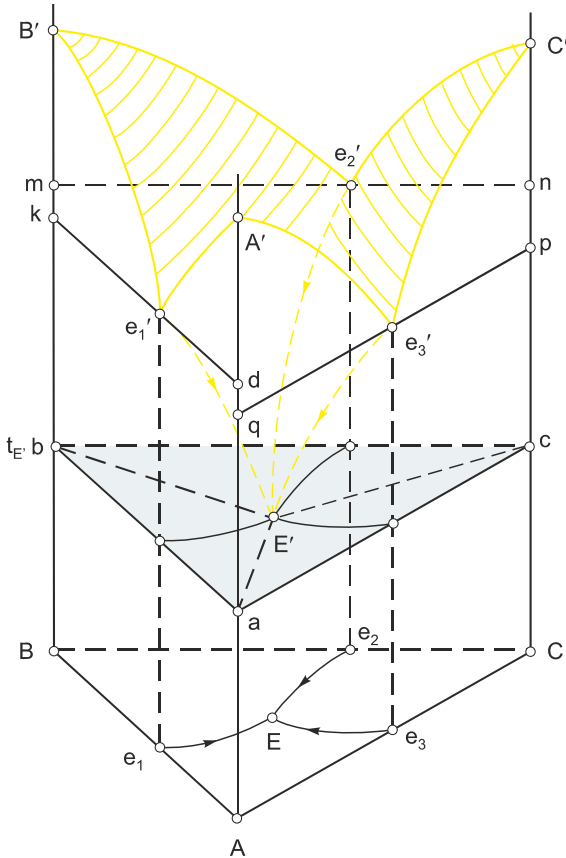


Рисунок 6.3 – Діаграма стану з незначною взаємною розчинністю компонентів у твердому стані і утворенням потрійної та подвійних евтектик

Ребра тригональної призми – це температурні осі, точки A' , B' , C' – температури плавлення відповідно компонентів A , B та C . На гранях призми розташовані подвійні діаграми рівноваги A – B , B – C та C – A з евтектикою. Наявність ще одного компонента приводить до збільшення варіантності системи на одиницю, тому лінії ліквідусу, солідусу, а також

інші перетворюються на поверхні. Кожному компоненту відповідає поверхня ліквідус, яка починається в точках плавлення даного компонента і спадає до більш низьких температур для інших сплавів. Це поверхні $A'e_1E'e_3A'$, $B'e_1E'e_2B'$ та $C'e_2E'e_3C'$, що відповідають температурам первинної кристалізації відповідно компонентів А, В та С. На концентраційному трикутнику АВС їх проекції – це області Ae_1Ee_3A , Be_2Ee_1B , Ce_2Ee_3C . Кожна точка поверхні ліквідус показує температуру та склад рідини, що знаходиться в рівновазі з відповідною твердою фазою. Кожні дві поверхні ліквідус попарно перетинаються вздовж ліній e_1E' , e_2E' і e_3E' , які називають лініями подвійних евтектик: вони вказують на хімічний склад рідкої фази, що знаходиться в рівновазі з двома твердими фазами при певній температурі. Так лінія e_1E' відповідає кристалізації подвійної евтектики А + В; лінія e_2E' – евтектики В + С; e_3E' – евтектики А + С. На проекції це лінії e_1E , e_2E та e_3E .

Лінії подвійних евтектик перетинаються в одній точці E' , що є *точкою потрійної евтектики*, в якій рідина при найнижчій температурі $t_{E'}$ знаходиться в рівновазі з трьома твердими фазами. А, В і С. Згідно з правилом фаз робимо висновок, що процес первинної кристалізації компонентів А, В чи С ($C = K - \Phi + 1 = 3 - 2(P, A) + 1 = 2$) і процес кристалізації евтектик e_1, e_2, e_3 ($C = 3 - 3(P, A, B) + 1 = 1$) відбувається в інтервалі температур. При температурі $t_{E'}$ у всіх сплавах залишається рідина, що кристалізується при постійній температурі у потрійну евтектику: $C = 3 - 4(P, A, B, C) + 1 = 0$.

Оскільки потрійна евтектика є в структурі усіх потрійних сплавів, це означає, що їх температура кінця кристалізації однакова і відповідає положенню у просторі солідусного трикутника abc при температурі $t_{E'}$.

Окрім трьох поверхонь ліквідусу, в просторовій діаграмі є шість поверхонь початку кристалізації подвійних евтектик: $de_1E'ad$ і $ke_1E'bk$ (для евтектики А + В); $me_2E'bm$ і $ne_2E'cn$ (для евтектики В + С) та $pe_3E'cp$ і $qe_3E'aq$ (для евтектики С + А). Кожна пара цих поверхонь перетинається вздовж ліній подвійних евтектик. Суміжні поверхні перетинаються в площині солідусного трикутника abc вздовж ліній $E'b$ (для А + В і В + С), $E'c$ (для В + С і С + А) та $E'a$ (для С + А і А + В), які на концентраційний трикутник АВС проєктуються

у вигляді пунктирних ліній EB, EC та EA (рис. 6.4).

Лінії подвійних евтектик на проекції мають вигляд суцільних ліній e_1E , e_2E та e_3E із стрілками, що показують напрямок зниження температури. Поверхні кристалізації подвійної евтектики $A + B$ на проекції представлені трикутником AEB, евтектики $(B + C)$ – трикутником BEC і евтектики $(A + C)$ – трикутником AEC.

Кристалізація типових сплавів. На рис. 6.4 показана проекція поверхонь діаграми ABC на концентраційній трикутник, за її допомогою можна послідовно простежити кристалізацію усіх сплавів. Сплав X розташований в області кристалізації компонента A (Ae_1Ee_3A), тому його кристалізація починається з виділення з рідини кристалів компонента A. Внаслідок кристалізації компонента A рідина збагачується компонентами B та C і її хімічний склад змінюється від точки X до точки a, тобто точки, які відповідають за склад рівноважних рідини та кристалів A, будуть розташовуватись на прямій Aa, що проходить через точку сплаву X із вершини A. При зниженні температури, коли склад рідини буде відповідати точці a, що знаходиться на кривій e_1E , із рідини починає кристалізуватися подвійна евтектика $(A + B)$. Надалі склад рідини змінюється від точки a до E і при температурі точки E кристалізація сплаву закінчиться утворенням потрійної евтектики: $P_E \xrightarrow{t_E - \Delta t} E(A + B + C)$. Структура сплаву: первинні кристали A, подвійна евтектика $e_1(A + B)$ та потрійна евтектика $E(A + B + C)$. На відповідній кривій охолодження цього сплаву маємо три критичні точки (рис. 6.5).

Якщо сплави розташовані на лініях кристалізації подвійних евтектик (наприклад, Y на рис. 6.4), в сплавах відсутні кристали майже чистих металів (A або C, або B). Сплав на кривій охолодження має дві критичні точки: верхня відповідає температурі початку кристалізації подвійної евтектики $e_3(A + C)$, а нижня точка E – температурі кристалізації потрійної евтектики. В сплаві Z, що розташований на лінії BE, після кристалізації речовини B, утворюється при постійній температурі t_E потрійна евтектика і в структурі сплаву відсутня будь-яка подвійна евтектика. Відповідно, на кривій охолодження сплаву Z маємо дві критичні точки. Сплав, склад якого відповідає точці E, кристалізується при постійній температурі і є евтектичним.

Відповідно до кристалізації типових сплавів, структура всіх сплавів системи на ізотермічному перерізі при 20°C зображена на рис.6.6.

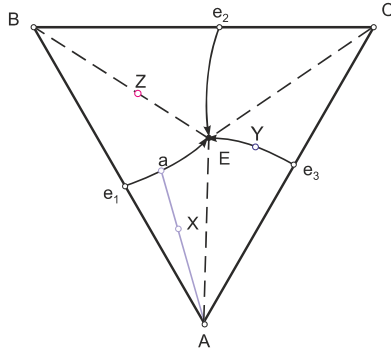


Рисунок 6.4 – Проекція поверхонь діаграми рівноваги сплавів системи А–В–С на концентраційний трикутник

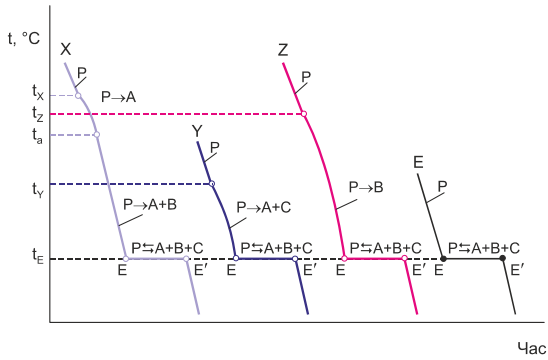


Рисунок 6.5 – Криві охолодження типових сплавів

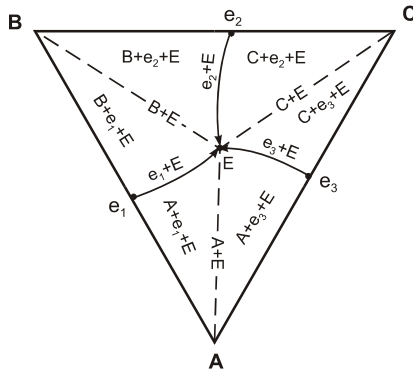


Рисунок 6.6 – Структура сплавів системи А–В–С при 20°C

Вертикальні перерізи. Дослідження умов кристалізації та структури сплавів значно полегшуються при розгляді горизонтальних та вертикальних перерізів діаграми. *Ізотермічний (горизонтальний) переріз* дозволяє визначити фазові рівноваги в сплавах системи для певної температури.

Найчастіше використовуються *вертикальні (політермічні) перерізи*, коли для сплавів певного хімічного складу можна визначити температури і умови фазових перетворень.

Приклад побудови політермічного перерізу. На рис. 6.7 побудовано переріз, сплави якого мають постійний вміст компонента В (22%). Лінія **fs** паралельна стороні АС трикутника. Для побудови перерізу необхідно знати температури плавлення компонентів та подвійних евтектик: для компонента А – 700°C, В – 800°C, С – 900°C, $e_1(A + B) - 400^\circ\text{C}$, $e_2(B + C) - 600^\circ\text{C}$ та $e_3(A + C) - 500^\circ\text{C}$.

Побудову перерізу здійснюють у певній послідовності. Спочатку проводять лінію перерізу **fs** та визначають склад подвійних сплавів точок **f** (22%B, 78%A) та **s** (78%C, 22%B), на лінії перерізу позначають потрібні сплави **1**, **2** та **3**, що відокремлюють області із різною структурою. Сплав **1** має такі структурні складові А + Е, сплав **2** – $e_3 + E$, **3** – С + Е. Проставити точки 1, 2, 3 на концентраційну вісь лінії **fs**. За допомогою подвійних діаграм А–В і В–С визначено температури плавлення сплавів: 580°C (точка **f'**) для сплаву **f** та 800°C (точка **s''**) для сплаву **s**.

Сплав 2 знаходиться на лінії подвійної евтектики e_3 , температура початку кристалізації якої в сплаві 2 (точка d) становить приблизно 380°C (оцінюємо по розташуванню сплаву відносно точок Е і e_3). Перенести ці температурні точки **f'**, **s''** і d для відповідних сплавів.

Переріз необхідно будувати, починаючи із ліній ліквідусу. Компонент А починає кристалізуватися по лінії **f'd** в сплавах інтервалу $f \leq x < d$. Кристалізація компонента С починається на ліквідусі **ds''** в сплавах між точками d та s. Нижче цих двох ліній – двофазні області P + А та P + С.

Після кристалізації чистих компонентів знаходимо лінії початку кристалізації подвійних евтектик з'єднуючи точки **f'** із **1'** для e_1 , точки **s'** і **3'** для e_2 . Лінія **1'd3'** – температури початку кристалізації подвійної евтектики e_3 в сплавах інтервалу між точками 1 та 3. Отже, відповідно до правила фаз ($C = 3 - 3 + 1 = 1$) подвійні евтектики кристалізуються

в інтервалі температур $t_e - t_E$. При температурі 200°C у всіх потрійних сплавах системи залишається рідина, що при постійній температурі кристалізується у потрійну евтектику $E(A + B + C)$. На кривих охолодження цих сплавів маємо температурні зупинки, бо $C_E = K - \Phi + 1 = 3 - 4(A, B, C, P) + 1 = 0$.

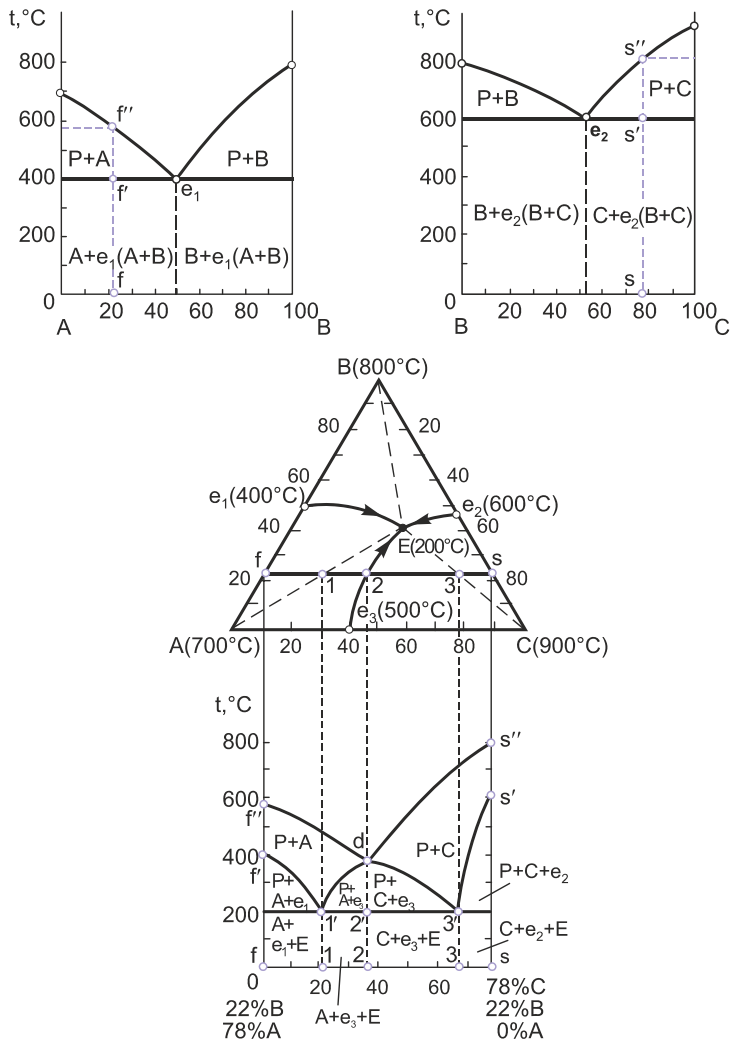


Рисунок 6.7 – Побудова політермічного перерізу

із постійним вмістом 22%B (лінія fs)

Відповідно до позначень структури в кожній області, можна визначити температури початку і кінця кристалізації фаз та евтектик і побудувати криві охолодження. *Із аналізу вертикальних перерізів немає змоги визначити склад фаз та їх відносну кількість, тому що коноди сплавів будуть знаходитися в інших вертикальних площинах.*

Реальна діаграма з потрійною евтектикою. На рис. 6.8 наведено проекцію ізотерм ліквідусу сплавів системи Bi-Pb-Sn на концентраційний трикутник. У Вісмуті ґратка гексагональна, у Pb – ГЦК, а Sn має об'ємно центровану тетрагональну ґратку. Маючи ізотерми ліквідусу чи солідусу можна визначити початок і кінець кристалізації будь-якого сплаву.

Криві e_1E , e_2E та e_3E – це лінії початку кристалізації подвійних евтектик: $e_1(\text{Bi} + \text{Pb})$, $e_2(\text{Pb} + \text{Sn})$ і $e_3(\text{Sn} + \text{Bi})$. Температура кристалізації потрійної евтектики $E(\text{Bi} + \text{Pb} + \text{Sn})$ дорівнює 96°C (точка E). Показано також ізотерми поверхонь ліквідусу через 25°C . Температури плавлення чистих металів дорівнюють: для Bi – 268°C , Pb – 327°C і Sn – 232°C . Тому поверхня кристалізації свинцю Pbe_1Ee_2Pb спускається більш стрімко до солідусного трикутника ніж поверхня кристалізації олова Sne_2Ee_3Sn . Олово має меншу температуру плавлення

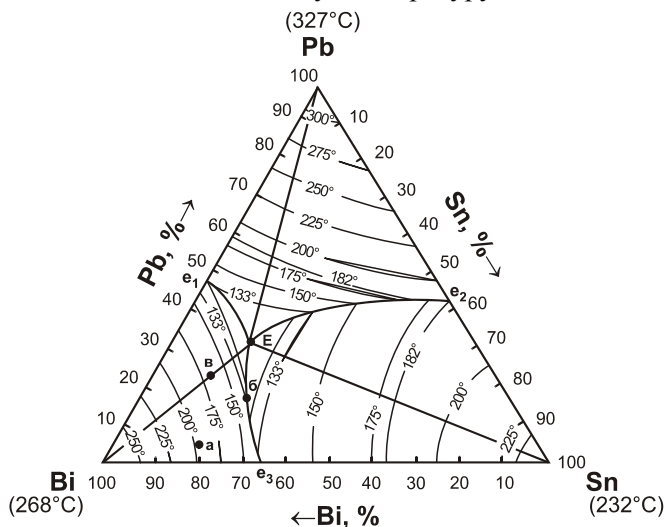


Рисунок 6.8 – Проекція ізотерм ліквідусу сплавів системи Bi-Pb-Sn

Також слід визначити, що ізотерми на поверхні ліквідусу для

свинцю розташовані густіше, ніж на відповідній поверхні для Sn.

Завдання на підготовку до лабораторної роботи

1. Стисло описати спосіб зображення діаграм стану потрійних систем.
2. Провести аналіз фазових перетворень і структури сплавів системи Bi–Pb–Sn відповідно до порядку виконання роботи.

Контрольні питання

1. Як взаємодіють між собою Bi, Pb та Sn в рідкому та твердому станах ?
2. До якого типу діаграм рівноваги слід віднести діаграму системи Bi–Pb–Sn ?
3. В яких температурних інтервалах відбувається кристалізація подвійних евтектик і точки яких ліній визначають склад рідкої фази ?
4. Описати фазові та структурні зміни в різних сплавах при кристалізації.
5. Як за допомогою правила центра ваги та правила відрізків можна проводити кількісний аналіз ?
6. На яких перерізах можна використовувати правило центра ваги та правило відрізків ?

Порядок виконання роботи

1. Побудувати проекцію ліній діаграми стану Bi–Pb–Sn (рис.6.9) на концентраційному трикутнику і знайти точки сплавів 1, 2, 3, 4 відповідно до хімічного складу кожного сплаву, наведеного у табл.6.1.

Таблиця 6.1 – Хімічний склад і структура заданих сплавів

Номер сплаву	Вміст компонентів, % (мас.)			Структура	Температура плавлення сплаву, °C
	Bi	Pb	Sn		
1	73	15	12		
2	63	8	29		
3	79	14	7		
4	52	32	16		

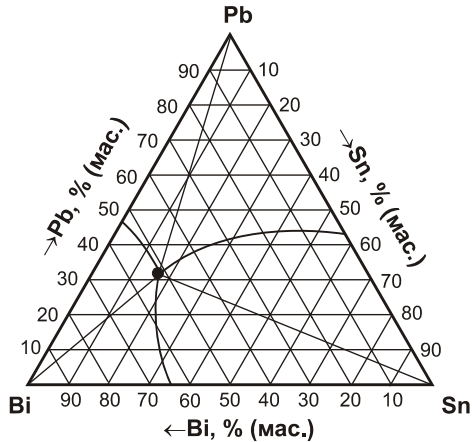


Рисунок 6.9 – Концентраційний трикутник з проєкцією ліній діаграми рівноваги сплавів системи Bi–Pb–Sn

2. Визначити і схематично зарисувати структуру сплавів, позначити структурні складові, визначити кількість кожної структурної складової.

3. Використовуючи рис.6.8 визначити температури фазових перетворень (приблизно) в заданих сплавах.

4. Побудувати криві охолодження досліджених сплавів із застосуванням правила фаз.

5. Побудувати політермічний і ізотермічний перерізи відповідно до одержаного варіанта.

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ТА ЗАВДАННЯ ДО КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ ДЛЯ СТУДЕНТІВ ЗАОЧНОГО ВІДДІЛЕННЯ

Варіант контрольної роботи видає викладач відповідно до номера за списком групи.

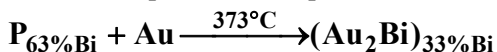
Перш ніж виконувати контрольну чи курсову роботу необхідно ретельно ознайомитись із загальними положеннями до усіх лабораторних робіт, що охоплюють значній об'єм теоретичного матеріалу, а також ознайомитись з необхідними розділами підручників [1–4, 6–8]. Слід звернути увагу на послідовність вивчення діаграм стану від простих до більш складних для кращого засвоєння матеріалу.

У першому питанні необхідно відповісти на одне із теоретичних положень дисципліни. *Друге завдання* присвячено побудові діаграми стану реальної системи. Послідовність виконання завдання полягає у наступному: намалювати у масштабі вісь температур і концентрацій. Далі необхідно провести відповідно до заданої температури перетворення горизонтальні лінії нонваріантних рівноваг. Їх розташування відносно концентраційної осі визначається хімічним складом фаз (представити точки). Відмітити точки температур плавлення компонентів і проміжних фаз та з'єднати їх із точками на лінії нонваріантної рівноваги. Записати в кожній області діаграми структурні складові та відповісти на поставлені питання.

Для ознайомлення із особливостями зображення хімічного складу потрійних сплавів *у третьому питанні* контрольної роботи запропоновано побудувати концентраційний трикутник і знайти на ньому відповідні сплави та лінію перерізу. Ця задача може бути вирішена після ознайомлення з лабораторною роботою №6.

Варіант №1

1. Побудова діаграм стану за допомогою термічного методу
2. Побудувати діаграму стану Au–Bi з обмеженою розчинністю компонентів і наявністю перитектичної рівноваги:



Фаза Au₂Bi – проміжна фаза постійного хімічного складу з ін конгруентним плавленням.

В системі є евтектичне перетворення:



Компонент, фаза	Au	Bi	Au ₂ Bi
Температура плавлення, °C	1064	271	373

Розчинність компонентів при кімнатній температурі відсутня. Пояснити причини відсутності твердих розчинів на основі Au і Bi. Визначити в яких сплавах кристалізація відбувається в інтервалі температур. Зарисувати схематично структуру сплаву 50% Bi і 50% Au, розрахувати кількість евтектики, описати фазові перетворення в цьому сплаві при охолодженні, побудувати криву охолодження за правилом фаз. Порівняти кристалізацію заданого сплаву з евтектичним сплавом.

3. Нарисувати концентраційній трикутник системи Fe–C–Cr і позначити точкою N сплав наступного хімічного складу 80%Fe, 1%С, 19%Cr. На концентраційному трикутнику системи показати лінію сплавів з постійним вмістом 13%Cr. Позначити фігуративні точки сплавів Fe–1%С та Fe–1%С–13%Cr.

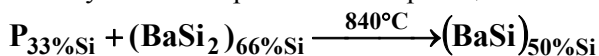
Варіант №2

1. Структура евтектичних сплавів.

2. Побудувати діаграму стану Ba–Si з обмеженою розчинністю компонентів і наявністю евтектичних рівноваг:



Фаза BaSi₂ – проміжна фаза постійного хімічного складу кристалізується із рідини. BaSi – проміжна фаза із інконгруентним плавленням. Кристалізується за перитектичною реакцією:



Компонент, фаза	Ba	Si	BaSi ₂	BaSi
Температура плавлення, °C	705	1414	1180	840

Взаємна розчинність компонентів при кімнатній температурі відсутня. Зарисувати схематично структуру сплаву 10% Ba і 90% Si, розрахувати кількість евтектики, описати фазові перетворення в цьому сплаві при охолодженні, побудувати криву охолодження за правилом фаз. Порівняти кристалізацію заданого сплаву з евтектичним сплавом.

3. Нарисувати концентраційній трикутник системи Fe–Cr–Ni і

позначити фігуративною точкою N сплав наступного хімічного складу 73%Fe, 9%Ni, 18%Cr. На концентраційному трикутнику системи показати лінію сплавів з постійним вмістом 20%Cr. Позначити точки сплавів Fe–20%Cr та Fe–15%Ni–20%Cr.

Варіант №3

1. Правило відрізків. Які відомості можна отримати за допомогою цього правила. Навести приклад.

2. В системі Al–Sb є хімічна сполука AlSb – фаза постійного хімічного складу з конгруентним плавленням

$(\text{AlSb})_{50\% \text{Sb}} \xrightarrow{1058^\circ\text{C}} \text{P}_{50\% \text{sb}}$. Є евтектичні перетворення:

$\text{P}_{0,4\% \text{Sb}} \xrightarrow{657^\circ\text{C}} \text{E}(\text{Al} + \text{AlSb})$ та $\text{P}_{98,5\% \text{Sb}} \xrightarrow{627^\circ\text{C}} \text{E}(\text{Sb} + \text{AlSb})$

Компонент, фаза	Al	Sb	AlSb
Температура плавлення, °C	660	631	1058

Розчинність компонентів при кімнатній температурі відсутня. Пояснити причини відсутності твердих розчинів на основі компонентів.

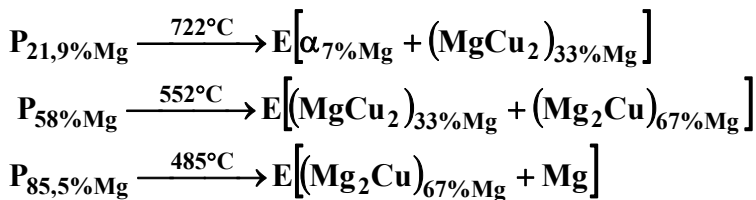
Побудувати діаграму стану Al–Sb і визначити температури повного розплавлення фази AlSb в сплавах 60% Al, 40% Sb та 20%Al, 80%Sb. В позначених сплавах розрахувати кількість евтектики, нарисувати структуру сплавів і побудувати криві охолодження за правилом фаз. Описати фазові перетворення при охолодженні.

3. Нарисувати концентраційний трикутник системи Ti–Al–Mo і позначити фігуративною точкою N сплав наступного хімічного складу 80%Ti, 5%Al, 15%Mo. На концентраційному трикутнику системи показати лінію сплавів з постійним вмістом 5%Al. Позначити точки сплавів Ti–5%Mo та Ti–5%Mo–5%Al.

Варіант №4

1. Поліморфні перетворення компонентів. Навести приклади діаграм стану.

2. В системі Cu–Mg є хімічні сполуки MgCu_2 та Mg_2Cu – фази постійного хімічного складу з конгруентним плавленням. Крім того, α -твердий розчин Mg в ГЦК гратці Cu. А також три евтектичні рівноваги:



Компонент, фаза	Cu	Mg	MgCu ₂	Mg ₂ Cu
Температура плавлення, °C	1083	650	819	568

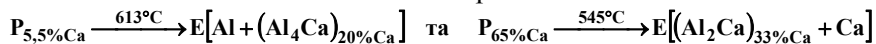
Розчинність компонентів при кімнатній температурі: в Cu розчиняється 3%Mg, Cu в гратці Mg не розчиняється.

Побудувати діаграму стану Cu–Mg і визначити температуру повного розплавлення α -фази в сплавах 21,9% Mg, решта – мідь та 15% Mg, решта – мідь. В позначених сплавах розрахувати кількість евтектики, зарисувати структуру сплавів і побудувати криві охолодження за правилом фаз. Описати фазові перетворення при охолодженні.

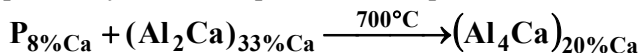
3 Нарисувати концентраційний трикутник системи Ti–Al–W і позначити фігуративною точкою N сплав наступного хімічного складу 80%Ti, 8%Al, 12%W. На концентраційному трикутнику системи показати лінію сплавів з постійним вмістом 8%Al. Позначити точки сплавів Ti–15%W та Ti–15%W–8%Al.

Варіант №5

1. Дати характеристику і класифікацію проміжним фазам.
2. Побудувати діаграму стану Al–Ca з обмеженою розчинністю компонентів і наявністю евтектичних рівноваг:



Фаза Al₂Ca – проміжна фаза постійного хімічного складу кристалізується із рідини. Al₄Ca – проміжна фаза із інконгруентним плавленням. Кристалізується за перитектичною реакцією:



Компонент, фаза	Al	Ca	Al ₄ Ca	Al ₂ Ca
Температура плавлення, °C	660	842	700	1079

Взаємна розчинність компонентів при кімнатній температурі відсутня. Зарисувати схематично структури сплавів 65% Ca і 35% Al та 45% Ca і 55% Al, розрахувати кількість евтектики, описати фазові пе-

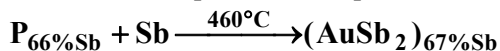
ретворення в цих сплавах при охолодженні, побудувати криві охолодження за правилом фаз. Вказати особливості первинної кристалізації цих сплавів ?

3. Нарисувати концентраційній трикутник системи Cu–Zn–Pb і позначити фігуративною точкою N сплав наступного хімічного складу 70%Cu, 20%Zn, 10%Pb. На концентраційному трикутнику системи показати лінію сплавів з постійним вмістом 6%Pb. Позначити точки сплавів Cu–9%Zn та Cu–9%Zn–6%Pb.

Варіант №6

1. Принцип побудови кривих охолодження (нагрівання) за допомогою правила фаз.

2. Побудувати діаграму стану Au–Sb з обмеженою розчинністю компонентів і наявністю перитектичної рівноваги:



Фаза AuSb₂ – проміжна фаза постійного хімічного складу з інконгруентним плавленням.

В системі є евтектичне перетворення:



α -твердий розчин Sb в ГЦК гратці Au.

Компонент, фаза	Au	Sb	AuSb ₂
Температура плавлення, °C	1064	631	460

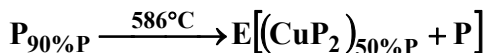
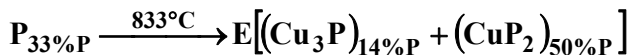
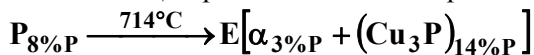
В гратці Au розчиняється 0,6%Sb при температурі 360°C, при кімнатній температурі розчинність Sb в гратці Au відсутня. Визначити в яких сплавах первинна кристалізація відбувається при постійній температурі. Зарисувати схематично структуру сплаву 20% Sb і 80% Au, розрахувати кількість евтектики, описати фазові перетворення в цьому сплаві при охолодженні, побудувати криву охолодження за правилом фаз. Порівняти кристалізацію заданого сплаву з евтектичним сплавом.

3. Нарисувати концентраційній трикутник системи Fe–C–Cr і позначити фігуративною точкою N сплав наступного хімічного складу 0,12%C, 25%Cr, Fe – решта. На концентраційному трикутнику системи показати лінію сплавів з постійним вмістом 25%Cr. Позначити точки сплавів Fe–1%C та Fe–1%C–25%Cr.

Варіант №7

1. Типи твердих розчинів заміщення і втілення. Навести приклади.

2. В системі Cu–P є хімічні сполуки Cu_3P та CuP_2 – фази постійного хімічного складу з конгруентним плавленням. Крім того, α -твердий розчин P в ГЦК гратці Cu. А також три евтектичні рівноваги:



Компонент, фаза	Cu	P	Cu_3P	CuP_2
Температура плавлення, °C	1083	589	1022	891

Розчинність Cu в гратці P при кімнатній температурі відсутня. В гратці Cu при температурі 714°C розчиняється 3%P, а при кімнатній температурі розчинність відсутня.

Побудувати діаграму стану Cu–P і визначити температуру повного розплавлення α -фази в сплавах 8% P, решта – мідь та 12% P, решта – мідь. В позначених сплавах розрахувати кількість евтектики, зарисувати структуру сплавів і побудувати криві охолодження за правилом фаз. Описати фазові перетворення при охолодженні.

3. Нарисувати концентраційний трикутник системи Ti–Al–Zr і позначити фігуративною точкою N сплав наступного хімічного складу 3%Al, 3%Zr, Ti – решта. На концентраційному трикутнику системи показати лінію сплавів з постійним вмістом 3%Zr. Позначити точки сплавів Ti–2%Al та Ti–3%Zr–2%Al.

Варіант №8

1. Дати пояснення таким термінам: компонент, фаза, ступінь свободи, структурна складова.

2. В системі Mg–Si є хімічна сполука Mg_2Si – фаза постійного хімічного складу з конгруентним плавленням. А також два евтектичних перетворення:



Компонент, фаза	Si	Mg	Mg ₂ Si
Температура плавлення, °C	1414	650	1085

Розчинність компонентів при кімнатній температурі відсутня.

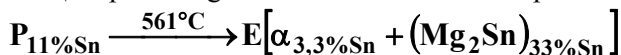
Побудувати діаграму стану Si–Mg і визначити температуру повного розплавлення фази Mg₂Si в сплавах 10% Si, решта – магній та 30% Si, решта – магній. В позначених сплавах розрахувати кількість евтектики, зарисувати структуру сплавів і побудувати криві охолодження за правилом фаз. Описати фазові перетворення при охолодженні.

3. Нарисувати концентраційний трикутник системи Ti–Al–V і позначити фігуративною точкою N сплав наступного хімічного складу 5%Al, 3%V, Ti – решта. На концентраційному трикутнику системи показати лінію сплавів з постійним вмістом 3%V. Позначити точки сплавів Ti–5%Al та Ti–3%V–5%Al.

Варіант №9

1. Накреслити і проаналізувати діаграму стану із необмеженою розчинністю компонентів в твердому стані.

2. В системі Mg–Sn є хімічна сполука Mg₂Sn – фаза постійного хімічного складу з конгруентним плавленням. Крім того, α-твердий розчин Sn в ГЦУ-гратці Mg. А також дві евтектичні рівноваги:



Компонент, фаза	Sn	Mg	Mg ₂ Sn
Температура плавлення, °C	233	650	770

Розчинність компонентів при кімнатній температурі відсутня.

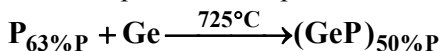
Побудувати діаграму стану Mg–Sn і визначити температуру повного розплавлення фази Mg₂Sn в сплавах 40% Sn, решта – магній та 20% Sn, решта – магній. В позначених сплавах розрахувати кількість евтектики, зарисувати структуру сплавів і побудувати криві охолодження за правилом фаз. Описати фазові перетворення при охолодженні. Первинну кристалізацію заданих сплавів порівняти з евтектичним сплавом.

3. Нарисувати концентраційній трикутник системи Fe–Cr–Ni і позначити фігуративною точкою N сплав наступного хімічного складу 78%Fe, 13%Cr, 9%Ni. На концентраційному трикутнику системи показати лінію сплавів з постійним вмістом 18%Cr. Позначити точки сплавів Fe–3%Ni та Fe–3%Ni–18%Cr.

Варіант №10

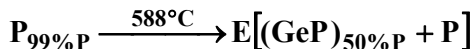
1. Накреслити і проаналізувати діаграму стану із утворенням евтектики, що складається із обмежених твердих розчинів.

2. Побудувати діаграму стану Ge–P з обмеженою розчинністю компонентів і наявністю перитектичної рівноваги:



Фаза GeP – проміжна фаза постійного хімічного складу з інконгруентним плавленням.

В системі є евтектичне перетворення:



Компонент, фаза	Ge	P	GeP
Температура плавлення, °C	938	589	725

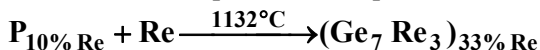
Розчинність компонентів при кімнатній температурі відсутня. Пояснити причини відсутності твердих розчинів на основі Ge і P. Визначити в яких сплавах кристалізація відбувається при температурах нижче 725°C. Зарисувати схематично структуру сплаву 70% P і 30% Ge, розрахувати кількість евтектики, описати фазові перетворення в цьому сплаві при охолодженні, побудувати криву охолодження за правилом фаз. Порівняти кристалізацію заданого сплаву із сплавом наступного хімічного складу 40%P і 60%Ge.

3. Нарисувати концентраційній трикутник системи Fe–C–Cr і позначити фігуративною точкою N сплав наступного хімічного складу 93%Fe, 2%C, 5%Cr. На концентраційному трикутнику системи показати лінію сплавів з постійним вмістом 1%C. Позначити точки сплавів Fe–1%C та Fe–1%C–18%Cr.

Варіант №11

1. Внутрішньокристалітна ліквідація в системах і спосіб її усунення.

2. Побудувати діаграму стану Ge–Re з обмеженою розчинністю компонентів і наявністю перитектичної рівноваги:



Фаза Ge_7Re_3 – проміжна фаза постійного хімічного складу з інконгруентним плавленням.

В системі є евтектичне перетворення:



Компонент, фаза	Ge	Re	Ge_7Re_3
Температура плавлення, °C	938	3180	1132

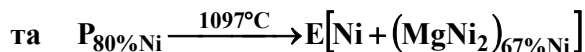
Розчинність компонентів при кімнатній температурі відсутня. Пояснити причини відсутності твердих розчинів на основі Ge і Re. Визначити в яких сплавах первинна кристалізація відбувається при постійній температурі. Зарисувати схематично структуру сплаву 5%Re і 95%Ge, розрахувати кількість евтектики, описати фазові перетворення в цьому сплаві при охолодженні, побудувати криву охолодження за правилом фаз. Порівняти кристалізацію заданого сплаву із сплавом наступного хімічного складу 20%Re і 80%Ge.

3. Нарисувати концентраційній трикутник системи Ti–Al–V і позначити фігуративною точкою N сплав наступного хімічного складу 81%Ti, 9%Al, 10%V. На концентраційному трикутнику системи показати лінію сплавів з постійним вмістом 5%V. Позначити точки сплавів Ti–5%Al та Ti–5%Al–5%V.

Варіант №12

1. Правило Курнакова. Зв'язок між типом діаграми стану та властивостями сплавів.

2. Побудувати діаграму стану Mg–Ni з обмеженою розчинністю компонентів і наявністю евтектичних рівноваг:



Фаза MgNi_2 – проміжна фаза постійного хімічного складу кристалізується з рідини. Mg_2Ni – проміжна фаза постійного хімічного складу із інконгруентним плавленням. Кристалізується за перитектичною реакцією:



Компонент, фаза	Mg	Ni	Mg ₂ Ni	MgNi ₂
Температура плавлення, °C	650	1455	760	1150

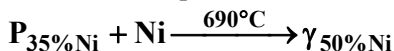
Взаємна розчинність компонентів при кімнатній температурі відсутня. Зарисувати схематично структури сплавів 18% Ni і 82% Mg та 30% Ni і 70% Mg, розрахувати кількість евтектики, описати фазові перетворення в цих сплавах при охолодженні, побудувати криві охолодження за правилом фаз. Вкажіть особливості кристалізації цих сплавів.

3. Нарисувати концентраційний трикутник системи Fe–Ni–Cr і позначити фігуративною точкою N сплав наступного хімічного складу 60%Fe, 18%Ni, 22%Cr. На концентраційному трикутнику системи показати лінію сплавів з постійним вмістом 10%Cr. Позначити точки сплавів Fe–8%Ni та Fe–8%Ni–10%Cr.

Варіант №13

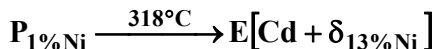
1. Як за допомогою правила відрізків визначити хімічний склад фаз та їх кількісне співвідношення за масою. Навести приклад.

2. Побудувати діаграму стану Cd–Ni з обмеженою розчинністю компонентів і перитектичними рівновагами:



Фази γ і δ – проміжні фази змінного хімічного складу з інконгруентним плавленням. Фаза γ – твердий розчин на основі хімічної сполуки CdNi, фаза δ – твердий розчин на основі хімічної сполуки Cd₅Ni. При кімнатній температурі область гомогенності δ -фази становить 12...19%Ni, γ -фази – 47...50%Ni.

В системі є евтектичне перетворення:



Компонент, фаза	Cd	Ni	δ (Cd ₅ Ni)	γ (CdNi)
Температура плавлення, °C	321	1455	495	690

Розчинність компонентів при кімнатній температурі відсутня. Пояснити причини відсутності твердих розчинів на основі Cd і Ni. Ви-

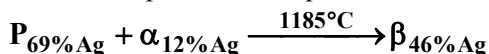
значити в яких сплавах кристалізація відбувається нижче температури 495°C. Зарисувати схематично структуру сплаву 11% Ni і 89% Cd, розрахувати кількість евтектики, описати фазові перетворення в цьому сплаві при охолодженні, побудувати криву охолодження за правилом фаз. Порівняти кристалізацію заданого сплаву із сплавом наступного складу 45%Ni і 55%Cd.

3 Нарисувати концентраційній трикутник системи Al–Zn–Mg і позначити фігуративною точкою N сплав наступного хімічного складу 80%Al, 10%Zn, 10%Mg. На концентраційному трикутнику системи показати лінію сплавів з постійним вмістом 3%Mg. Позначити точки сплавів Al–6%Zn та Al–6%Zn–3%Mg.

Варіант №14

1. Накреслити і проаналізувати діаграму стану із утворенням евтектики, що складається з майже чистих компонентів.

2. Побудувати діаграму стану Pt–Ag з обмеженою розчинністю компонентів і наявністю перитектичної рівноваги:



де, α -фаза – твердий розчин заміщення атомів Ag в ГЦК гратці Pt;
 β -фаза – твердий розчин заміщення атомів Pt в ГЦК гратці Ag.

Компонент, фаза	Pt	Ag
Температура плавлення, °C	1773	960

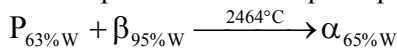
При кімнатній температурі розчинність компонентів не змінюється порівняно із температурою 1185°C.

Визначити в яких сплавах кристалізація відбувається нижче температури 1185°C. Зарисувати схематично структури сплавів 25% Ag і 75% Pt та 58%Ag і 42%Pt, розрахувати кількість α - і β -фаз при кімнатній температурі, побудувати криві охолодження за правилом фаз та описати фазові перетворення в сплавах при охолодженні. Порівняти кристалізацію цих сплавів. Як Ag впливає на температури плавлення цих сплавів ?

3. Нарисувати концентраційній трикутник системи Ti–Al–Zr і позначити фігуративною точкою N сплав наступного хімічного складу 65%Ti, 15%Al, 20%Zr. На концентраційному трикутнику системи показати лінію сплавів з постійним вмістом 10%Zr. Позначити точки сплавів Ti–7%Al та Ti–7%Al–10%Zr.

Варіант №15

1. Принцип зображення діаграм стану потрійних систем.
2. Побудувати діаграму стану Pt–W з обмеженою розчинністю компонентів і наявністю перитектичного перетворення:



В системі існують α -фаза – твердий розчин заміщення атомів W в ГЦК гратці Pt і β -фаза – твердий розчин заміщення атомів Pt в ОЦК гратці W.

Компонент, фаза	Pt	W
Температура плавлення, °C	1773	3422

При кімнатній температурі в ГЦК гратці Pt розчиняється 62%W, в ОЦК гратці W розчиняється 2%Pt. Визначити, в яких сплавах кристалізація відбувається нижче температури 2464°C.

Зарисувати схематично структури сплавів 40% W і 60% Pt та 70%W і 30%Pt, для цих сплавів розрахувати кількість та хімічний склад α - і β -фаз при кімнатній температурі, побудувати криві охолодження за правилом фаз та описати фазові перетворення в сплавах при охолодженні. Порівняти кристалізацію цих сплавів. Як W впливає на температури плавлення цих сплавів ?

3. Нарисувати концентраційній трикутник системи Al–Si–Mg і позначити фігуративною точкою N сплав наступного хімічного складу 75%Al, 15%Si, 10%Mg. На концентраційному трикутнику системи показати лінію сплавів з постійним вмістом 2%Mg. Позначити точки сплавів Al–10%Si та Al–10%Si–2%Mg.

Варіант №16

1. Спосіб зображення хімічного складу сплавів потрійних систем. Концентраційний трикутник і його властивості.

2. Побудувати діаграму стану Nb–Ti в інтервалі температур 400...2469°C. У Nb поліморфні перетворення відсутні і Nb необмежено розчиняється в гратці високотемпературної модифікації β -Ti. Титан має дві поліморфні модифікації: α -Ti (ГЦП гратка) \rightarrow β -Ti (ОЦК гратка), температура поліморфного перетворення 882°C. При температурі 400°C в α -Ti розчиняється 2%Nb, в β -Ti – 37%Nb. В ОЦК гратці Nb розчиняється 63%Ti.

Компонент, фаза	Nb	Ti
Температура плавлення, °C	2469	1670

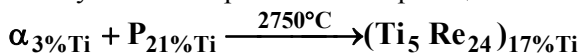
Зарисувати схематично структури сплавів 70%Ti і 30%Nb та 90%Ti і 10%Nb, розрахувати кількість α - і β -фаз та визначити вміст компонентів у фазах при температурі 400°C, описати фазові перетворення в сплавах при охолодженні, побудувати криві охолодження за правилом фаз. Вказати концентраційний інтервал сплавів системи, в яких відбуваються поліморфні перетворення.

3 Нарисувати концентраційний трикутник системи Al–Si–Cu і позначити фігуративною точкою N сплав наступного хімічного складу 65%Al, 15%Si, 20%Cu. На концентраційному трикутнику системи показати лінію сплавів з постійним вмістом 5%Cu. Позначити точки сплавів Al–5%Si та Al–5%Si–5%Cu.

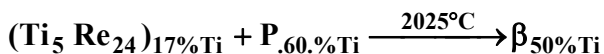
Варіант №17

1. Поняття вторинної кристалізації. Навести приклади діаграми стану систем в яких відбувається вторинна чи тритинна кристалізація фаз.

2. Побудувати діаграму стану Re–Ti в інтервалі температур 400...3186°C. Фаза Ti_5Re_{24} – проміжна фаза постійного хімічного складу, кристалізується за перитектичною реакцією:



в системі є перитектичне перетворення :



У Re поліморфні перетворення відсутні. Титан має дві поліморфні модифікації: α -Ti(ГЦП гратка) \rightarrow β -Ti (ОЦК гратка), температура поліморфного перетворення 882°C. При температурі 400°C розчинність Ti в гратці Re відсутня, в α -Ti розчиняється 3%Re, в β -Ti – 8%Re. Область гомогенності β -твердого розчину на основі β -Ti при температурі 400°C становить 57...92%Ti.

Компонент, фаза	Re	Ti	Ti_5Re_{24}
Температура плавлення, °C	3186	1670	2750

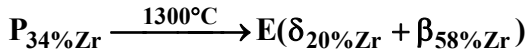
Зарисувати схематично структури сплавів 25%Ti і 75%Re та 49%Ti і 51%Re, визначити вміст компонентів в α - і β -фаз та розраху-

вати кількість фаз при температурі 400°C, побудувати криві охолодження за правилом фаз та описати фазові перетворення в сплавах при охолодженні. Вказати концентраційний інтервал сплавів системи в яких відбуваються поліморфні перетворення.

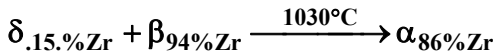
3 Нарисувати концентраційній трикутник системи Al–Zn–Cu і позначити фігуративною точкою N сплав наступного хімічного складу 70%Al, 20%Zn, 10%Cu. На концентраційному трикутнику системи показати лінію сплавів з постійним вмістом 8%Zn. Позначити точки сплавів Al–2%Cu та Al–2%Cu–8%Zn.

Варіант №18

1. Ізотермічні перерізи діаграм стану потрійних систем.
2. Побудувати діаграму стану Er–Zr. В системі є евтектичне перетворення



та перитектоїдне перетворення :



У Er поліморфні перетворення відсутні. Цирконій має дві поліморфні модифікації: α -Zr (ГЦП гратка) \rightarrow β -Zr (ОЦК гратка), температура поліморфного перетворення 863°C. Фаза δ – твердий розчин Zr в гексагональній гратці Er, фаза α – твердий розчин Er в ГЦП гратці α -Zr, фаза β – твердий розчин Er в ОЦК гратці β -Zr.

Компонент, фаза	Er	Zr
Температура плавлення, °C	1529	1855

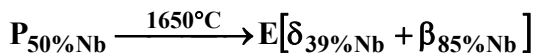
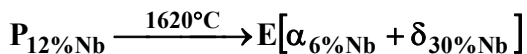
Зарисувати схематично структури сплавів 36%Zr і 64%Er та 50%Zr і 50%Er. Розрахувати кількість α - і δ -фаз, визначити вміст компонентів у фазах при кімнатній температурі, побудувати криві охолодження за правилом фаз та описати фазові перетворення в сплавах при охолодженні. Вказати концентраційний інтервал сплавів системи в яких відбуваються поліморфні перетворення

3 Нарисувати концентраційній трикутник системи Sn–Zn–Cu і позначити фігуративною точкою N сплав наступного хімічного складу 20%Sn, 20%Zn, 60%Cu. На концентраційному трикутнику системи показати лінію сплавів з постійним вмістом 9%Sn. Позначити точки сплавів Cu–6%Zn та Cu–6%Zn–9%Sn.

Варіант №19

1. Політермічні перерізи діаграм стану потрійних систем. Навести приклади.

2. В системі Cr–Nb є проміжна фаза змінного хімічного складу з конгруентним плавленням, фаза δ – твердий розчин на основі хімічної сполуки Cr_2Nb , кристалізується із рідини. Область гомогенності при кімнатній температурі 33...37%Nb. Фаза α – твердий розчин Nb в ОЦК гратці Cr. При кімнатній температурі розчинність Nb відсутня. Фаза β – твердий розчин Cr в ОЦК гратці Nb. При кімнатній температурі розчинність становить 2%Cr. Також в системі є дві евтектичні рівноваги:



Компонент, фаза	Cr	Nb	$\delta(\text{Cr}_2\text{Nb})$
Температура плавлення, °C	1863	2469	1770

Побудувати діаграму стану Cr–Nb. В сплавах 56% Nb, решта – хром та 80% Nb, решта – хром розрахувати кількість евтектики, зарисувати структуру сплавів і побудувати криві охолодження за правилом фаз. Описати фазові перетворення при охолодженні. Кристалізацію заданих сплавів порівняти з евтектичним сплавом. Також вказати сплави, що кристалізуються при постійній температурі.

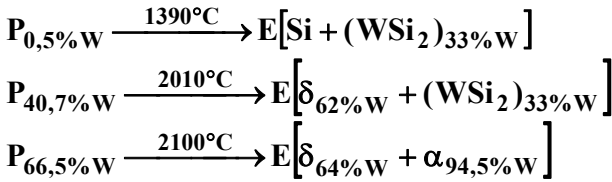
3 Нарисувати концентраційний трикутник системи Mg–Al–Zn і позначити фігуративною точкою N сплав наступного хімічного складу 70%Mg, 20%Al, 10%Zn. На концентраційному трикутнику системи показати лінію сплавів з постійним вмістом 9%Al. Позначити точки сплавів Mg–5%Zn та Mg–5%Zn–9%Al.

Варіант №20

1. Накреслити і проаналізувати діаграму стану з упорядкованим твердим розчином.

2. В системі Si–W є фази WSi_2 – проміжна фаза постійного складу з конгруентним плавленням; δ – проміжна фаза змінного складу, твердий розчин на основі хімічної сполуки W_5Si_3 , кристалізується із рідини, область гомогенності при кімнатній температурі 63...64%W; α – твердий розчин Si в ОЦК гратці W. При кімнатній те-

температурі розчинність Si в ОЦК-гратці W відсутня. Також є три евтектичні рівноваги:



Компонент, фаза	Si	W	$\delta(\text{W}_5\text{Si}_3)$	WSi_2
Температура плавлення, $^{\circ}\text{C}$	1414	3422	2320	2160

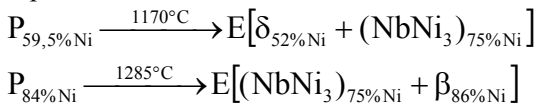
Побудувати діаграму стану Si–W. В сплавах 42% W, решта – кремній та 59% W, решта – кремній розрахувати кількість евтектики, зарисувати структуру сплавів і побудувати криві охолодження за правилом фаз. Описати фазові перетворення при охолодженні. Кристалізацію заданих сплавів порівняти з евтектичним сплавом. Також вказати сплави, що кристалізуються при постійній температурі.

3 Нарисувати концентраційний трикутник системи Mg–Zn–Zr і позначити точкою N сплав з наступним хімічним складом 70%Mg, 20%Zn, 10%Zr. На концентраційному трикутнику системи показати лінію сплавів з постійним вмістом 6%Zn. Позначити точки сплавів Mg–5%Zr та Mg–6%Zn–5%Zr.

Варіант №21

1. Накреслити і проаналізувати діаграму стану із розшаруванням твердого розчину. Поняття розпаду твердого розчину.

2. В системі Nb–Ni є фази NbNi_3 – проміжна фаза постійного складу з конгруентним плавленням; δ – проміжна фаза змінного складу, твердий розчин на основі хімічної сполуки NbNi , кристалізується за перитектичною реакцією $\alpha_{4,5\%Ni} + P_{40\%Ni} \xrightarrow{1320^{\circ}\text{C}} \delta_{37\%Ni}$, область гомогенності δ -твердого розчину при температурі 600°C становить 42...48%Ni; α – твердий розчин Ni в ОЦК гратці Nb, при температурі 600°C розчинність Ni в Nb відсутня; β – твердий розчин Nb в ГЦК гратці Ni, при температурі 600°C розчиняється 5%Nb. Також в системі є дві евтектичні рівноваги:



Компонент, фаза	Nb	Ni	$\delta(\text{NbNi})$	NbNi_3
Температура плавлення, °C	2469	1455	1320	1430

Побудувати діаграму стану Nb–Ni в інтервалі температур 600...2500°C. В сплавах 62% Ni, решта – ніобій та 74% Ni, решта – ніобій розрахувати кількість евтектики, зарисувати структуру сплавів і побудувати криві охолодження за правилом фаз. Описати фазові перетворення при охолодженні. Кристалізацію заданих сплавів порівняти з евтектичним сплавом. Також вказати сплави, що кристалізуються при постійній температурі.

3 Намалювати концентраційній трикутник системи Ti–Al–Cr і позначити фігуративною точкою N сплав наступного хімічного складу 70%Ti, 16%Al, 14%Cr. На концентраційному трикутнику системи показати лінію сплавів з постійним вмістом 6%Al. Позначити точки сплавів Ti–5%Cr та Ti–5%Cr–6%Al.

ЗАВДАННЯ НА КУРСОВУ РОБОТУ ДЛЯ СТУДЕНТІВ ЗАОЧНОЇ ФОРМИ НАВЧАННЯ І ВИМОГИ ДО ЇЇ ОФОРМЛЕННЯ

Розділ 1. Діаграма стану сплавів подвійної системи _____

1.1. Нарисувати одержану діаграму стану, в кожній області записати структурні складові, а також в квадратних дужках вказати фазовий склад, структури. Знайти лінії ліквідусу і солідусу.

1.2. Відмітити поліморфізм компонентів. В довідниковій літературі з'ясувати тип і параметри ґраток для компонентів або поліморфних модифікацій та температурні інтервали їх існування.

1.3. Описати характер взаємної розчинності компонентів та відмітити до якого типу діаграм рівноваг слід віднести дану діаграму.

1.4. Дати характеристику фазам і структурним складовим.

1.5. Визначити концентраційні інтервали сплавів, в яких спостерігаються нонваріантні рівноваги. Вказати температури і записати відповідні реакції.

1.6. Побудувати криву охолодження сплаву _____ із застосуванням правила фаз та описати фазові перетворення при охолодженні. Підрахувати кількість кожної структурної складової. Схематично зарисувати структуру цього сплаву при кімнатній температурі. Позначити структурні складові.

1.7. Для вказаної температури _____, використовуючи правило відрізків, визначити вміст компонентів у фазах та відносну кількість кожної фази у відсотках.

Розділ 2. Діаграма стану потрійної системи _____

2.1. Нарисувати політермічний переріз системи _____ з постійним вмістом _____, а також подвійну діаграму системи _____.

2.2. Показати концентраційну лінію сплавів заданого перерізу на концентраційному трикутнику системи.

2.3. Показати точки заданих сплавів _____ та _____ на концентраційному трикутнику системи.

2.4. Порівняти розглянутий переріз _____ з подвійною діаграмою системи _____ і вказати вплив _____ на наступні фактори:

2.4.1. Зміну температурного інтервалу кристалізації в сплавах

_____ та _____.

2.4.2. Визначити появу нових фаз у сплавах потрібної системи і температурні інтервали їх існування.

2.4.3. Знайти максимальну розчинність вуглецю в аустеніті та фериті в межах областей їх існування.

2.4.4. Вказати температурні та концентраційні інтервали, в яких відбуваються перитектичне, евтектичне та евтектоїдне перетворення.

2.4.5. Описати вплив _____ на температури поліморфного перетворення і пояснити стабілізацію якої фази (аустеніту чи фериту) сприяє даний легувальний елемент.

Вимоги до оформлення курсової роботи

Пояснювальна записка (*ПЗ*) складається з наступних структурних частин:

- вступна (титульний лист, завдання, реферат, зміст, перелік умовних позначень і скорочень);
- основна (вступ, розділи пояснювальної записки відповідно до завдання, висновки, перелік посилань).

Усі зазначені структурні елементи є обов'язковими.

При написанні *ПЗ* необхідно дотримуватись СТП15-96 «Пояснювальні записки до курсових та дипломних проектів (робіт)». ЗДТУ, 1996. – 29 с [5].

ПЗ оформлюють на аркушах формату А4 (210*297 мм), допускається формат А3 (297*420 мм). Поля: верхнє, ліве і нижнє – не менше 20 мм, праве – 10 мм. Абзацний відступ становить 15 мм. Заголовки розділів розташовують посередині рядка без крапки в кінці (не підкреслювати), перенесення слів не допускається; відстань між заголовком і текстом – 16 мм.

Реферат, зміст, перелік умовних скорочень, вступ, розділи основної частини, висновки, перелік посилань розташовують з нового аркуша. Нумерують сторінки арабськими цифрами, проставляючи в правому верхньому куті без крапки. Рахують сторінки з титульного листа, але номер ставлять починаючи з основної частини (вступ і т. ін.).

Реферат починається рядком з кількісними характеристиками роботи – *ПЗ*: 26 с., 9 рис., 8 джерел.

Реферат призначений для ознайомлення з *ПЗ*. Він має бути стислим, інформативним і повинен мати таку інформацію: об'єкт дослідження, мета роботи, методи дослідження, основні результати та висновки. Після тексту реферату розміщують ключові слова (до 10...15 слів великими літерами в рядок через коми).

У *вступі* основної частини викладають оцінку сучасного стану

проблеми, актуальність роботи.

Рисунки, графіки, схеми розміщують безпосередньо після тексту, де вони згадуються вперше, або на наступній сторінці, нумерують в межах розділу: 1.1, 1.2 або 2.1, 2.2.

Висновки розміщують з нової сторінки. У висновках наводять оцінку одержаних результатів роботи, наукову значимість роботи. Текст висновку може поділятися на пункти.

ЛІТЕРАТУРА

Основна література

1. Захаров А.И. Диаграммы состояния двойных и тройных систем. Учебное пособие для вузов / А.И. Захаров. – М.: Металлургия, 1990. – 240 с.
2. Бялік О.М. Металознавство: Підручник / О.М. Бялік, В.С. Черненко, В.М. Писаренко, Ю.М. Москаленко. – К.: «Політехніка» ІВЦ, 2001. – 375 с.
3. Щеглова І.С. Розчини та фазові рівноваги: Навчальний посібник / І.С. Щеглова, С.М. Масленко. – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2006. – 68 с.
4. Барчій І.Є. Гетерогенні рівноваги / І.Є. Барчій, Є.Ю. Переш, В.М. Різак, В.О. Худолій. – Ужгород: ВАТ «Видавництво Закарпаття», 2003. – 213 с.
5. СТП15-96 «Пояснювальні записки до курсових та дипломних проектів (робіт)». ЗДТУ, 1996. – 29 с.

Додаткова література

6. Лившиц Б.Г. Металлография / Б.Г. Лившиц – М.: Металлургия, 1990. – 236 с.
7. Лахтин Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов / Ю.М. Лахтин – М.: Металлургия, 1983. – 359 с.
8. Гуляев А.П. Металловедение / А.П. Гуляев. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.

Додаток А

Кристалічні структури металів і неметалів

Елемент	Символ	Температура плавлення (t), °C	Модифікація	Тип ґратки	Періоди комірки, нм		Густина (ρ), г/см ³	Твердість НВ, МПа
					a	c		
Срібло	Ag	960,8	-	ГЦК	0,40853	-	10,5	250
Алюміній	Al	660,2	-	ГЦК	0,40488	-	2,7	170
Миш'як (металевий)	As	818	-	Ромбоедрична (тригональна сингонія)	0,37598	1,05475	5,73	1470
Золото	Au	1063,4	-	ГЦК	0,40789	-	19,28	180
Барій	Ba	729	-	ОЦК	0,501	-	3,76	42
Бор	B	2075,85	-	тригональна	1,017	-	2,34	HV 42...49 (ГПа)
Берилій	Be	1289	β (>1254°C)	ОЦК	0,2549	-	-	-
			α (<1254°C)	ГЦП	0,22858	0,35843	1,85	1100
Вісмут	Bi	271,3	-	Ромбоедрична (тригональна сингонія)	0,45460	1,1862	9,8	93
Вуглець	C	3845...3890 (при тиску від 1 до 0,9 атм.)	графіт	гексагональна	0,2464	0,6711	2,27	1 (шкала Мооса)
		3700...4000°C (при тиску 11 ГПа). На повітрі алмаз згорає при 850...1000 °C	алмаз	кубічна	0,35669	-	3,52	10 (шкала Мооса)
Кальцій	Ca	1487	-	ОЦК	0,558	-	1,55	137
Кадмій	Cd	320,9	-	ГПУ	0,29787	0,56166	8,65	160
Кобальт	Co	1495	β (>420°C)	ГЦК	0,3554	-	8,7	-
			α (<420°C)	ГПУ	0,25071	0,40695	8,9	1320
Хром	Cr	1875	-	ОЦК	0,2884	-	7,2	700...900

Елемент	Символ	Температура плавлення (t), °C	Модифікація	Тип ґратки	Періоди комірки, нм		Густина (ρ), г/см ³	Твердість НВ, МПа
Церій	Ce	798	δ (>710°C)	ОЦК	0,412			
			γ (<75°C)	ГЦК	0,516	-		
			β (> -130°C)	ГЦП	0,3673	0,11802	6,76	412
			α (< -130°C)	ГЦК	0,485	-		
Цезій	Cs	28,5	-	ОЦК	0,6050	-	1,9	0,15
Мідь	Cu	1083	-	ГЦК	0,36148	-	8,94	350
Залізо	Fe	1539	δ (>1392°C)	ОЦК	0,2950	-		
			γ (>911°C)	ГЦК	0,3656	-		
			α (<911°C)	ОЦК	0,28665	-	7,86	350...450
Галій	Ga	29,8	-	ромбічна	a=0,45197, b=0,76633	0,4526	5,93	60
Германій	Ge	958,5	-	кубічна	0,5658	-	5,33	190
Гафній	Hf	2230	β (>1740°C)	ОЦК	0,3500	-		
			α (<1740°C)	ГЦП	0,3198	0,5061	13,3	1700
Гольмій	Ho	1474	β (>1427°C)	ОЦК	0,3960	-		
			α (<1427°C)	ГЦП	0,3580	0,5621	8,795	746
Індій	In	156,2	-	Тетрагональна гранецентрована	0,32512	0,49467	7,36	8,83
Іридій	Ir	2410	-	ГЦК	0,38390	-	22,4	1670
Калій	K	63,6	-	ОЦК	0,53298	-	0,862	0,4
Лантан	La	921	γ (>865°C)	ОЦК	0,426	-		
			β (>310°C)	ГЦК	0,5304	-		
			α (<310°C)	ГЦП	0,375	0,60713	6,15	363
Літій	Li	179	β (> -195°C)	ОЦК	0,351	-	0,534	5
			α (< -195°C)	ГЦП	0,3086	0,6823		
Лютецій	Lu	1663	-	ГЦП	0,351	0,5563	9,84	893
Магній	Mg	650	-	ГЦП	0,32089	0,51998	1,74	300

Елемент	Символ	Температура плавлення (t), °С	Модифікація	Тип ґратки	Періоди комірки, нм		Густина (ρ), г/см ³	Твердість НВ, МПа
Марганець	Mn	1244	δ (>1095°C)	ОЦК	0,3080	-		
			γ (< 1095°C)	ГЦК	0,3862	-		
			β (>727°C)	кубічна	0,6313	-		
			α (< 727°C)	кубічна	0,89139	-	7,46	196
Молібден	Mo	2610	-	ОЦК	0,31470	-	10,2	1500
Натрій	Na	97,8	-	ОЦК	0,4291	-	0,968	0,69
Ніобій	Nb	2468	-	ОЦК	0,33002		8,58	250
Неодим	Nd	1024	β (>885°C)	кубічна				
			α (< 885°C)	ГЦП	0,366	0,59072	7,007	265
Нікель	Ni	1455	-	ГЦК	0,35232	-	8,9	700
Осмій	Os	3050	-	ГЦП	0,27353	0,43191	22,5	3920
Свинець	Pb	327,4	-	ГЦК	0,49507	-	11,34	38...42
Паладій	Pd	1552	-	ГЦК	0,38874	-	11,97	490
Празеодим	Pr	931	-	ГЦП	0,3670	1,1817	6,77	481
Платина	Pt	1769	-	ГЦК	0,39242	-	21,45	470
Рубідій	Rb	39,2	-	ОЦК	0,559	-	1,532	0,22
Реній	Re	3440	-	ГЦП	0,27609	0,44576	21,03	2500
Родій	Rh	1960	-	ГЦК	0,38034	-	12,42	1010
Рутеній	Ru	2450	-	ГЦП	0,2700	0,4275	12,45	2200
Сурма	Sb	630,5	-	Ромбодрична (тригональна сингонія)	0,451	-	6,7	384
Скандій	Sc	1539	β (>1350°C)	ОЦК				
			α (< 1350°C)	ГЦП	0,3308	0,5267	3,02	750
Кремній	Si	1440	-	Кубічна (типу алмазу)	0,54286	-	2,33	2400
Олово	Sn	232	β (>13°C)	тетрагональна	0,58315	0,31814	7,29	42...52
			α (< 13°C)	Кубічна (типу алмазу)	0,6491			
Стронцій	Sr	771	-	ГЦК	0,608	-	2,63	130
Тантал	Ta	2996	-	ОЦК	0,33025	-	16,6	400

Елемент	Символ	Температура плавлення (t), °C	Модифікація	Тип ґратки	Періоди комірки, нм		Густина (ρ), г/см ³	Твердість НВ, МПа
Тербій	Tb	1356	β (>1302°C)	ОЦК	0,402	-		
			α (< 1302°C)	ГЦП	0,3605	0,5697	8,229	677
Телур	Te	449,5	-	ГЦП	0,445	0,59185	6,25	180...270
Торій	Th	1827	β (>1360°C)	ОЦК				
			α (< 1360°C)	ГЦК	0,508	-	11,7	400
Титан	Ti	1668	β (>882,5°C)	ОЦК	0,3606			
			α (<882,5°C)	ГЦП	0,29508	0,46855	4,54	716
Уран	U	1150	γ (>775°C)	ОЦК				
			β (>662°C)	тетрагональна	0,1075	0,5656		
			α (<662°C)	ромбічна	a=0,28537; b=0,58695	0,49548	19,3	4770
Ванадій	V	1900	-	ОЦК	0,30271	-	6,11	700
Вольфрам	W	3410	-	ОЦК	0,31652	-	19,35	2570...3000
Ітрій	Y	1525	β (>662°C)	ОЦК	0,4111	-		
			α (<662°C)	ГЦП	0,365	0,5734	4,472	589
Ітербій	Yb	824	γ (>797°C)	ОЦК	0,444	-		
			β (>-13°C)	ГЦК	0,5486	-	6,97	343
			α (< -13°C)	ГЦП	0,3883	0,6328		
Цинк	Zn	419,5	-	ГЦП	0,26646	0,49461	7,133	300...400
Цирконій	Zr	1930	β (>862°C)	ОЦК	0,5143	-		
			α (< 862°C)	ГЦП	0,3232	0,5147	6,52	640...670