

1.3. Манометри, що вимірюють низький тиск

Залежно від ступеня розрідження газу стан вакууму вимірюється вакуумметрами (манометрами) різних типів. Для вимірювання тиску від сотень міліметрів до десятих часток міліметра ртутного стовпчика застосовуються зразкові вакуумметри. Стрілка зразкового вакуумметра вказує на нульову відмітку при вимірюванні тиску, що дорівнює атмосферному, при зниженні тиску стрілка рухається уздовж кругової шкали, показуючи тиск у з'єднаному з вакуумметром об'ємі.

Вакуум 10^{-1} ÷ 10^{-3} мм рт. ст. вимірюється за допомогою термопарного манометра. Основною його частиною є манометрична лампа (ЛМ), що з'єднується з балоном, у якому вимірюється тиск газу. Функціонування ЛМ заснована на тому, що температура нитки нагрівача, поміщеного до манометричної лампи, при достатньому розрідженні газу залежить від тиску. Це обумовлено тим, що якщо довжина вільного пробігу молекул є більшою за розміри лампи, то коефіцієнт теплопровідності газу зменшується зі зниженням тиску. Температура нитки нагрівача реєструється за допомогою термопари, яку також поміщено усередину манометричної лампи та приєднано до мілівольтметра.

1.4. Вакуумметр ВІТ-2 (призначення та правила роботи)

Іонізаційно-термопарний вакуумметр ВІТ-2 являє собою комбіновану вимірювальну установку, що складається з іонізаційного манометра ЛМ-2, термопарного манометра ЛТ-2, електронної вимірювальної схеми та схеми для електроживлення нагрівача термопари і приладу, що вимірює електрорушійну силу (ЕРС) чи струм розжарення нагрівача термопари.

Загальний діапазон тисків, вимірюваних вакуумметром, становить 10^{-1} ÷ 10^{-7} мм рт. ст. При цьому тиск у межах 10^{-1} ÷ 10^{-3} мм рт. ст. вимірюють термопарним манометром (див. рис. 3.22), а у діапазоні тисків 10^{-3} ÷ 10^{-7} мм рт. ст. – іонізаційним манометром (але у даній роботі він не використовується, бо таких низьких тисків форвакуумний насос не забезпечує).

Термопарний манометр розрахований на роботу з термопарною лампою (ЛТ-2) без прямого відліку по шкалі приладу. Відлік термо-ЕРС виконується по шкалі, що має 100

поділів, а потім ці дані переводяться в одиниці вимірювання тиску (мм рт. ст.).

1.4.1. Підготовка приладу до роботи і вимірювання тиску

Перед увімкненням вакуумметра необхідно переконатися, що розжарення іонізаційного манометра ЛМ-2 вимкнено, а вимикач із написом «розжарення ЛМ-2» поставлений у нижнє положення.

1.4.2. Вимикання приладу ВІТ-2

Вимкнути термопарний манометр. Тумблер «струм розжарення – вимірювання» поставити в положення «струм розжарення», а тумблер «термовакuum» – у нижнє положення. Тумблером «мережа 220 В» вимкнути електроживлення приладу ВІТ-2.

1.5. Вакуумметр термопарний

1. Перевірка на працездатність. Поставити реостат «Регулювання струму розжарення» у крайнє ліве положення. Увімкнути перемикач «струм розжарення». Увімкнути штепсель до мережі з напругою 220 В. Увімкнути тумблери «термовакuum-метр» та «мережа 220 В», при цьому ліворуч на панелі має засвітитися лампочка. Установити заданий струм розжарення, поставити тумблер «струм розжарення – вимірювання» у положення «струм розжарення». Перевести тумблер у положення «вимірювання». Якщо при цьому стрілка приладу повертається у нульове положення, то і вакуумметр, і термопара є працездатними.

2. Вимірювання тиску. Тумблер «струм розжарення – вимірювання» поставити в положення «струм розжарення» і за допомогою реостата «Регулювання струму розжарення» встановити струм розжарення по нижній шкалі приладу. Струм розжарення зазначений на панелі приладу. Потім тумблер «струм розжарення – вимірювання» поставити в положення «вимірювання» і по середній шкалі приладу визначити термо-ЕРС лампи ЛТ-2 у поділках шкали. Відлік у поділках перевести у відлік в одиницях вимірювання тиску за допомогою калібрувальної кривої термопари ЛТ-2, яку додано до приладу.

2. Опис лабораторної установки

Вакуумна установка, яку використовують у цій роботі, являє собою металевий балон (див. рис. 3.19). Розрідження у ній створюється форвакуумним насосом, який приєднано до неї гнучким вакуумним шлангом (вакуум-проводом).

Вакуум-провід має патрубковий напуск повітря до атмосферного тиску при вимиканні насоса. В установці використовується зразковий манометр, за допомогою якого контролюється час зменшення тиску у відкачуваному об'ємі від атмосферного тиску до одиниць мм рт. ст., та термопарний вакуумметр із лампою термопарного датчика тиску для вимірювання тиску від 10^{-1} мм рт. ст. до 10^{-4} мм рт. ст.

Схему термопарного манометра приведено на рис. 3.22, де вказано також і принципову схему електричного живлення цього приладу.

3. Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з вакуумною установкою та приладами для одержання та вимірювання вакууму.

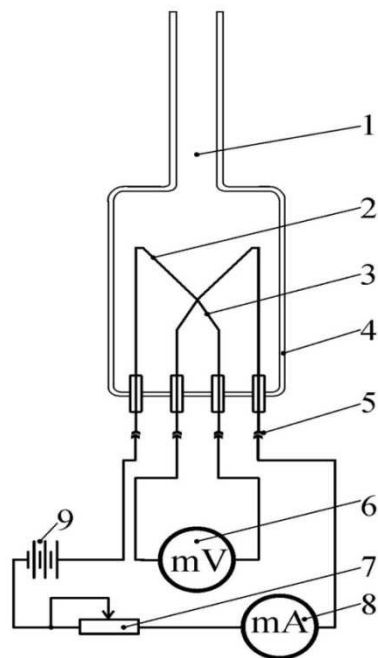


Рис. 3.22. Термопарний манометр.
Цифрами позначено: 1 – балонна рурка, 2 – нагрівач, 3 – термопара, 4 – скляний балон, 5 – контакт для відведення електричного струму, 6 – мілівольтметр, 7 – резистор змінної величини, 8 – міліамперметр, 9 – джерело електричного струму

2. Користуючись описом установки, розібратися практично в будові вакуумної установки.

3. Вивчити правила роботи з вакуумметром ВІТ-2, засвоїти порядок вмикання термопарного вакуумметра.

Увага! Іонізаційним вакуумметром у цій роботі не користуються, бо форвакуумний насос не досягає потрібних значень тиску газу в балоні.

3.1. Правила роботи з форвакуумним насосом

1. Перед початком роботи перевірити вихідний стан установки та вакуумної арматури (вакуум-провід, клапани). Клапани 1 та 2 мають бути закритими (див. рис. 3.19)

2. Увімкнути форвакуумний насос та, зачекавши приблизно $10 \div 15$ секунд, відкрити клапан 1.

3. Зняти залежність тиску в установці від часу роботи насоса з моменту підключення його до установки, використовуючи зразковий манометр. Спочатку тиск падає дуже швидко, тому зняття показів варто робити якнайчастіше. Коли залишковий тиск досягне $1 \div 2$ мм рт. ст., увімкнути термопарний манометр відповідно до опису.

4. Проміжки часу між вимірюваннями тиску обирають так, щоб фіксувати приблизно однакові зміни тиску. Тому при швидкій зміні тиску покази манометра знімають частіше, при малих змінах проміжки часу (між зняттям показів манометра) збільшують.

5. Відкачку газу з балону слід робити до граничної межі спроможності створювати більш високий ступінь вакууму форвакуумним насосом, тобто доки тиск не перестане змінюватися.

6. Здобуті результати оформити у вигляді таблиці.

7. Побудувати графік залежності тиску в установці від часу відкачки, відклавши по осі ординат десятковий логарифм тиску, а по осі абсцис – час.

8. Визначити швидкість відкачки вакуумної системи за допомогою наданого насоса.

3.2. Вимикання установки та вимірювання натікання газу до вакуумного балону

1. При вимиканні установки необхідно перекрити вакуум-провід за допомогою клапана 1, вимкнути форвакуумний насос. А вже тільки після цього можна відкрити клапан 2, щоб тиск усмоктувального пацівка форвакуумного насоса зрівнявся з атмосферним.
2. Зрозуміло, що припинення роботи форвакуумного насоса призводить до того, що атмосферне повітря під дією перепаду тиску всередині вакуумної системи та поза її межами намагається потрапити до системи крізь будь-які мікроскопічні отвори, що існують у системі. Зафіксувати залежність зміни тиску у вакуумному об'ємі від часу внаслідок натікання газу до балона з атмосфери.
3. Побудувати графік зміни тиску залежно від часу, що ілюструє процес натікання повітря до відкачуваного балона.
4. Відкрити клапан 1, напустити атмосферне повітря до вакуумного балона, після чого закрити обидва клапани 2 та 1, повернувши установку до початкового стану.

Контрольні питання

1. Які існують способи одержання форвакууму?
2. Опишіть основні елементи вакуумної установки.
3. Опишіть принцип дії різних вакуумметрів.
4. Які типи вакуумметрів використовуються для вимірювання низьких тисків? Які межі вимірюваних цими приладами тисків?
5. Які властивості газу і як змінюються при зниженні його тиску?
6. Яким процесом моделюється створення форвакууму в установці?
7. Як залежать коефіцієнти перенесення газу від його тиску?

3.10. Лабораторна робота «Визначення питомої теплоти пароутворення води»

Мета роботи:

1. Визначити водяний еквівалент калориметра.
2. Визначити питому теплоту пароутворення води.

Обладнання: калориметр, який являє собою циліндричну ємність, яка зверху щільно закривається кришкою. Всередині цієї калориметричної ємності є спеціальна опора, куди можна поставити ємність з водою для проведення дослідів. Система нагрівання води у калориметрі, система перемішування води у калориметрі, термометр. Окрема ємність для нагрівання води з внутрішнім ізолюваним нагрівачем, дефлегматор.

1. Короткі теоретичні відомості

Питому теплоту пароутворення λ можна визначити за кількістю теплоти Q_1 , що виділяється при конденсації пари маси m :

$$\lambda = Q_1 / m . \quad (3.98)$$

У даній роботі визначення величини Q_1 побудовано на застосуванні рівняння теплового балансу до процесу конденсації пари, яка утворюється з киплячої води, при пропусканні цієї пари крізь калориметр із холодною водою. Отже, у цьому випадку рівняння теплового балансу має вигляд:

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4 , \quad (3.99)$$

де Q_2 – це кількість тепла, яку виділена масою m водяного конденсату при його охолодженні від температури кипіння T до температури рівноваги θ ; Q_3 та Q_4 – це, відповідно, кількості тепла, які отримуються холодною водою в калориметрі та самим калориметром разом із обладнанням (нагрівач, мішалка тощо), що розміщено в ньому.

Якщо ввести наступні позначення: M – це маса води у калориметрі, C – це питома теплоємність води, T_0 – це початкова температура води в калориметрі, q – це водяний еквівалент калориметра, то формула (3.99) набуває вигляду:

$$\lambda m + (T - \theta) m C = MC(\theta - T_0) + q(\theta - T_0). \quad (3.100)$$

З рівняння (3.100) можна знайти величину питомої теплоти пароутворення:

$$\lambda = (MC + q)(\theta - T_0) / m - C(T - \theta). \quad (3.101)$$

Водяний еквівалент калориметра q визначається методом електричного нагрівання води у калориметрі. При проходженні струму I крізь нагрівач при різниці потенціалів U за час τ виділяється певна кількість Джоулевого тепла, що йде на нагрівання води масою M у калориметрі та самого калориметра від початкової температури T_1 до кінцевої T_2 .

Для цієї кількості тепла можна записати наступне рівняння теплового балансу:

$$UI\tau = (MC + q)(T_2 - T_1). \quad (3.102)$$

У такий спосіб визначається величина водяного еквіваленту калориметра, що характеризує втрати тепла, які мають місце у калориметрі при обраному способі нагрівання води, яка міститься в цьому калориметрі:

$$q = UI\tau / (T_2 - T_1) - MC. \quad (3.103)$$

2. Опис лабораторної установки

У роботі використовується калориметр 11 із органічного скла, до якого можна поставити склянку води місткістю близько 700 дм³ (див. рис. 3.23). Кришка калориметра – це плексигласовий диск товщиною 6 мм із трьома отворами, закритими гумовими корками.

Крізь перший корок до калориметра 10 вводиться термометр 8. Другий отвір призначено для введення до води, що

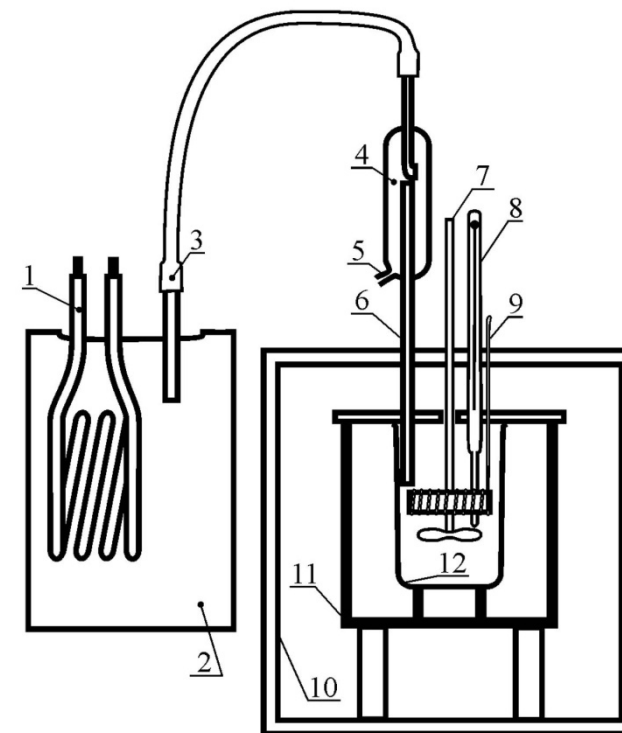


Рис. 3.23. Схема лабораторної установки для визначення теплоти пароутворення води

міститься в стакані 12, вихідної трубки 6 дефлегматора 4, який пропускає тільки водяну пару. Товста гумова трубка 3 з'єднує дефлегматор із кип'ятильником 1, що занурено у воду 2, а сам дефлегматор має ще спеціальну трубку 5, яку забезпечено затискувачем Гофмана, яка служить для зливання зайвої води, яка конденсується на стінках дефлегматора.

Третій отвір до калориметра розташований по центру кришки, він призначений для уведення до склянки з водою гвинта 7 для перемішування води. Це потрібно для примусового пришвидшення процесу вирівнювання температури води по всьому об'єму, оскільки власні конвективні процеси у воді (не говорячи вже про процес теплопередачі) є повільними.

Нагрівач 9 води закріплено на внутрішній кришці калориметра. Він складається з двох товстих мідних дротів, до яких припаяно спіраль зі сплаву хрому та нікелю, яку для стійкості конструкції намотано на пластмасове кільце. Електрична схема складається з джерела живлення, яке забезпечує подачу сталої напруги до нагрівача, вольтметра та амперметра, які контролюють величини напруги, що падає на нагрівачеві, та струму, що протікає крізь нагрівач, відповідно.

3. Порядок виконання роботи

1. Зібрати електричну схему для визначення водяного еквівалента калориметра.
2. Визначити масу води у склянці, яку будуть ставити до калориметра. Для цього спочатку визначають шляхом зважування на технічних терезах маси M_1 цієї склянки.
3. До склянки калориметра залити воду в кількості, що забезпечує занурення нагрівача та термометра на достатню глибину до цієї води (щоби вони діставали до нижньої третини наливої води. На терезах визначити масу склянки з водою M_2 . Різниця мас M_2 та M_1 дає масу води:

$$M = M_2 - M_1. \quad (3.104)$$

4. Склянку з водою поставити до калориметра, закрити обидві кришки, вставити термометр для вимірювання температури води. Отвір для трубки дефлегматора закрити ватою або віхтиком.
5. Калориметр привести до робочого стану: перевірити електромережу нагрівача, здатність гвинта електричної мішалки вільно обертатися біля дна склянки з водою.
6. Визначити початкову температуру T_1 води. Для цього одночасно увімкнути ключ подачі напруги нагрівача, секундомір та подати напругу на електричну мішалку води.
7. Перемішування води триває протягом усього процесу нагрівання, його припиняють лише після того, як установиться кінцева температура T_2 .

8. У процесі нагрівання кілька разів контролювати незмінність показів амперметра та вольтметра. Коли температура води в калориметрі перевищить кімнатну температуру на таку кількість градусів, наскільки початкова температура була нижче кімнатної, тоді вимкнути електричний ланцюг нагрівача та одночасно із цим зупинити секундомір.

9. Визначити час роботи нагрівача τ .
10. За формулою (3.103) обчислити водяний еквівалент q калориметра.
11. Увімкнути нагрівач окремої ємності з водою, що має власну кришку, до якої підходить товста гумова трубка дефлегматора.
12. Зняти термометр із калориметра, а також кришки калориметра, а теплу воду зі склянки вилити геть.
13. Калориметр знову заповнити свіжою водою в кількості приблизно 500 г і зважити на технічних терезах. Визначити нову масу калориметра з водою M_2 . Тоді за формулою (3.104) визначити масу нової води M . Калориметр знову привести до робочого стану.
14. Коли із товстої трубки, з'єднаної з окремою ємністю, де гріється вода, почнеться інтенсивне виділення пари, визначити початкову температуру води в калориметрі, з дефлегматора злити зайву воду, що конденсувалася на його стінках. Іншу трубку дефлегматора вставити до калориметра, і у той самий момент часу привести у дію мішалку.
15. Коли температура води в калориметрі перевищить кімнатну настільки, наскільки початкова була нижче неї, швидко витягнути трубку дефлегматора з калориметра. Отвір у кришці калориметра зачинити та почати пильно слідкувати за показами термометра. Дію мішалки припинити після того, коли буде досягнуто максимальної температури θ , яку вимірюють термометром.
16. Повторним зважуванням калориметра визначити його масу M_3 та обчислюють масу пари, що сконденсувалася:

$$m = M_3 - M_2. \quad (3.105)$$

17. Лабораторним барометром вимірюють атмосферний тиск, по таблицях визначають відповідну температуру кипіння води.

18. За формулою (3.101) визначають питому теплоту пароутворення води за визначеної температури кипіння.

19. Порахувати значення абсолютної похибки визначення питомої теплоти пароутворення води відповідно до формули (3.101).

20. Визначити водяний еквівалент калориметра, порівняти його величину з величиною добутку маси води на її питому теплоємність.

Контрольні питання

1. Що таке питома теплота пароутворення?
2. Для чого необхідне визначення водяного еквівалента калориметра? Чому дорівнював би мідний еквівалент калориметра?
3. Де можна використати таку чудову властивість води, як велика питома теплота пароутворення?
4. До якого роду фазових перетворень належить процес пароутворення? Які ще цікаві властивості води ви знаєте?
5. До якого роду фазових перетворень належить процес конденсації води?
6. Що таке калориметр, яка його будова, основні елементи?
7. Який процес називається теплообміном, назвіть його приклади з даної роботи.

3.11. Лабораторна робота «Визначення питомої теплоти плавлення олова та побудова діаграми стану олово–свинець»

Мета роботи:

1. Визначити питому теплоту плавлення олова.
2. Ознайомитися з особливостями плавлення сплавів металів.

Обладнання: набір тиглів із оловом, свинцем та різними їхніми сплавами, набір терморпар та мілівольтметр для визначення температури металів, піч електрична.

1. Короткі теоретичні відомості

Метод визначення питомої теплоти плавлення олова, що його використовують у даній роботі, базується на тій обставині, що швидкість виділення теплоти кристалізації металу має дорівнювати швидкості тепловіддачі в навколишнє середовище:

$$mq/t = \Delta Q / \Delta t, \quad (3.106)$$

де q – це питома теплота плавлення, m – це маса металу, t – це тривалість процесу кристалізації, $\Delta Q / \Delta t$ – це швидкість теплопередачі. З формули (3.106) для питомої теплоти плавлення маємо наступний аналітичний вираз:

$$q = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \cdot \frac{t}{m}. \quad (3.107)$$

Оскільки в процесі кристалізації температура чистого металу з часом не змінюється, то швидкість теплопередачі в цей період часу не можна виміряти безпосередньо наявним у лабораторії обладнанням. Але за інших незмінних умов швидкість теплопередачі залежить тільки від різниці температур між нагрітим тілом та навколишнім середовищем. Тому середнє значення швидкості охолодження розплавленого чистого металу до моменту початку процесу кристалізації та після завершення кристалізації буде приблизно дорівнювати швидкості теплопередачі в період його затвердіння. Скориставшись цим, можемо написати:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{1}{2} \left[(MC_M + mc_{m1}) \frac{dT_1}{dt_1} + (MC_M + mc_{m2}) \frac{dT_2}{dt_2} \right]. \quad (3.108)$$

У формулі (3.108) M – це маса тигля; C_M – питома теплоємність тигля; c_{m1} та c_{m2} – це питомі теплоємності рідкого та твердого чистого металу відповідно; dT_1/dt_1 та dT_2/dt_2 – це швидкості охолодження чистих металів перед та після затвердіння. В нашому випадку тиглі – це стандартний посуд, який виготовлено зі спеціальної криці, бо температура плавлення і свинцю, і олова є відносно низькою. Для плавлення більш

тугоплавких металів тиглі виготовляють з міцної кераміки. Значення теплосмностей металів наведено у наступному Розділі 4 цього посібника.

Плавлення та кристалізація термодинамічних систем є фазовим переходом першого роду, тому ці процеси у випадку чистих речовин характеризуються певною сталою температурою, що притаманна даній речовині.

На противагу чистим речовинам багатокомпонентні суміші кристалізуються не за однієї температури, а у певному інтервалі температур. Тому процеси плавлення та кристалізації різних сплавів, що мають різні парціальні значення концентрацій його складових, характеризується різними (але фіксованими значеннями, які однозначно відповідають різним сплавам) величинами температури початку та кінця кристалізації та плавлення. Значення температур, які визначають початок та завершення процесу фазового переходу першого роду багатокомпонентної суміші (включно з випадком двокомпонентної суміші) сильно залежать від властивостей тих складових, які входять до конкретного сплаву.

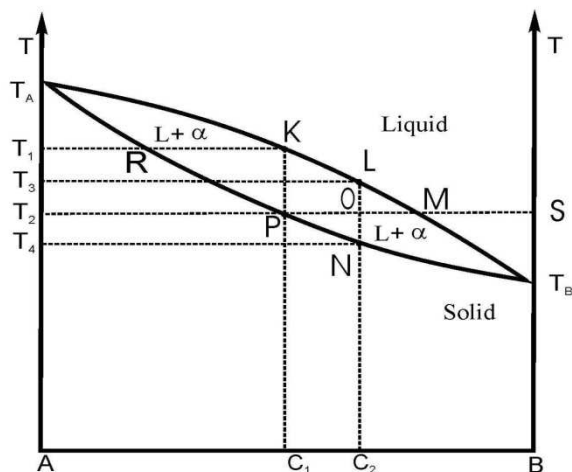


Рис. 3.24. Діаграма стану для сплаву речовин *A* та *B*, які характеризуються необмеженою розчинністю як у рідинній, так і у твердотільній фазах

При дослідженні залежності температури кристалізації сплавів від їхніх складових результати вимірювань зручно представляти у вигляді діаграми стану. Діаграма стану сплавів є графічним зображенням зміни рівноважного фазового стану сплавів залежно від їхньої температури та відносної концентрації складових кожного конкретного сплаву. Очевидно, що зовнішній вигляд діаграм стану є різним для різних комбінацій складових компонентів та визначається характером взаємодії між складовими компонентами сплавів.

Найпростішого вигляду діаграма стану набуває в тому випадку, коли речовини мають необмежену розчинність, як у рідкій, так і у твердій фазі. Така властивість притаманна, наприклад, системам *Cu-Ni*, *Ag-Au*. Діаграма стану таких сплавів називається діаграмою типу сигари, її наведено на рис. 3.24, де вздовж осі ординат нанесено значення температури, а вздовж осі абсцис – концентрації складових.

Лінію $T_A K L M T_B$ називають лінією ліквідусу, лінію $T_A P N T_B$ – лінією солідусу. Вище лінії ліквідусу система перебуває у стані однорідної рідини – розтопленої суміші металів. Нижче лінії солідусу система перебуває у стані однорідної твердотільної суміші. Внутрішня область «сигари» $T_A K L M T_B P N T_A$ відповідає такому стану суміші речовин *A* та *B*, який можна назвати розчином, що складається з певної кількості рідини та певної кількості кристалів твердих тіл, які входять до складу суміші (*A* та *B* відповідно). Цей стан характеризується певним співвідношенням мас рідкої та твердої фаз та відповідним значенням температури.

Якщо ми спочатку маємо твердий сплав двох металів (*A* та *B*) при відносній концентрації C_1 , то цьому стану відповідає точка в області твердої фази, наприклад, на осі абсцис це точка C_1 . Тепер якщо ми будемо підвищувати температуру, то на діаграмі стану цей процес виглядатиме як рух вздовж вертикальній пунктирній лінії, яка виходить із точки C_1 на абсцисі, проходить послідовно твердотільну фазу, потім проходить крізь фазу твердого розчину, межі якого визначаються точками *P* та *K*, а зупиняється в області рідкої

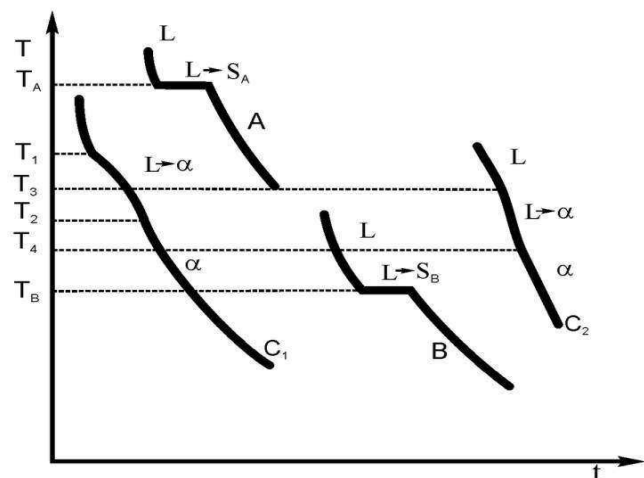


Рис. 3.25. Криві охолодження чистих металів A та B , а також їхніх сплавів при відносних концентраціях C_1 та C_2 для випадку необмеженої розчинності цих металів як у рідинній, так і у твердій фазах

фази, вище точки K . Її конкретне положення визначається значенням температури сплаву, яку відкладено по ординаті цієї діаграми (див. рис. 3.24).

При побудові кривої охолодження сплаву зі значенням концентрації C_1 (див. крайню ліву криву на рис. 3.25) видно, що вона має дві критичні температурні точки K та P , які відповідають початку та завершенню процесу твердіння сплаву, відповідно. Зміна нахилу кривих охолодження сплаву з відносною концентрацією C_1 на рис. 3.25 перед початком (точка K) та після завершення процесу твердіння (точка P) вказує на наявність для сплавів певного температурного інтервалу, у якому відбувається виділення теплоти кристалізації, на відміну від чистої речовини, для якої виділення теплоти кристалізації відбувається при фіксованому значенні температури. Процес охолодження чистих металів (на прикладі металу A) показано на рис. 3.25 другою кривою, рахуючи зліва. Видно, що процес охолодження для чистих металів

характеризується ділянкою сталого значення температури. Криву охолодження розчину з відносною концентрацією C_2 також показано на рис. 3.25 (див. крайню праву криву). На ній видно дві точки зламу, які відповідають точкам L (на лінії ліквідуса) та N (на лінії солідуса). Охолодження чистого металу B показано на рис. 3.25 третьою кривою, рахуючи зліва. Як і для чистого металу A , в даному випадку кристалізація відбувається при сталій температурі $T_B = \text{const}$.

Відзначимо принагідно, що з цих кривих охолодження можна отримати криві нагрівання відповідних твердих тіл: для цього слід «виконати поворот цих кривих, що подано на рис. 3.25, навколо відповідних вертикальних осей на 180° , при цьому нахил кривих $T(t)$ залежатиме від потужності нагрівача, а також від того, як будуть співвідноситися швидкість підведення тепла та швидкість розсіювання тепла об'єктом нагрівання в оточуючий простір.

Проаналізуємо тепер, як змінюється стан суміші, якщо ми триматимемо сталою її температуру, нехай для прикладу це буде T_2 (див. рис. 3.24), а змінюватимемо її відносну концентрацію. У якості початкового стану візьмемо чистий метал A , на діаграмі стану він описується точкою T_2 на осі ординат. Якщо тепер до суміші додавати поступово складову B , то для ілюстрації цього процесу слід на діаграмі стану провести горизонтальну лінію на висоті, яка відповідає температурі T_2 , до перетинання з лінією солідусу, точка P .

Після цього досліджувана термодинамічна система переходить до двофазного стану, що складається з кристалів речовин A та B , які «плавають» у рідкому розплаві цих речовин. Спочатку рідкої фази в суміші мало, потім, збільшуючи відносну концентрацію речовини B , кількість рідини стає все більшою та більшою. На діаграмі це виглядає так, що ми рухаємося праворуч вздовж горизонтальної лінії з $T_2 = \text{const}$, проходимо крізь точку O , якій відповідає відносна концентрація суміші із величиною C_2 , та полишаємо область двофазного стану у точці M , на лінії ліквідусу, де останні кристали твердої фази розплавлюються. Правіше точки M вся суміш знаходиться у рідкій фазі. Подальший рух вздовж зазначеної горизонтальної лінії супроводжується тільки збільшенням відносної

концентрації речовини B . Нарешті в точці S (це точка перетину горизонтальної лінії $T_2 = \text{const}$ з ординатою) ми маємо чисту речовину B у стані рідини.

Проаналізуємо стан суміші за умов $T_2 = \text{const}$ у двофазній області та на граничних лініях ліквідуса та солідуса. У випадку, коли досліджувана термодинамічна система знаходиться у стані, якому відповідає точка M , діаграму стану читають так: система знаходиться у стані рідини, в якій кількості речовин A та B співвідносяться як довжини відтинків SM та MT_2 . У стані, який описується точкою P на лінії солідусу, система знаходиться в твердому стані, при цьому кількості речовин A та B співвідносяться як довжини відтинків SP та PT_2 . Для точки O , де система характеризується відносною концентрацією C_2 , маси рідинної та твердої фракцій співвідносяться відповідно до *Правила Важеля* як довжини відтинків PO та OM .

У тому випадку, коли речовини мають необмежену розчинність у рідкій фазі та зовсім не розчиняються одна в одній у твердій фазі (наприклад, $Bi-Cd$, $Ag-Pb$), вони утворюють діаграму стану з наявністю точки евтектики (рис. 3.26). На діаграмі, що наведена на рис. 3.26, точками a та b позначено температури кристалізації чистих речовин A та B відповідно. Лінія $aMEb$ вказує температури початку кристалізації залежно від відсоткового співвідношення складових речовин даної суміші (лінія ліквідусу). Точка E , яка відповідає найнижчій температурі кристалізації, називається евтектичною точкою, а відповідна температура називається евтектичною температурою. Евтектичним називають і те значення відносної концентрації, при якому суміш цих речовин має найнижчу температуру кристалізації, а кристали, які утворюються в цьому стані, називаються евтектикою. Отже, евтектика являє собою дрібнодисперсну суміш кристалів чистих компонентів A та B . За евтектичної температури термодинамічна система складається з трьох фаз, які співіснують у рівновазі: чисті кристали речовини A , чисті кристали речовини B та рідка суміш із евтектичною концентрацією.

Дослідимо процес кристалізації сплаву речовин, концентрації яких дають чисто евтектичну діаграму стану (рис.

3.26). Крива aME є кривою зміни температури початку кристалізації речовини A залежно від концентрації розплаву.

Тому для сплаву з відносною концентрацією C_1 ордината точки M є тією температурою T_M , починаючи з якої у даному розплаві починають виділятися кристали речовини A у чистому вигляді. З часом внаслідок збільшення кількості та величини кристалів A цей сплав стає багатшим на вміст речовини B , а отже, подальше виділення кристалів A має відбуватися при більш низькій температурі, ніж T_M .

Дійсно, як підтверджують експерименти, одночасно з початком кристалізації речовини A температура сплаву знижується. Коли температура розплаву досягає евтектичної температури T_e (у точці E), а концентрація сплаву досягає відповідно значення концентрації евтектичного сплаву C_e , тоді починається затвердіння евтектики. Цікаво, що у процесі затвердіння сплаву з евтектичною концентрацією (іншими словами – при його кристалізації) температура сплаву не змінюється.

Таким чином, кристалізація сплаву починається за температури, яка є тим нижчою, чим ближче концентрація сплаву до евтектичної концентрації, а закінчується кристалізація за евтектичної температури. Зі сказаного вище зрозуміло, що для сплавів, які мають чисто евтектичну діаграму стану, лінією солідуса є лінія $KNEL$ (рис. 3.26).

Існує також третій тип сумішей; це суміш речовин, що характеризуються необмеженою розчинністю в рідкому стані та частковою розчинністю у твердій фазі. Вони утворюють діаграму, представлену на рис. 3.27. До таких сумішей належать,

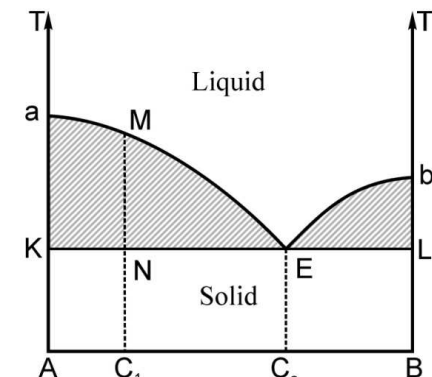


Рис. 3.26. Діаграма стану суміші речовин A та B , які не розчиняються у твердотільній фазі та характеризуються точкою евтектики

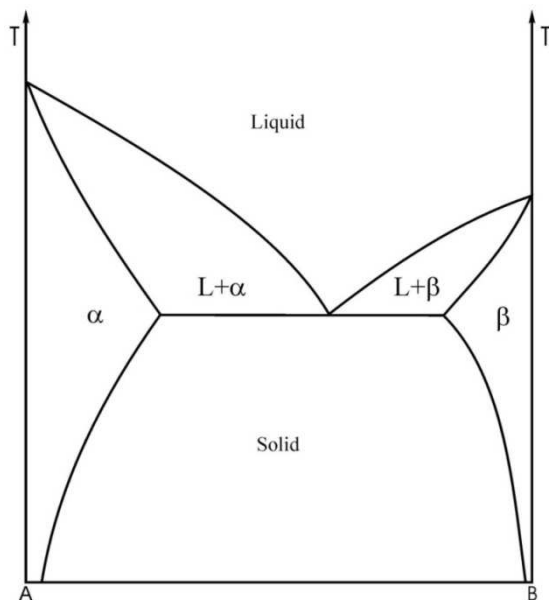


Рис. 3.27. Діаграма стану суміші речовин, які характеризуються необмеженою розчинністю у рідинному стані та частковою розчинністю у твердій фазі

наприклад, *Pb-Bi*, *Bi-Sn*, *Pb-Sb*.

На рис. 3.27 нижче лінії ліквідуса видно дві області, які позначено літерами α та β , в яких може існувати тільки тверда фаза або речовини *A*, або речовини *B*, відповідно. Твердий сплав цих речовин може існувати тільки в обмеженій області температур та відносних концентрацій; цю область підписано як *Solid*. Вище цієї області знаходяться дві області із змішаними станами, які у свою чергу обмежено лінією ліквідуса. Ці області позначено як $L+\alpha$ та $L+\beta$, в них суміш речовин *A* та *B* знаходиться у вигляді рідини, в якій «плавають» кристали речовини *A* та *B*, відповідно.

Для інших комбінацій речовин вигляд діаграм стану може бути значно складнішим, з наявністю локальних мінімумів, чи максимумів. Такі діаграми ми не будемо розглядати.

Ремарка.

Слід визнати, що діаграма стану для сплаву *Pb-Sn* не належить до числа чисто евтектичних (ці речовини мають невелику взаємну розчинність, тобто ця діаграма подібна до тієї, яку наведено на рис. 3.27), але робочі концентрації складових компонентів у наданих тиглях підбрано так, що побудова діаграми для цього сплаву, у першому наближенні, відбувається майже так само, як і для евтектичної суміші.

2. Опис установки

Для розтоплення олова, свинцю та різних за концентрацією їхніх сумішей застосовується тигельна піч із ніхромовим нагрівачем потужністю 500 Вт. Ці метали та їхні сплави в кількості 30÷60 мг містяться у сталевих тиглях місткістю приблизно 9÷10 см³. Зазвичай тиглі виготовляють із вогнетривких керамічних матеріалів (для плавлення металів часто використовують графітові, алундові та порцелянові тиглі) для нагрівання, плавки, випаровування матеріалів при високих температурах у потужних тигельних та муфельних печах. Олово та свинець, які досліджуються в даній роботі, характеризуються відносно низькою температурою розтоплення, тому для них обрано сталеві тиглі.

Температура металів та їхніх сплавів вимірюється термопарами, що закріплено у затискувачах, які стаціонарно розташовано на тиглях. Термопари у свою чергу потрібно буде при проведенні досліджень під'єднати до мілівольтметра для вимірювання температури.

До складу обладнання, яке використовується у даній роботі, окрім печі, входять:

- спеціальні щипці, якими слід акуратно витягати з печі нагрітий тигель із металом, або сплавом та закріпленою на тиглі термопарою;
- спеціальна підставка, на яку слід ставити нагрітий тигель для його охолодження;
- електронний мілівольтметр.

3. Визначення питомої теплоти плавлення олова

1. Зважуванням на технічних терезах визначити масу тигля M та масу олова m .

2. Тигель із оловом поставити до печі. Коли олово розплавиться, слід зачекати ще приблизно чотири хвилини, щоби температура розплаву була гарантовано більшою за температуру плавлення олова. Потім тигель із розплавленим оловом та прикріпленим у ньому затискувачем з термopарою захопити спеціальними щипцями, витягти з печі та поставити на спеціальну теплоізолюючу підставку на стіл. Дроти термopари під'єднати до мілівольтметра.

3. Через кожні 3 секунди записувати покази мілівольтметра. Вимірювання температури припинити після того, як у процесі охолодження буде пройдено стадію незмінного значення температури олова та почнеться процес подальшого зменшення його температури (числові значення, які показує мілівольтметр, при цьому мають змінитися порівняно з початковими приблизно вдвічі).

4. Побудувати криву залежності температури T олова від часу t , тобто $T=T(t)$, за допомогою якої (тобто графічно) визначити наступні величини:

- значення величин dT_1/dt_1 та dT_2/dt_2 (тобто тангенси кутів нахилу кривої $T=T(t)$ на різних етапах охолодження: при проходженні рідинної та твердотільної фаз),
- тривалість Δt проміжку часу, упродовж якого температура олова залишалася незмінною.

5. Обчислити питому теплоту плавлення q за формулою

$$q = \frac{t}{2m} \left[(MC_M + mc_{m1}) \frac{dT_1}{dt_1} + (MC_M + mc_{m2}) \frac{dT_2}{dt_2} \right]. \quad (3.109)$$

Значення теплоємкостей C_M , c_{m1} та c_{m2} вважати заданими (див. таблицю 4.17 з Розділу 4).

6. Порівняти експериментально знайдене значення питомої теплоти плавлення з табличним значенням.

7. Узявши з довідника значення температури плавлення олова та, поставивши йому у відповідність покази електронного мілівольтметра, визначити його ціну поділки.

4. Оцінка похибки вимірювання

Для оцінки величин, що входять до рівняння (3.109), скористаємося тим, що:

$$\frac{dT_1}{dt_1} \approx \frac{dT_2}{dt_2} \quad \text{та} \quad c_{m1} \approx c_{m2} \approx c_m. \quad (3.110)$$

Тоді відповідно до рівняння (3.109) одержимо

$$q = t \frac{(MC_M + mc_m)}{m} \frac{dT}{dt}. \quad (3.111)$$

Підставляючи до формули (3.111) числові значення $q=14$ ккал/г, $M=10$ г, $m=35$ г, $C_M=500$ Дж/(кг·К), $c_m=200$ Дж/(кг·К), маємо:

$$\frac{dT}{dt} \cdot t \approx 120 \text{ (K)}. \quad (3.112)$$

Як свідчить попередній експериментальний досвід, за вказаних умов теплопередача відбувається так, що швидкість зміни температури дорівнює 1 град/с, отже, процес кристалізації олова буде тривати близько двох хвилин.

Для оцінки відносної похибки визначення питомої теплоти плавлення q знову скористаємося наближенням (3.110). Тоді на підставі рівняння (3.109), беручи до уваги, що dT та dt також вимірюються графічно з певною неточністю: $\Delta(dT)$ та $\Delta(dt)$, одержуємо:

$$\frac{\Delta q}{q} = \frac{t}{q} \frac{\Delta T}{\Delta t} \left[\frac{C_M M}{m} \left(\frac{\Delta M}{M} + \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta C_M}{C_M} \right) + \Delta c_m \right] + \frac{\Delta t}{t} + \frac{\Delta(dT)}{dT} + \frac{\Delta(dt)}{dt}. \quad (3.113)$$

Оскільки відлік за шкалою мілівольтметра береться через кожні 3 секунди, то тривалість процесу кристалізації визначається з похибкою $\Delta t = \pm 1,5$ с, тобто $\Delta t/t \approx \pm 1,5/120$.

При визначенні швидкості охолодження, тобто величини $\Delta T/\Delta t$, похибку можна помітно зменшити за рахунок збільшення інтервалу часу, до якого належить відповідне зниження температури. Якщо, наприклад, охолодження відбувається зі швидкістю 1 град/с, то при $\Delta(dT) = \pm 1^\circ$, $\Delta(dt) = \pm 0,2$ с відносні похибки у визначенні температури та часу за інтервал в 20 секунд матимуть значення $\Delta(dT)/dT = \pm 5\%$ та $\Delta(dt)/dt = \pm 1\%$. За таких умов величини питомих теплоємностей c_{m1} та c_{m2} достатньо брати з точністю до третього знака після коми, а C_M – до другого знака. Зважування тигля з оловом достатньо проводити з точністю до: $\Delta M = \Delta m = \pm 0,05$ г.

Тоді з урахуванням формули (3.112) для першого члена рівняння (3.113) одержимо приблизно $\pm 2\%$, отже, складання всіх величин для відносних похибок окремих вимірювань дасть величину приблизно: $\Delta q/q \approx \pm 10\%$.

Ця величина є наближеною, оскільки в дійсності при виконанні роботи величина похідної $\Delta T/\Delta t$ визначається за нахилом дотичної до кривої лінії, яка визначає конкретну залежність $T = T(t)$, що залежить від умов проведення досліджень.

Завдання №1

1. Побудувати залежність температури охолодження олова від часу для певної кількості чистого олова, користуючись обчисленням значенням ціни поділки мілівольтметра.
2. Визначити з отриманого графіка значення питомої теплоти плавлення олова.
3. Визначити абсолютну похибку вимірювання величини q .

5. Побудова діаграми стану системи олово–свинець

Для того, щоби побудувати діаграму термічним методом, слід одержати криві охолодження чистих металів (у нашому випадку Pb та Sn) та низки їхніх сплавів.

1. Взяти тигель зі свинцем та поставити його до печі; зачекати, доки метал повністю розплавиться.
2. Перенести тигель на підставку та під'єднати дроти термопари до мілівольтметра.
3. Коли покази мілівольтметра почнуть змінюватися, тоді через певні (приблизно 3–5 секунд) проміжки часу почати записувати покази мілівольтметра. Охолодження чистого металу відбувається згідно з ходом другої та третьої кривих (рахуючи зліва), які зображено на рис. 3.25 для чистих металів.
4. У проміжку часу $t_2 \div t_1$ покази мілівольтметра залишаються незмінними, а потім починають знову змінюватися. Покази мілівольтметра в момент тимчасового припинення зміни його показів відповідають температурі затвердіння (кристалізації).
5. Після завершення процедури вимірювання температури від'єднати мілівольтметр від термопари, яку закріплено на даному тиглі, та спеціальними щипцями взяти тигель із металом та акуратно вийняти його з підставки та поставити на спеціальну касету для тиглів.
6. Крім тиглів з чистими металами, в даній роботі використовують кілька тиглів із різними сплавами олова та свинцю. Взяти послідовно один за одним ці тиглі, та виконати операції, які детально описано у попередніх пунктах, 1÷5. При охолодженні та нагріванні сплавів, як було сказано вище, крива залежності температури від часу може мати (див. рис. 3.25) кілька критичних точок, які визначаються за місцем зміни нахилу температурної кривої.
7. Побудувати графіки залежності температури сплаву від часу для всіх наявних сплавів олова та свинцю, користуючись обчисленням у першій частині даної роботи значенням ціни поділки мілівольтметра.
8. За отриманими критичними точками побудувати діаграму стану свинець–олово та визначити евтектичну точку.

Діаграму будують у такий спосіб: уздовж осі абсцис відкладають відсотковий склад досліджуваних сплавів, а вздовж осей ординат, що відповідають цим сплавам, наносять знайдені значення критичних температур. Здобуті точки з'єднують плавними лініями. Мінімум кривої дасть